

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ**

**LEONARDO TISCÓSKI SCHEIDT**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA  
POR INTERMÉDIO DE AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS  
NA EXAUSTÃO DE TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

**CASCADEL - PR  
2019**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ**

**LEONARDO TISCÓSKI SCHEIDT**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA  
POR INTERMÉDIO DE AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS  
NA EXAUSTÃO DE TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador: Me. Eng. Mec. Carlos Alberto Breda**

**CASCAVEL - PR  
2019**

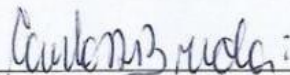
**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ**

**LEONARDO TISCÓSKI SCHEIDT**

**ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA  
POR INTERMÉDIO DE AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS  
NA EXAUSTÃO DE TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Me. Eng. Mec. Carlos Alberto Breda.

**BANCA EXAMINADORA**



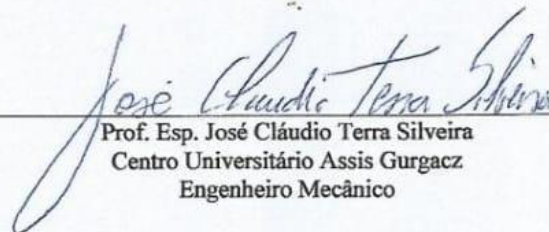
---

Orientador Prof. Me. Carlos Alberto Breda  
Centro Universitário Assis Gurgacz  
Engenheiro Mecânico



---

Prof. Me. Rosemar Cristiane Dal Ponte  
Centro Universitário Assis Gurgacz  
Bacharel em Informática



---

Prof. Esp. José Cláudio Terra Silveira  
Centro Universitário Assis Gurgacz  
Engenheiro Mecânico

Cascavel, 28 de novembro de 2019.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos os envolvidos em minha formação,  
em especial, aos meus pais e à minha namorada,  
que sempre prestaram apoio, incentivo  
e tornaram esta jornada possível de ser trilhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter concedido toda a força, dedicação e motivação necessárias durante o processo de formação.

Aos meus pais, em especial, por possibilitarem minha graduação como fruto de seu trabalho, nunca medindo esforços, para que eu alcançasse meus anseios.

Meu agradecimento também a todos os colegas, que auxiliaram, de alguma forma, durante o curso, e especialmente à minha namorada, que sempre esteve presente apesar de todas as dificuldades.

Por fim, agradeço a todos os professores, que participaram da minha graduação, concedendo conhecimentos e experiências para minha construção profissional. Igualmente, agradeço ao meu orientador e professor, Carlos Alberto Breda, pela sua disponibilidade em me prestar auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

SCHEIDT, Leonardo Tiscóski. **Estudo do potencial de geração de energia eólica por intermédio de aerogerador com rotor tipo Savonius na exaustão de torre de resfriamento de água**. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Assis Gurgacz, 2019.

O aumento da população, em conjunto com o desenvolvimento desenfreado da tecnologia, tornou imprescindível a busca e pesquisa por novas fontes energéticas, a fim de suprir a demanda crescente por energia. Ainda, o fator ambiental se tornou uma grande problemática, fortalecendo assim a necessidade de estudos relacionados ao potencial de geração de energia e aproveitamento energético de processos sem agressão. Com isto, objetiva-se com a pesquisa o estudo do potencial de geração de energia eólica por meio de aerogerador com rotor tipo Savonius, na exaustão de torre de resfriamento de água modelo 180/9, série R, marca KÖRPER, analisando não somente o quanto de energia pode ser gerado bem como sua viabilidade de implantação a nível técnico, tomando como premissa para tal análise a possibilidade de aproveitamento desta energia gerada por algum meio cabível. Logo, é assertiva a consonância do estudo conduzido com as preocupações mundiais da atualidade e, para que se alcancem os objetivos propostos, torna-se imprescindível a pesquisa de campo em conjunto com a bibliográfica, de modo que, através da pesquisa de campo, determinam-se as variáveis fundamentais para o estudo como velocidade média de exaustão do ar, temperatura média e umidade relativa média, mediante a utilização de termo-higro-anemômetro. Estes dados em conjunto com as características essenciais da torre analisada, obtidas através de catálogo do fabricante, tornam possível a aplicação das equações apresentadas pela bibliografia, impulsionando a obtenção de resultados compatíveis com os objetivos do estudo. Portanto, adotado tal procedimento metodológico, os resultados obtidos se demonstraram favoráveis no tocante tanto da geração de energia eólica através de aerogedor com rotor tipo Savonius em torre de resfriamento de água, quanto à possibilidade de aproveitamento desta energia passível de ser gerada, através de sistemas *on-grid* ou *off-grid*. Por fim, apesar do baixo potencial devido às limitações do rotor empregado, conclui-se com a pesquisa que existe, de fato, uma determinada quantidade de energia passível de ser aproveitada através do fluxo de exaustão da torre de resfriamento de água tomada como base para o estudo, com a utilização de aerogerador com rotor tipo Savonius. Ressalta-se ainda que esta energia gerada pode ser aproveitada mediante sistemas *on-grid* (conectados diretamente à rede elétrica) ou *off-grid* (através de banco de baterias), confirmando assim a existência de um certo potencial desperdiçado. Além, o procedimento metodológico adotado para a presente pesquisa pode ser extrapolado para outras configurações de rotores e torres de resfriamento de água, impulsionando assim a obtenção de diferentes resultados e conclusões.

**Palavras-chave:** Aproveitamento energético. Turbina de eixo vertical. Viabilidade técnica.

## ABSTRACT

SCHEIDT, Leonardo Tiscóski. **Study of wind power generation potential through Savonius rotor wind turbine in water cooling tower exhaust.** 2019. 75 f. Undergraduate thesis (Mechanical Engineering Course) – Assis Gurgacz University Center, Cascavel, PR, 2019.

The population increase, together with the unbridled development of technology, made it essential to search and research for new energy sources in order to meet the growing demand for energy. In addition, the environmental factor has become a big problematic, strengthening the necessity of studies related to the potential of energy generation and energy use of processes without aggression. With this, it is objectified with the current research, the study of the potential for wind power generation by the means of a Savonius rotor wind turbine of the KÖRPER model, 180/9 R series, water cooling tower exhaust, analyzing not only the amount of energy that can be generated, but also its implantation viability in a technical level, taking as a premise for such analysis the possibility of harnessing this energy generated by some appropriate mean. Therefore, the study is in line with the current world concerns. To achieve the proposed objectives, the methodological course followed the guidelines of the field research, together with the bibliographic guideline, in order to determine the fundamental variables for the study, as average air exhaustion velocity, average temperature and average relative humidity, through the use of thermos hygro-anemometer. This data, together with the essential characteristics of the analyzed tower, obtained by the developers catalog, made the application of the equations presented by the bibliography possible, boosting the obtained results compatible with the objectives of the study. Thus, by adopting such methodological procedure, the results obtained were favorable regarding wind energy generation through a Savonius rotor aerator in a water cooling tower, as well as the possibility of harnessing this energy, through on-grid systems (connected directly to the electrical network) or off-grid (via battery bank). Finally, despite the low potential due to the limitations of the rotor employed, it can be concluded that there is a determined quantity of energy that can be harnessed through the exhaust flow from the water cooling tower taken as the basis for the study, using a Savonius rotor wind turbine. It is also emphasized that this generated energy can be harnessed through on-grid or off-grid systems, confirming the existence of a wasted potential. Besides that, the methodological procedure adopted by the present research can be extrapolated to other rotor and water cooling tower configurations, thereby driving different results and conclusions.

**Keywords:** Energetic harnessing. Vertical axis turbine. Technical viability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Turbina eólica desenvolvida por Charles Brush.....	25
FIGURA 2: Principais elementos constituintes de um aerogerador de eixo horizontal.....	29
FIGURA 3: Diferentes tipos de rotores empregados em aerogeradores.....	30
FIGURA 4: Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento.....	33
FIGURA 5: Torre de resfriamento de água atmosférica com configuração hiperbólica.....	33
FIGURA 6: Torre de resfriamento de água do tipo corrente de ar forçado.....	34
FIGURA 7: Torre de resfriamento de água do tipo corrente de ar induzido.....	34
FIGURA 8: Carta psicrométrica e a representação de processos.....	37
FIGURA 9: Esquema de funcionamento de uma bomba de engrenagens.....	38
FIGURA 10: Termo-higro-anemômetro utilizado para as medições.....	40
FIGURA 11: Pontos de medição adotados.....	44
FIGURA 12: Torre de resfriamento de água na qual as medições foram conduzidas.....	48
FIGURA 13: Plaqueta de identificação da torre de resfriamento de água.....	49
FIGURA 14: Principais dimensões da torre de resfriamento de água segundo catálogo do fabricante.....	50
FIGURA 15: Deterioração da plaqueta de identificação do motor da torre.....	51
FIGURA 16: Parâmetros psicrométricos obtidos através do software GRAPSI 5.1.....	56
FIGURA 17: Relação geométrica de um retângulo inscrito em uma circunferência.....	61

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: Projeção da população mundial.....	21
GRÁFICO 2: Aumento do consumo anual de energia no Planeta durante o século XX.....	22
GRÁFICO 3: Matriz energética brasileira.....	23
GRÁFICO 4: Aumento do consumo de energia elétrica no Brasil em comparação ao crescimento do PIB.....	23
GRÁFICO 5: Crescimento da potência eólica instalada no mundo.....	26
GRÁFICO 6: Ascensão da energia eólica no Brasil.....	27
GRÁFICO 7: Coeficientes de potência teórica de diferentes tipos de aerogeradores em função da velocidade da ponta do rotor.....	31
GRÁFICO 8: Potência dos ventos obtida em função da vazão volumétrica de ar.....	68
GRÁFICO 9: Comparativo entre as potências obtidas por um aerogerador com rotor tipo Savonius e um rotor com número infinito de pás.....	68

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Classificação das fontes renováveis de energia.....	24
QUADRO 2: Unidades de operação do termo-higro-anemômetro utilizado e unidades selecionadas para o estudo.....	41
QUADRO 3: Informações referentes à leitura de umidade relativa e temperatura.....	41
QUADRO 4: Informações referentes à leitura de umidade relativa e temperatura.....	42
QUADRO 5: Orientação de cada ponto.....	44
QUADRO 6: Condições ambientes no momento das medições.....	49
QUADRO 7: Leituras de velocidade obtidas e valores médios.....	52
QUADRO 8: Leituras de temperatura obtidas e valores médios.....	53
QUADRO 9: Leituras de umidade relativa obtidas e valores médios.....	54

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: Equação da variação de energia interna do sistema.....	19
EQUAÇÃO 2: Equação do trabalho.....	20
EQUAÇÃO 3: Equação de energia cinética.....	28
EQUAÇÃO 4: Equação da potência disponível dos ventos.....	30
EQUAÇÃO 5: Equação da máxima potência que pode ser extraída por uma turbina eólica.....	32
EQUAÇÃO 6: Equação de pressão atmosférica.....	35
EQUAÇÃO 7: Equação da umidade absoluta.....	36
EQUAÇÃO 8: Equação da umidade relativa.....	36
EQUAÇÃO 9: Equação de vazão volumétrica.....	38
EQUAÇÃO 10: Equação da área de secção circular.....	42
EQUAÇÃO 11: Equação da área de um retângulo.....	61
EQUAÇÃO 12: Teorema de Pitágoras.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AC -</b>	corrente alterada
<b>ANEEL –</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>CC -</b>	corrente contínua
<b>GW -</b>	gigawatts
<b>IBGE -</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>Kg -</b>	quilograma
<b>KJ -</b>	quilojoule
<b>Kpa -</b>	quilopascal
<b>KW -</b>	quilowatts
<b>m -</b>	metro
<b>mm</b>	milímetro
<b>N -</b>	Newton
<b>ONU -</b>	Organização das Nações Unidas
<b>PIB -</b>	Produto Interno Bruto
<b>PROINFA -</b>	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
<b>r</b>	raio
<b>s -</b>	segundo
<b>TEP –</b>	Tonelada Equivalente de Petróleo
<b>W -</b>	watts
<b>SI -</b>	Sistema Internacional de Unidades

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	CONCEITOS E FUNDAMENTOS DE ENERGIA.....	19
2.1.1	Primeira Lei da Termodinâmica.....	19
2.1.2	Segunda Lei da Termodinâmica.....	20
2.1.3	Trabalho.....	20
2.2	CONSUMO DE ENERGIA GLOBAL.....	21
2.3	CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL.....	22
2.4	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	24
2.5	ENERGIA EÓLICA.....	25
2.5.1	Energia eólica no Brasil.....	27
2.6	AEROGERADORES.....	28
2.6.1	Princípios de funcionamento.....	28
2.6.2	Classificação dos aerogeradores.....	29
2.6.3	Potência extraída por um aerogerador e o limite de Lanchester-Betz.....	30
2.7	TORRES DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA.....	32
2.7.1	Conceitos relevantes ao estudo de torres de resfriamento de água.....	35
2.7.1.1	Ar seco e a mistura de ar com vapor de água.....	35
2.7.1.2	Umidade relativa e umidade absoluta do ar.....	35
2.7.1.3	Ponto de orvalho.....	37
2.7.1.4	Carta psicrométrica.....	37
2.7.1.5	Vazão volumétrica.....	38
2.7.1.6	Bombas hidráulicas.....	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>39</b>
3.1	INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO ADOTADO.....	39

3.1.1	Características fundamentais do equipamento empregado.....	40
3.2	DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE EXAUSTÃO DO FLUXO DE AR DA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA.....	42
3.3	CONSTATAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO DA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA.....	43
3.4	DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO NA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA E A QUANTIDADE DE MEDIÇÕES.....	43
3.5	MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE VAZÃO DO AR.....	45
3.6	CÁLCULO DA VAZÃO VOLUMÉTRICA DE AR.....	45
3.7	DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR NA SAÍDA DA TORRE.....	46
3.8	CÁLCULO DA MÁXIMA POTÊNCIA PASSÍVEL DE APROVEITAMENTO.....	46
3.9	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO SISTEMA.....	47
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>48</b>
4.1	DADOS COLETADOS.....	48
4.1.1	Condições ambientes no momento das medições.....	49
4.1.2	Determinação do diâmetro do bocal de exaustão da torre de resfriamento de água.....	49
4.1.3	Condições de trabalho da torre de resfriamento de água durante as medições.....	50
4.1.4	Determinação da velocidade média de exaustão.....	51
4.1.5	Determinação da temperatura média de exaustão.....	52
4.1.6	Determinação da umidade relativa média de exaustão.....	54
4.1.7	Determinação da densidade média do ar no fluxo de exaustão.....	55
4.2	CÁLCULO DAS VARIÁVEIS FUNDAMENTAIS.....	57
4.2.1	Cálculo da área total de exaustão da torre de resfriamento de água.....	57
4.2.2	Cálculo da máxima vazão volumétrica de ar.....	58
4.3	CÁLCULO DA MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA PASSÍVEL DE APROVEITAMENTO VIA AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS.....	59
4.3.1	Determinação da área de varredura do rotor tipo Savonius.....	60
4.3.2	Vazão volumétrica referente à área de varredura do rotor aplicado.....	63

4.3.3	Valor da máxima potência teórica obtida através de aerogerador com rotor tipo Savonius.....	63
4.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA.....	64
4.4.1	Possibilidade de aproveitamento via sistema <i>on-grid</i> .....	65
4.4.2	Possibilidade de aproveitamento via sistema <i>off-grid</i> .....	65
4.5	COMPARATIVO ENTRE A MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA OBTIDA VIA AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS E A MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA PARA A SITUAÇÃO IDEAL.....	66
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento energético de processos é de suma importância e, cada vez mais, valorizado na sociedade. Isso se dá devido às problemáticas ambientais as quais o homem enfrenta e também ao aumento desenfreado do consumo de energia em virtude da ascensão tecnológica, tornando-a um bem de grande valor. Nessa perspectiva, Mauad, Ferreira e Trindade (2017) afirmam que muitas alternativas têm sido estudadas com os objetivos de diversificar os recursos energéticos disponíveis e reduzir os efeitos negativos que a geração, a distribuição e o consumo de energia apresentam na esfera ambiental.

Considerando tais premissas, a pesquisa intitulada “Estudo do potencial de geração de energia eólica por intermédio de aerogerador com rotor tipo Savonius na exaustão de torre de resfriamento de água” tem o objetivo de investigar o potencial de geração de energia eólica na exaustão de uma torre de resfriamento de água, mediante o aproveitamento da energia cinética do fluxo, por intermédio de aerogerador com rotor tipo Savonius.

Importante destacar que o escopo do estudo se refere ao aproveitamento energético de um fluxo despejado à atmosfera, apresentando, portanto, conteúdo energético desperdiçado. Sendo assim, torna-se conveniente afirmar que, sendo possível, o aproveitamento é de baixa capacidade e adequado à geração de energia para pequenas utilizações.

Sob tais pressupostos, este trabalho foi orientado pelas limitações e capacidades de aerogeradores com rotor tipo Savonius, visto que, conforme Silva (2013 *apud* MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017), esse tipo de configuração (eixo vertical) é usualmente aplicado em utilizações de baixa potência. Ainda, vale a ressalva de que o estudo se restringiu à análise do aproveitamento em torres de resfriamento de água de corrente de ar induzido, abstendo-se de estudos referentes às torres atmosféricas ou de corrente forçada.

Para o alcance do objetivo central proposto, configurou-se como eixo norteador a seguinte problemática: Existe algum potencial de geração de energia eólica através da exaustão de uma torre de resfriamento de água, marca KÖRPER, série R, modelo 180/9, com o uso de aerogerador com rotor tipo Savonius? Este questionamento condicionou à formulação de duas hipóteses: a) a de caráter positivo, em que o sistema se apresenta viável tecnicamente à aplicação e com razoável geração de energia, contribuindo para o aproveitamento energético de processos; b) a de caráter negativo, em que o sistema, quanto à possibilidade de aproveitamento energético, é impraticável a nível técnico ou sem capacidade de geração.

Partindo, portanto, da problemática apresentada, a discussão quanto ao potencial de geração de energia eólica, por meio de processos industriais de resfriamento de água, mediante

torres de resfriamento, destacou-se na pesquisa. Para a eficácia da discussão e da apresentação de resultados, considerou-se elementar a análise energética do fluxo de exaustão da torre por intermédio de pesquisa de campo, fazendo-se uso de termo-higro-anemômetro, com medições necessárias e cálculos cabíveis. Soma-se a esses condicionantes, a avaliação do potencial para a geração de energia eólica.

Relevante considerar que a análise explicitada neste estudo é de grande valor social, científico e acadêmico, pois se trata de uma forma de aproveitamento energético ainda não explorado e, provado como viável, pode tornar-se uma nova alternativa de aprimoramento na eficiência de processos industriais. Ademais, esta pesquisa tem sua relevância por contribuir diretamente para o incentivo da exploração de novas fontes existentes, passíveis de geração de energia, incitando o meio acadêmico e científico à procura de novas formas de aproveitamento energético.

Para a concretização da pesquisa, o estabelecimento de uma sequência lógica de ações, com o intento de se obter um resultado final foi imprescindível. Sendo assim, o presente trabalho se estrutura de forma sequencial e inter-relacionada, abordando desde conceitos básicos aos resultados obtidos e considerações finais.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Investigar o potencial de geração de energia eólica através da exaustão de uma torre de resfriamento de água, marca KÖRPER, série R, modelo 180/9, mediante aerogerador com rotor tipo Savonius.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Quantificar a vazão volumétrica de ar na exaustão da torre de resfriamento de água mediante pesquisa de campo e referenciais bibliográficos.

Analisar a máxima potência passível de ser extraída do fluxo de saída de ar da torre tipo 180/9 série R, fabricada pela empresa KORPER, utilizando-se de aerogerador com rotor tipo Savonius.

Avaliar, por meio de dados coletados e cálculos realizados, a possibilidade de aproveitamento energético da exaustão via aerogerador com rotor tipo Savonius, em seu viés técnico.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O questionamento relativo ao aproveitamento do potencial energético na exaustão de uma torre de resfriamento de água por intermédio de um aerogerador é consonante às preocupações mundiais atuais, em virtude das problemáticas ambientais enfrentadas pela humanidade e devido à crescente demanda por energia.

Segundo Mauad, Ferreira e Trindade (2017), novas fontes vêm sendo buscadas com a finalidade de diversificar a matriz energética de países, como também desenvolver alternativas que possam reduzir impactos. Em decorrência desses aspectos e das altas vazões envolvidas nas torres (grande potencial energético), bem como da frequente presença em indústrias modernas, a justificativa quanto à investigação desse potencial se torna pertinente ao viés científico, ainda inexplorado no meio acadêmico.

À vista disso, a presente pesquisa teve o propósito de determinar o conteúdo energético presente na exaustão de torre de resfriamento de água passível de aproveitamento mediante aerogerador com rotor tipo Savonius, estabelecendo um novo método de aprimoramento da eficiência global em meio industrial. Nesse sentido, o trabalho se voltou às organizações que utilizam processos de resfriamento de água por meio da utilização de torres de resfriamento.

O estudo se caracteriza como pesquisa bibliográfica, sob o aporte teórico de autores da área, associada à pesquisa de campo, em virtude de testes realizados em campo através da utilização de termo-higro-anemômetro em torre de resfriamento. A compilação e análise dos dados coletados, à luz do marco teórico de referência, possibilitam a averiguação das hipóteses e impulsionam a tomada de conclusões.

## 1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Com o aumento populacional e a ascensão tecnológica, a busca por novas fontes energéticas, a fim de suprir a demanda crescente de energia, tornou-se inevitável e essencial. Do mesmo modo, o fator ambiental tem configurado uma grande problemática, fomentando a

necessidade de pesquisas relacionadas ao potencial de geração de energia sem agressão, como também ao aproveitamento energético de processos.

Sendo assim, o fluxo de exaustão de ar úmido em uma torre de resfriamento de água deve ser analisado, para que se possa determinar se há, de fato, energia desperdiçada passível de aproveitamento, beneficiando, com isso, as atividades humanas. Afinal, existe potencial para geração de energia eólica nos gases de exaustão de uma torre de resfriamento de água, marca KÖRPER, série R, modelo 180/9, mediante aerogerador com rotor tipo Savonius?

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

No percurso metodológico da pesquisa, analisou-se a quantidade de energia cinética passível de aproveitamento, presente no fluxo de exaustão de uma torre de resfriamento de água, tipo corrente de ar induzido, modelo 180/9, série R, cujo fabricante é a marca KÖRPER, por meio de pesquisa de campo, utilizando-se termo-higro-anemômetro.

Quanto à torre de resfriamento, tomada como base para a realização das medições, localiza-se na empresa XYZ em Cascavel-PR. Por conseguinte, neste estudo, avalia-se a viabilidade técnica e a capacidade de aproveitamento desse fluxo, mediante máquina eólica com rotor tipo Savonius, com correspondente discussão dos resultados obtidos quanto à sua aplicabilidade, sob o aporte da pesquisa bibliográfica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONCEITOS E FUNDAMENTOS DE ENERGIA

Em conformidade com Creder (2004), a energia não é substância nem mesmo invisível, uma vez que sua manifestação pode ser observada pelos resultados produzidos por suas interações. Para Marques, Haddad e Martins (2006), uma definição abrangente para energia consiste em ser aquilo que permite uma mudança em um sistema. Isso em conformidade com a definição proposta por Maxwell ainda no ano de 1872.

Para Çengel e Boles (2013), a energia pode ser compreendida como a capacidade de causar alterações. Neste caso, a termodinâmica é definida como a ciência da energia que estuda seus aspectos e transformações. Complementarmente, Creder (2004) afirma que a energia não pode ser criada, nem mesmo destruída, o que caracteriza a Lei da Conservação de Energia a qual estabelece que, em um determinado sistema, a quantidade total de energia permanece constante.

De acordo com Çengel e Boles (2013), a primeira Lei da Termodinâmica é uma expressão desse princípio, enquanto que a segunda Lei da Termodinâmica especifica que a energia possui tanto qualidade quanto quantidade e os processos ocorrem na direção de diminuição da qualidade. Nessa mesma linha de raciocínio, Soonntag, Borgnakke e Wylen (2009) corroboram que o trabalho é uma forma de transferência de energia entre sistemas, logo, seu entendimento é inquestionável.

#### 2.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

Em conformidade com os estudos de Anacleto J. e Anacleto A. (2006), a formulação matemática da primeira Lei da Termodinâmica dita que a variação de energia interna de um determinado sistema é igual à soma das interações de calor e trabalho entre o sistema e suas vizinhanças, como destaca a Equação 1:

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

onde:

$\Delta U$ : variação de energia interna do sistema (KJ)

Q: calor (KJ)

W: trabalho (KJ)

Para Çengel e Boles (2013), como se mencionou, a base da primeira Lei da Termodinâmica enuncia que a energia não pode ser criada, nem mesmo destruída, apenas pode mudar de forma. De acordo com os autores, uma pedra alocada em uma determinada altura em relação a um referencial possui energia potencial e, ao cair, esta energia é gradualmente transformada em energia cinética ao ser desconsiderada a resistência do ar, confirmando, assim, o enunciado proposto pela primeira Lei.

### 2.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica

A segunda Lei da Termodinâmica prescreve que a entropia<sup>1</sup> de um sistema fechado, na melhor das hipóteses, mantém-se constante. Todavia, se mudar, a entropia aumentará. (ROSA, 2015). Para o autor, o grau de “nobreza” é perdido em processos, haja vista que não há Lei de Conservação para a referida variável. Dessa forma, os processos sempre ocorrem em uma determinada direção de diminuição da qualidade/ordem das formas de energia. Por conseguinte, para que ocorram, é necessário que ambas as leis sejam respeitadas (ÇENGEL e BOLES, 2013).

### 2.1.3 Trabalho

O trabalho na termodinâmica consiste na interação energética entre um sistema e seus arredores. Nesse sentido, entende-se como trabalho a transferência de energia associada a uma força que age em uma dada distância como, por exemplo, um pistão em ascensão (ÇENGEL e BOLES, 2013). A Equação 2 representa o cálculo de trabalho conforme sua definição:

$$W = F \cdot S \quad (2)$$

onde:

---

<sup>1</sup> Entropia - pode ser definida como o grau de “nobreza” (qualidade) de uma forma de energia (ROSA, 2015).

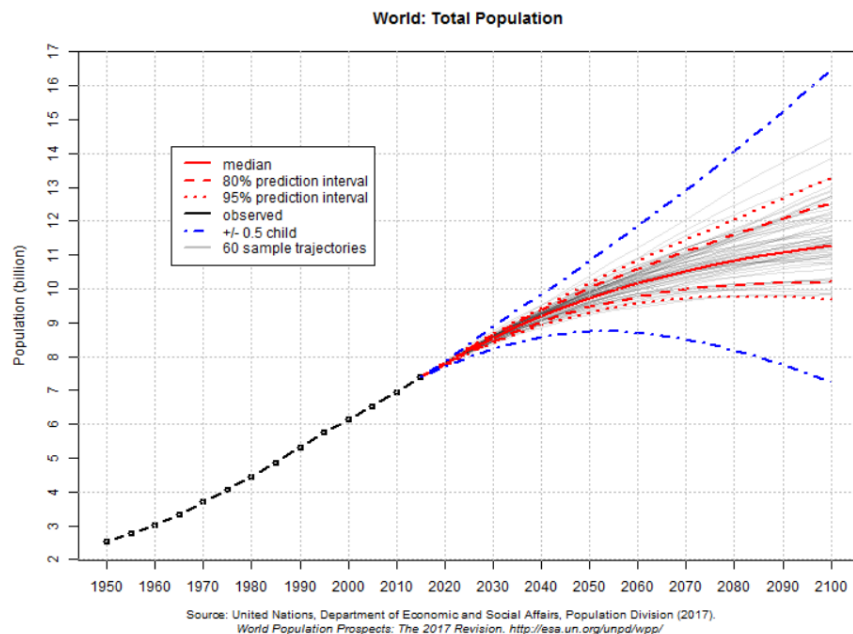
W: trabalho mecânico realizado (J)

F: força atuante (N)

S: distância percorrida (m)

## 2.2 CONSUMO DE ENERGIA GLOBAL

O consumo de energia no Planeta é condizente à população que o habita. Todavia, essa mesma população tem crescido de forma significativa e acelerada nos últimos anos (ROSA, 2015). Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU), (2017), em torno de 83 milhões de pessoas são acrescentadas à população mundial anualmente. Apesar dos níveis de fertilidade estarem decaindo, a perspectiva é a de que a população global deve alcançar o índice de 8,6 bilhões em 2030; 9,8 bilhões em 2050; 11,2 bilhões em 2100<sup>2</sup>, conforme Gráfico 1.



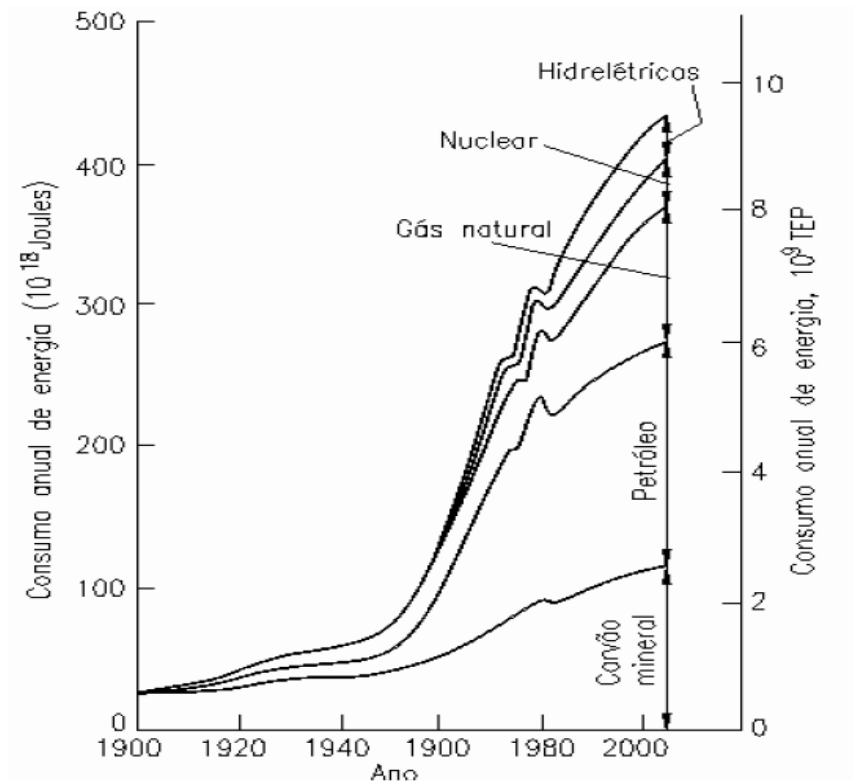
**Gráfico 1:** Projeção da população mundial

(Fonte: Adaptada de UN – United Nations. World Population Prospects: The 2017 Revision, 2017 - Disponível em: <<https://population.un.org/%20/%20Gr%C3%A1ficos%20/%20Probabil%C3%ADsticos%20%20POP%20/%20TOT%20/>>. Acesso em: 11 abr. 2019)

Nota: O Gráfico mostra, além da média projetada, as medianas probabilísticas e os intervalos de previsão de 80 a 95% das projeções populacionais probabilísticas.

<sup>2</sup> Current estimates indicate that roughly 83 million people are being added to the world's population every year. Even assuming that fertility levels will continue to decline, the global population is expected to reach 8.6 billion in 2030, 9.8 billion in 2050 and 11.2 billion in 2100, according to the medium-variant projection.

De acordo com Rosa (2015), em tempos longínquos, a energia era utilizada apenas como forma de alimento a uma taxa diária inferior a 100 W por pessoa. Com o aprimoramento da dieta e a cocção de alimentos, essa taxa cresceu para 300 W per capita. Ademais, a demanda por energia sofreu um crescimento constante e drasticamente acelerado após a Revolução Industrial no século XIX, como pode ser observado pelo Gráfico 2.



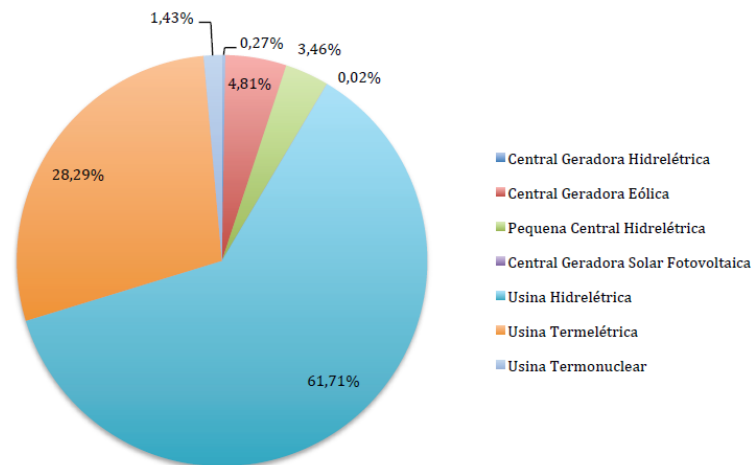
**Gráfico 2:** Aumento do consumo anual de energia no Planeta durante o século XX

(Fonte: MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006)

Nota: A sigla TEP equivale à Tonelada Equivalente de Petróleo, que consiste na quantidade do calor liberado na queima de uma tonelada de petróleo cru, sendo igual a, aproximadamente, 41868MJ.

### 2.3 CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL

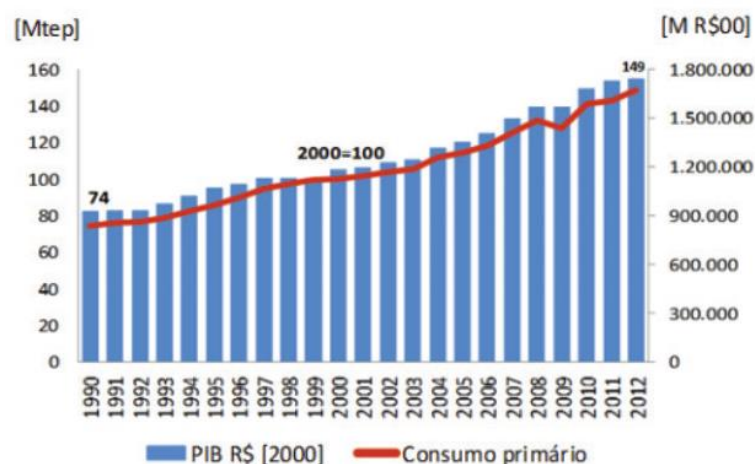
No Brasil, o consumo de energia vem crescendo, assim como sua independência para suprimento dessa necessidade, visto que, em 1997, a dependência externa de energia no país era de 29%, e em 2004, de 13% (MARQUES, HADDAD e MARTINS, 2006). As fontes renováveis de energia representam, assim, uma grande parcela de produção, conforme Gráfico 3.



**Gráfico 3:** Matriz energética brasileira

(Fonte: MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017)

Conforme estudos de Mauad, Ferreira e Trindade (2017), entre os anos de 1980 e 2002, no Brasil, o crescimento da geração de eletricidade foi de 4,2% (taxa média anual), com predomínio da energia hidráulica, devido às características favoráveis que o país apresenta para essa modalidade. Há que se considerar também que o consumo de energia elétrica de um país está diretamente associado ao seu crescimento econômico. Esse fato associa-se a fatores como o aumento do poder de aquisição da população, crescimento da produção industrial, entre outros, o que é representado no Gráfico 4.



**Gráfico 4:** Aumento do consumo de energia elétrica no Brasil em comparação ao crescimento do PIB

(Fonte: MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017)

Nota: os valores do Produto Interno Bruto (PIB) estão ajustados, tendo como referência o valor do ano de 2000, atribuindo a este um valor arbitrário de 100.

Outro fator que contribuiu para o aumento do consumo de energia no país foi o crescimento populacional, pois, em conformidade com Mauad, Ferreira e Trindade (2017), no ano de 2010, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgou que o número de residentes no Brasil era 19 vezes maior do que em 1890.

## 2.4 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Em conformidade com Goldemberg e Lucon (2007), as energias renováveis podem ser entendidas como as respostas dadas imediatamente pela natureza, tais como as fontes eólicas, solares, entre outras. Já as fontes não renováveis são as que necessitam de um tempo geológico para sua reposição, como os combustíveis fósseis. Ainda, de acordo com os autores, as fontes renováveis de energia podem ser divididas em energias primárias e secundárias, além de serem subdivididas em tradicionais, convencionais e novas. Já as fontes não renováveis podem ser classificadas em fósseis e nuclear, conforme demonstra a Quadro 1.

**Quadro 1:** Classificação das fontes renováveis de energia

Fontes		Energia primária	Energia secundária	
Não-renováveis	Fósseis	carvão mineral	termoeletricidade, calor, combustível para transporte	
		petróleo e derivados		
gás natural				
	Nuclear	materiais físséis	termoeletricidade, calor	
Renováveis	"Tradicionais"	biomassa primitiva: lenha de desmatamento	calor	
	"Convencionais"	potenciais hidráulicos de médio e grande porte	hidreletricidade	
		potenciais hidráulicos de pequeno porte		
	"Novas"	biomassa "moderna": lenha replantada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)	biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor	
		outros	energia solar	calor, eletricidade fotovoltaica
			geotermal	calor e eletricidade
			eólica	eletricidade
maremotriz e das ondas				

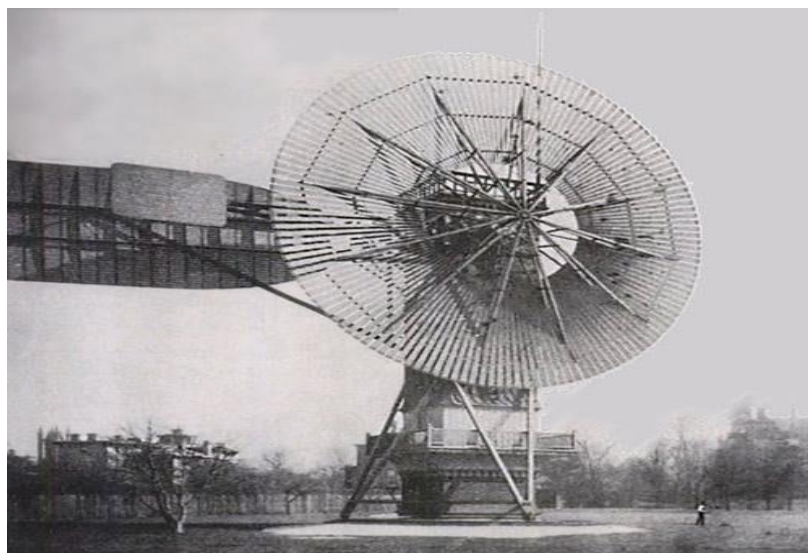
(Fonte: GOLDEMBERG e LUCON, 2007)

Goldemberg e Lucon (2007) caracterizam as fontes denominadas convencionais como aquelas disseminadas comercialmente há tempos. Já as fontes caracterizadas como novas são as que ascenderam e passaram a competir com as fontes tradicionais como, por exemplo, os painéis fotovoltaicos.

Em relação às energias renováveis, destaca-se 2017, haja vista que, comparativamente a outros períodos, esse ano foi recordista devido à redução de custos, ao aumento da capacidade dessas energias e em decorrência dos progressos em tecnologia e investimentos<sup>3</sup> (REN21, 2018, tradução nossa).

## 2.5 ENERGIA EÓLICA

A energia dos ventos tem sido utilizada pelos egípcios, há pelo menos 5000 anos, para a navegação de embarcações. Consoante Tomalsquim (2003), os primeiros sistemas utilizados na moagem de grãos, baseados na utilização da energia eólica foram construídos há algum tempo passado. Já a primeira turbina eólica, de acordo com Rosa (2015), desenvolvida unicamente com o propósito de geração de energia elétrica se deu em Cleveland, Ohio, operando entre o período de 1888 a 1900, construída pelo engenheiro Charles Brush, como ilustra a Figura 1.



**Figura 1:** Turbina eólica desenvolvida por Charles Brush

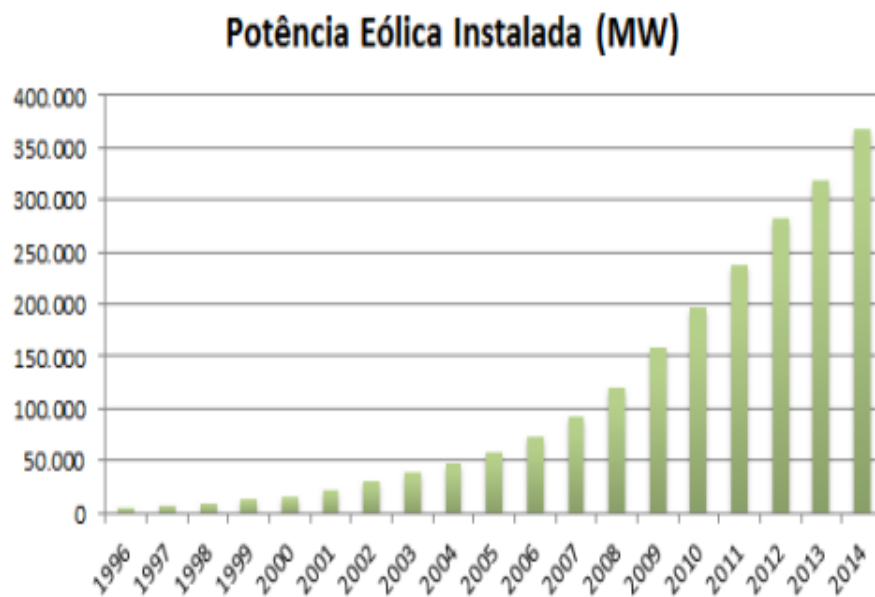
(Fonte: Adaptado de Electricite De France (EDF) - Disponível em: <<https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/une-breve-histoire-de-l-eolienne>>. Acesso em: 16 abr. 2019)

---

<sup>3</sup> The year 2017 was another record-breaking one for renewable energy, characterised by the largest ever increase in renewable power capacity, falling costs, increases in investment and advances in enabling technologies.

Devido à crise do petróleo em 1970, houve uma significativa ascensão do uso da energia eólica como estratégia viável economicamente. No contexto atual, mesmo com a consolidação do preço do petróleo, a exploração da fonte eólica de energia continua sendo eminente por se tratar de uma fonte inesgotável e sem emissões, sem deixar de se considerar os custos gradativamente menores para sua implantação (TOMALSQUIM, 2003).

O Gráfico 5 demonstra o respectivo crescimento.



**Gráfico 5:** Crescimento da potência eólica instalada no mundo

(Fonte: TOLMASQUIM, 2016)

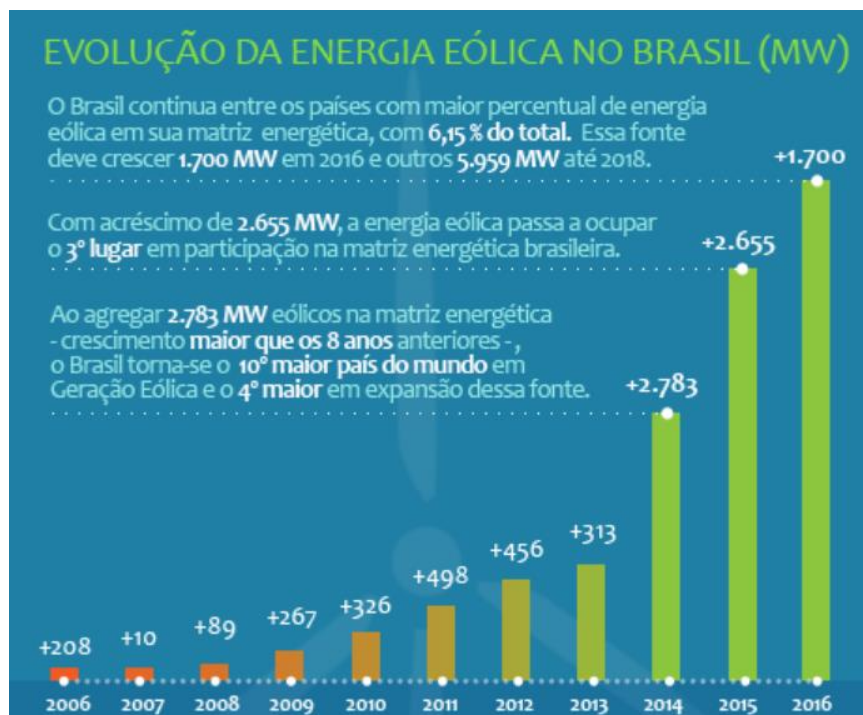
Em escala global, de acordo com Tomalsquim (2003), a energia eólica é vista, cada vez mais, como uma importante fonte de complemento de geração de energia sem agressões. Para o autor, essa modalidade tem sido difundida em larga escala entre diferentes países, de modo que turbinas com grande capacidade de geração de energia têm encontrado espaço no mercado.

Outrossim, a popularização do aproveitamento de energia eólica se dá devido a alguns fatores que a mesma proporciona, a exemplo da criação de empregos, desnecessidade de consumo de água limpa para a geração de energia, redução da poluição do ar, bem como redução de emissões (GWEC, 2016).

### 2.5.1 Energia eólica no Brasil

De acordo com Mauad, Ferreira e Trindade (2017), o uso da energia eólica, a partir da primeira turbina eólica instalada em Fernando de Noronha, tem crescido de forma significativa, no Brasil, nos últimos anos.

Com a crise energética, no ano de 2001, o incentivo governamental foi essencial para a ampliação dessa alternativa energética. De acordo com o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado pela Lei nº 10.438/2002, nesse mesmo ano, o Brasil já possuía 108 parques eólicos, totalizando 2,5GW de potencial (BRASIL, 2002). Esse aumento da produção de energia eólica no país é representado pelo Gráfico 6.



**Gráfico 6:** Ascensão da energia eólica no Brasil

(Fonte: Adaptado da ANEEL - Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aneel-essencial/asset\\_publisher/c4M6OIOMkLad/content/evolucao-da-energia-eolica-no-brasil?inheritRedirect=false](http://www.aneel.gov.br/aneel-essencial/asset_publisher/c4M6OIOMkLad/content/evolucao-da-energia-eolica-no-brasil?inheritRedirect=false)>. Acesso em: 16 abr. 2019)

Convém destacar que, no Brasil, a fonte eólica é considerada uma das mais competitivas, perdendo somente para as usinas hidrelétricas. No entanto, a falta de infraestrutura que acarreta em custos com logística, a baixa oferta de equipamentos eólicos e as restrições para importação acabam encarecendo ainda mais essa modalidade (MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017).

## 2.6 AEROGERADORES

### 2.6.1 Princípios de funcionamento

Como qualquer outro fluido em movimento, o ar possui energia passível de ser aproveitada quando em fluxo. Segundo Tolmasquim (2016), esse aproveitamento pode ser realizado através do movimento das pás de um aerogerador, captando sua energia cinética. Essa energia pode ser calculada para uma massa de ar que se desloca, em conformidade com a Equação 3:

$$E = m.V^2/2 \quad (3)$$

onde:

E: energia cinética (J)

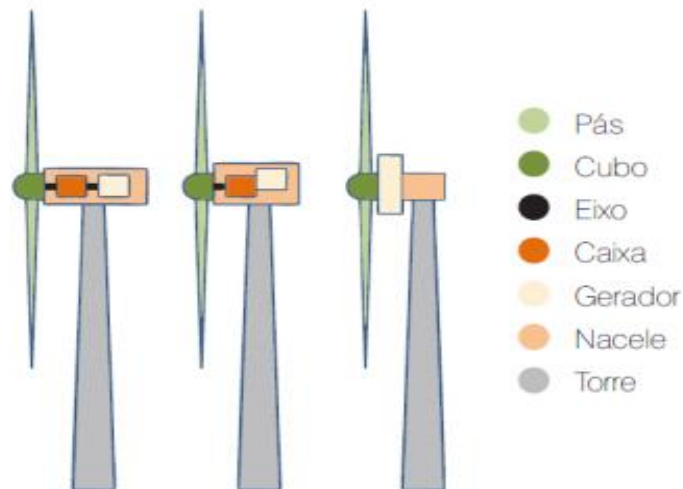
m: massa do fluxo de ar (Kg)

v: velocidade do fluxo (m/s)

Para Silva (2013 *apud* MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017), de modo geral, as turbinas eólicas são equipamentos cuja finalidade é a de extrair a energia cinética dos ventos, tendo como base as teorias correspondentes à mecânica dos fluidos e à aerodinâmica. Esse aproveitamento da energia do vento se dá por meio da passagem deste pelas pás do rotor, fazendo com que o mesmo entre em movimento rotativo devido à ação de forças aerodinâmicas. Conseqüentemente, a energia captada é transferida para o gerador por intermédio do eixo.

De forma complementar, Tolmasquim (2016) assevera que os aerogeradores possuem o rotor, o eixo e o gerador como elementos primordiais em sua composição. O rotor consiste nas pás que captam a energia do vento, conectadas ao suporte também conhecido como cubo; o eixo é o elemento responsável por realizar a transferência de energia captada pelas pás para o gerador; este último realiza a conversão de energia mecânica para energia elétrica.

A Figura 2 possibilita a visualização desse conjunto.



**Figura 2:** Principais elementos constituintes de um aerogerador de eixo horizontal

(Fonte: TOLMASQUIM, 2016)

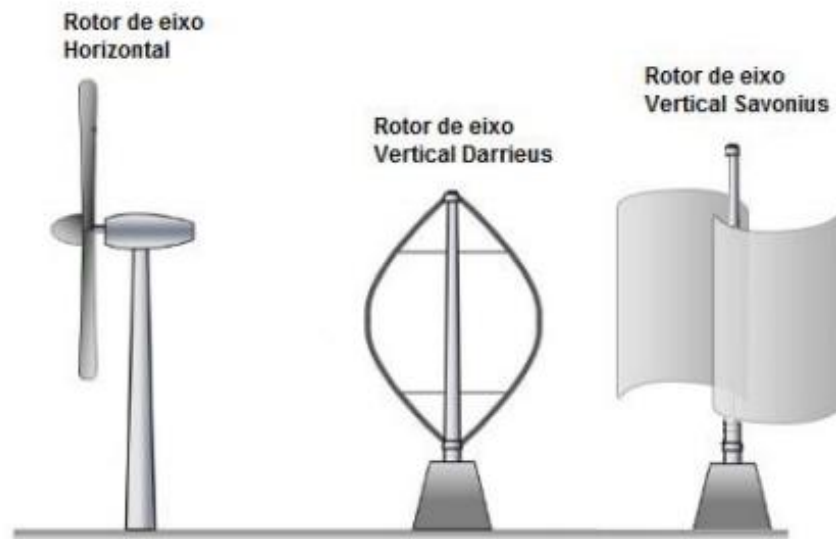
### 2.6.2 Classificação dos aerogeradores

Atualmente, existem duas classificações básicas de aerogeradores: os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Os aerogeradores de eixo horizontal devem permanecer alinhados com o vento e podem ser subdivididos em *upwind* (o vento atravessa as pás antes da torre) e *downwind* (o vento atinge a torre antes das pás), cada um com suas respectivas características de design e projeto, para a garantia de seu funcionamento (TOLMASQUIM, 2016).

Nessa perspectiva, os aerogeradores de eixo vertical possuem o eixo de rotação perpendicular à direção do vento, o que possibilita a operação mesmo com a atuação dos ventos para qualquer direção. Os aerogeradores de eixo vertical apresentam, portanto, distinta classificação, destacando-se como principais tipos de rotores utilizados o Savonius e o Darrieus. A diferença entre eles é que o primeiro utiliza o princípio das forças de arrasto, enquanto que o segundo utiliza forças de sustentação.

Para Tolmasquim (2016), o principal problema relacionado aos rotores do tipo Savonius é sua baixa eficiência, distintamente dos rotores Darrieus, para os quais o alto custo das pás é a problemática.

Os principais tipos de rotores utilizados em turbinas eólicas são ilustrados na Figura 3.



**Figura 3:** Diferentes tipos de rotores empregados em aerogeradores

(Fonte: TOLMASQUIM, 2016)

### 2.6.3 Potência extraída por um aerogerador e o limite de Lanchester-Betz

A potência que pode ser fornecida pelos ventos é proporcional à sua velocidade de escoamento, densidade (variável dada como uma função direta de temperatura e pressão) e também da dimensão das pás do aerogerador (MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017), conforme Equação 4 a qual representa o cálculo da potência disponível dos ventos.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4)$$

onde:

P: potência disponível dos ventos (W)

$\rho$ : densidade do vento ( $\text{Kg/m}^3$ )

A: área de varredura ( $\text{m}^2$ )

V: velocidade do vento (m/s)

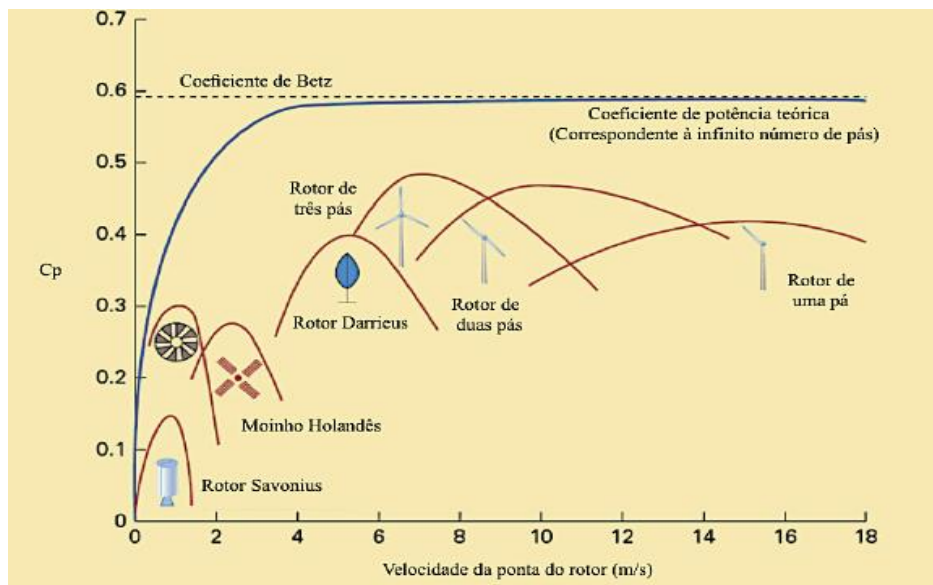
De acordo com Silva (2013 *apud* MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017), ao passar pelo rotor, o ar sofre uma desaceleração devido à perda de energia cinética, parcialmente transferida para as pás. Essa desaceleração ocorre igualmente ao ar que chega à turbina, visto

que a presença desta também faz com que a velocidade do ar seja inferior à velocidade do escoamento livre.

Diferentemente dessa constatação, Dunlap (2015 *apud* MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017) esclarece que, para que seja aproveitada toda a energia do vento, seria necessário que este parasse por completo, o que demandaria uma turbina eólica sem permissão da passagem de qualquer quantidade de ar através dela. Ainda, se a turbina reduzisse ligeiramente a velocidade do ar, a quantidade de energia elétrica passível de ser produzida seria também reduzida.

A situação intermediária entre esses dois extremos consiste no melhor caso possível, capaz de resultar em uma eficiência máxima teórica de 59,3% para turbinas eólicas, conhecida como Coeficiente de Betz. Este coeficiente assinala que a velocidade de saída do vento no rotor não deve ser menor que 1/3 da velocidade do vento incidente. Conclui-se, assim, que o rotor absorve 2/3 da energia proveniente do escoamento do vento antes do rotor (CUSTÓDIO *apud* MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017).

O Gráfico 7 apresenta os diferentes comportamentos em função da velocidade da ponta do rotor para diferentes tipos de rotores.



**Gráfico 7:** Coeficientes de potência teórica de diferentes tipos de aerogeradores em função da velocidade da ponta do rotor

(Fonte: MAUAD, FERREIRA e TRINDADE, 2017)

Nota: O coeficiente de Betz delimita os possíveis coeficientes de potência teórica em 59,3%.

Em síntese, para Tolmasquim (2003), a potência que teoricamente pode ser extraída dos ventos pela turbina pode ser dada pela Equação 5.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \eta \cdot A \cdot V_i^3 \quad (5)$$

onde:

P: potência que pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica (W)

$\rho$ : massa específica do ar (Kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>p</sub>: coeficiente de potência cujo valor máximo teórico corresponde ao limite de Betz, sendo igual a 0,593 para um número infinito de pás ou, aproximadamente, 0,15 para aerogeradores com rotor tipo Savonius

$\eta$ : eficiência de conversão eletromecânica

A: área do rotor (m<sup>2</sup>)

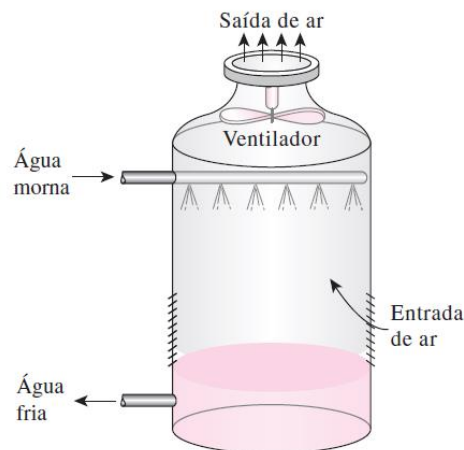
V<sub>i</sub>: velocidade frontal (m/s)

## 2.7 TORRES DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA

Conforme explicitam Çengel e Boles (2013), indústrias, usinas e sistemas de condicionamento de ar, com grandes gerações de calor, rejeitam majoritariamente a carga térmica em lagos e rios. No entanto, essa solução, muitas vezes, torna-se problemática tanto ambientalmente quanto em termos de fornecimento. Sendo assim, o calor deve ser rejeitado para a atmosfera através de dispositivos denominados torres de resfriamento.

Esses sistemas consistem em resfriadores evaporativos nos quais a água aquecida é bombeada e pulverizada no topo, descendo por gravidade e provocando a evaporação de uma pequena fração, o que promove seu resfriamento (esta evaporação provoca um aumento da temperatura e umidade do ar circundante). Consequentemente, a água perdida deve ser repostada, uma vez que a água já resfriada é direcionada ao fundo da torre e bombeada de volta ao sistema (ÇENGEL e BOLES, 2013).

A Figura 4 representa a funcionalidade de torres de resfriamento de água.



**Figura 4:** Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento

(Fonte: ÇENGEL e BOLES, 2013)

Ao se referir às torres de resfriamento de água, Creder (2004) elucida que existem três tipos principais, classificadas de acordo com a forma que o ar entra em contato com a água: a) torres atmosféricas; b) torres de corrente de ar forçado; c) torres de corrente de ar induzido, conforme Figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

Para o referido autor, as torres de resfriamento atmosféricas não possuem ventiladores, neste caso, a incidência dos ventos para o resfriamento da água é feita de forma natural. Já as torres de resfriamento de corrente de ar forçado possuem ventilador lateral na parte mais baixa da torre. Por fim, as torres de corrente de ar induzido também possuem ventilador, entretanto, este é posicionado no topo da torre, acima da posição onde a água quente é pulverizada.

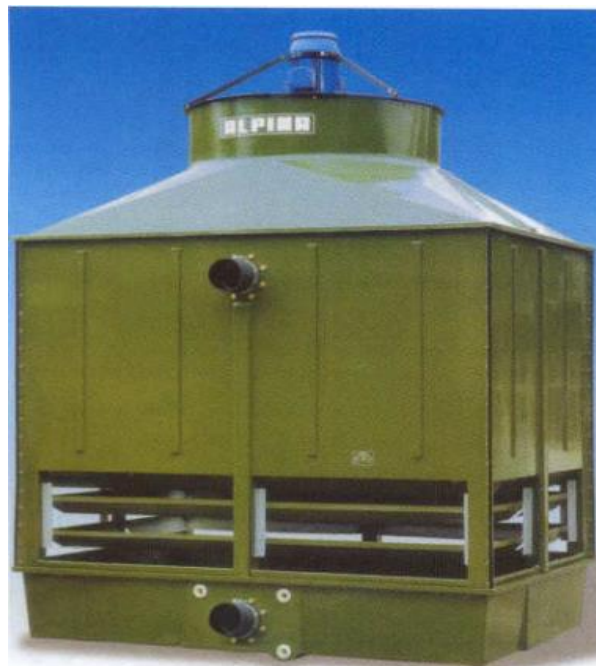


**Figura 5:** Torre de resfriamento de água atmosférica com configuração hiperbólica

(Fonte: Adaptado de PETZ, 2012 - Disponível em: <<http://www.ecology.com/2012/06/05/water-cooled-power-plants-warming-climate/>>. Acesso em: 18 abr. 2019)



**Figura 6:** Torre de resfriamento de água do tipo corrente de ar forçado  
(Fonte: Adaptado de ALPINA, 2019)



**Figura 7:** Torre de resfriamento de água do tipo corrente de ar induzido  
(Fonte: Adaptado de ALPINA, 2019)

## 2.7.1 Conceitos relevantes ao estudo de torres de resfriamento de água

### 2.7.1.1 Ar seco e a mistura de ar com vapor de água

O ar desprovido de vapor da água é denominado ar seco e contém diferentes componentes, tais como: oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, argônio, entre outros (CREDER, 2004).

Conforme especificam Çengel e Boles (2013), a composição do ar seco se mantém relativamente constante e é conveniente tratar o ar atmosférico como uma mistura de ar seco com vapor de água. Além disso, por mais pequena que seja a quantidade de vapor de água presente no ar atmosférico, a umidade é de extrema importância nas aplicações de Engenharia, haja vista que, para fins de simplificação sem grandes perdas de precisão, pode-se modelar tanto o vapor de água quanto o ar seco, presentes na atmosfera, como gases ideais<sup>4</sup>.

Por conseguinte, o ar presente na atmosfera pode ser tratado, para fins de análises, como uma mistura de gases ideais, sendo que a pressão total exercida pela mistura é dada pela somatória das pressões parciais que cada componente exerceria, caso existissem, de forma isolada, a uma mesma temperatura e volume da mistura (ÇENGEL e BOLES, 2013). Essa característica pode ser observada na Equação 6.

$$P = P_a + P_v \quad (6)$$

onde:

P: pressão atmosférica (Kpa)

P<sub>a</sub>: pressão parcial do ar seco (Kpa)

P<sub>v</sub>: pressão do vapor de água (Kpa)

### 2.7.1.2 Umidade relativa e umidade absoluta do ar

A umidade absoluta pode ser entendida como a massa de vapor de água presente em uma

---

<sup>4</sup> Um gás ideal pode ser entendido como uma substância imaginária que obedece à equação de estado do gás ideal. Muitos gases, incluindo o ar seco, podem ser tratados como gases ideais, a fim de simplificar sua análise sem grandes inconvenientes (ÇENGEL e BOLES, 2013).

determinada massa de ar seco (ÇENGEL e BOLES, 2013). Desse modo, o valor de umidade pode ser expresso pela Equação 7.

$$\omega = mv/ma \quad (7)$$

onde:

$\omega$ : umidade absoluta (kg de vapor d'água/kg de ar seco)

$mv$ : massa de vapor de água presente na mistura (kg de vapor d'água)

$ma$ : massa de ar seco presente na mistura (kg de ar seco)

Relevante considerar que, em virtude de a quantidade de vapor de água presente no ar seco ser nula, sua umidade específica equivale a zero. Ao se adicionar água a este ar, sua umidade pode aumentar até o ponto em que o próprio ar se torna saturado, isto é, incapaz de absorver mais umidade, de forma que qualquer tentativa de umidificação do mesmo pode resultar na condensação da água (ÇENGEL e BOLES, 2013).

De modo diferente, a umidade relativa expressa a relação entre a quantidade de umidade que uma determinada massa de ar tem em relação à quantidade máxima que este mesmo ar pode ter à mesma temperatura (ÇENGEL e BOLES, 2013). À vista disso, a umidade relativa pode ser definida como a relação entre a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta que este ar teria, caso estivesse saturado à mesma temperatura (CREDER, 2004). A Equação 8 apresenta o cálculo de umidade relativa do ar.

$$UR = P_v/P_g \quad (8)$$

onde:

UR: umidade relativa

$P_v$ : pressão parcial do vapor na mistura (Kpa)

$P_g$ : pressão de saturação da água na temperatura da mistura (Kpa)

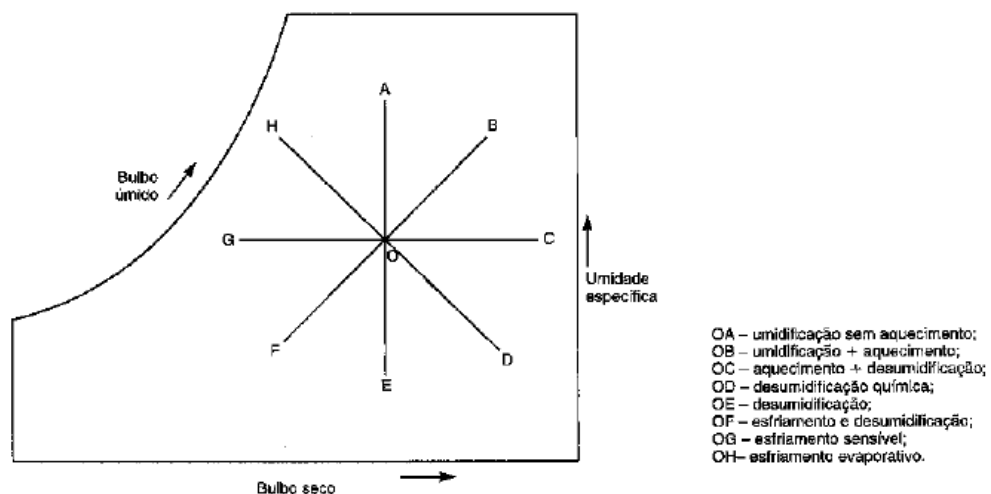
### 2.7.1.3 Ponto de orvalho

Çengel e Boles (2013) definem a temperatura do ponto de orvalho como a temperatura em que a condensação da umidade, presente no ar, dá início quando o ar é resfriado a uma pressão constante. Esse fenômeno explica a formação do orvalho em um recipiente que contém uma bebida gelada, por exemplo, em decorrência da temperatura estar abaixo do ponto de orvalho do ar.

### 2.7.1.4 Carta psicrométrica

O estado do ar atmosférico pode ser determinado a partir da combinação de duas propriedades intensivas independentes, sendo que as demais propriedades podem ser obtidas através de relações matemáticas (ÇENGEL e BOLES, 2013). Todavia, de acordo com os autores, a redução da quantidade de cálculos necessários é a motivação por trás da apresentação de tais dados (propriedades do ar úmido a um dado estado) por intermédio de diagrama psicrométrico às pressões correspondentes.

Çengel e Boles (2013) acrescentam que os recursos disponíveis em um diagrama psicrométrico são: a) temperatura de bulbo seco; b) umidade específica; c) umidade relativa; d) temperatura de bulbo úmido; e) volume específico; f) entalpia. Importante enfatizar que o diagrama psicrométrico se apresenta como um recurso valioso na visualização de processos de condicionamento de ar, tais como aquecimento ou resfriamento, conforme Figura 8.



**Figura 8:** Carta psicrométrica e a representação de processos

(Fonte: CREDER, 2004)

### 2.7.1.5 Vazão volumétrica

O volume de fluido que atravessa uma determinada secção por unidade de tempo é denominado vazão, expresso em metros cúbicos por segundo. Quando a velocidade de escoamento não varia, o movimento permanente é dito uniforme (NETTO *et al.*, 1998). O valor de vazão volumétrica pode ser expresso pela Equação 9.

$$Q_v = V \cdot A \quad (9)$$

onde:

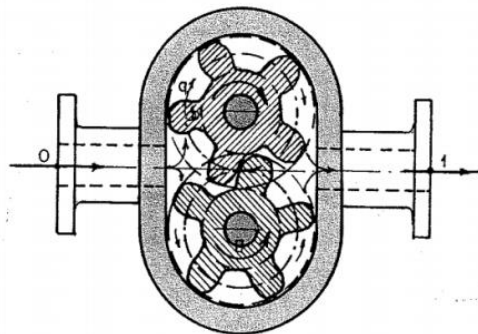
$Q_v$ : vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s)

$V$ : velocidade média na secção (m/s)

$A$ : área da secção de escoamento (m<sup>2</sup>)

### 2.7.1.6 Bombas hidráulicas

De acordo com Macintyre (1997), bombas são máquinas geratrizes que têm a finalidade de possibilitar o deslocamento de um líquido por escoamento, transformando o trabalho mecânico, recebido em energia, em líquido na forma de energia de pressão e cinética. Para o referido autor, a maneira como o trabalho mecânico é transformado em energia ao líquido permite a classificação das máquinas em bombas de deslocamento positivo, dinâmicas e especiais. A Figura 9 ilustra devidamente o sistema de funcionamento de uma bomba de engrenagens.



**Figura 9:** Esquema de funcionamento de uma bomba de engrenagens

(Fonte: MACINTYRE, 1997)

### 3 METODOLOGIA

O método adotado na pesquisa constituiu-se de um conjunto de atividades/ações sistemáticas e racionais que possibilitaram o alcance dos objetivos, determinando o caminho a ser seguido (MARCONI e LAKATOS, 2003). Sob essa lógica, para o desenvolvimento da presente pesquisa, foi traçada uma sequência lógica de ações as quais permitiram a determinação do potencial de geração de energia eólica através da exaustão de uma torre de resfriamento de água, marca KÖRPER, série R, modelo 180/9, mediante aerogerador com rotor tipo Savonius.

É pertinente ressaltar que o estudo tem caráter de pesquisa de campo pois, segundo Marconi e Lakatos (2003), esse tipo de pesquisa se fundamenta na coleta de dados acerca de um determinado tema, bem como na observação dos fatos e registro de variáveis importantes. Ainda de acordo com os autores, a pesquisa tem abordagem qualitativa por concentrar seu enfoque na análise dos fenômenos ou isolamento de variáveis significativas. Desse modo, associou-se à pesquisa de campo a bibliográfica, por se considerar que a respectiva análise deveria ser feita à luz do marco teórico de referência.

Para tanto, a seleção de autores e pesquisadores da área foi basilar para o embasamento teórico, assim como a concretização dos cálculos escolhidos pela referência que representam em seus respectivos campos de atuação.

Ademais, a coleta de dados para a obtenção de resultados e a tirada de conclusões foi conduzida no mês de setembro de 2019, no turno da tarde. Destaca-se que essa escolha, assim como a conduta de medição, se deu pela disponibilidade de tempo e conveniência.

#### 3.1 INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO ADOTADO

Com o objetivo de tomar conhecimento das informações de relevância ao presente estudo, fez-se uso de termo-higro-anemômetro, no intuito deste possibilitar a determinação das condições ambientes no momento das medições. Posteriormente, o mesmo equipamento foi aplicado para a determinação da velocidade, como também da umidade relativa e temperatura do ar de saída da torre de resfriamento em questão (valores médios). Conhecidas as variáveis, a aplicação das equações selecionadas no marco teórico de referência tornou-se extremamente válida.

O instrumento denominado termo-higro-anemômetro é ilustrado na Figura 10.



**Figura 10:** Termo-higro-anemômetro utilizado para as medições

(Fonte: O autor, 2019)

### 3.1.1 Características fundamentais do equipamento empregado

Para o presente estudo, fez-se uso, especificamente do termo-higro-anemômetro, modelo 113, fabricado pela Homis do Brasil Equipamentos Industriais Ltda (2019). Salienta-se que tal instrumento possui flexibilidade dimensional para todas as variáveis passíveis de serem estudadas, a exemplo de velocidade, umidade relativa e temperatura, contanto que a escolha referente à unidade da variável analisada seja possível.

O Quadro 2 permite a visualização das diferentes unidades contempladas pelo equipamento, bem como as selecionadas para a pesquisa conduzida. Destarte, destaca-se que todo dimensionamento do trabalho deve estar embasado no Sistema Internacional de Unidades (SI).

**Quadro 2:** Unidades de operação do termo-higro-anemômetro utilizado e unidades selecionadas para o estudo

<b>UNIDADES DISPONÍVEIS E SELECIONADAS</b>		
<b>VARIÁVEL</b>	<b>UNIDADES DISPONÍVEIS</b>	<b>UNIDADES SELECIONADAS</b>
VELOCIDADE	m/s: metros/segundo	Metros/segundo (m/s)
	Km/h: quilômetros/hora	
	Ft/min: pés/minuto	
	Knots: milhas náuticas/h	
	Mile/h: milhas/h	
TEMPERATURA	°C: graus Celcius	Graus Celcius (°C)
	°F: graus Fahrenheit	
UMIDADE RELATIVA	-	-

(Fonte: HOMIS, 2019)

Os Quadros 3 e 4 apresentam as resoluções e as escalas do aparelho utilizado, bem como sua precisão para as três variáveis estudadas na pesquisa, em conformidade com o manual de fabricante. Relevante destaca-se que o equipamento foi calibrado para as medições em 20 de maio de 2019.

**Quadro 3:** Informações referentes à leitura de velocidade e temperatura

<b>ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS DO ANEMÔMETRO (23 ± 5°C)</b>			
Medição	Escala	Resolução	Precisão
M/s	0.4 – 25.0 m/s	0.1 m/s	± 2% + 2 d
Km/h	1.4 – 90.0 km/h	0.1 km/h	
Mile/h	0.9 – 55.9 mile/h	0.1 mile/h	
Knots	0.8 – 48.6 knots	0.1 knots	
Ft/min	80 – 4930 ft/min	1 ft/min	± 2% + 20 ft/min
Temperatura (°C)	0°C – 50°C	0.1 °C	0.8 °C
Temperatura (°F)	32°F – 122°F	0.1 °F	1.5 °F
Nota: M/s: metros por segundo Ft/min: pés por minuto Mile/h: milhas por hora Km/h: quilômetros por hora Knots: milhas náuticas por hora (nó internacional)			

(Fonte: HOMIS, 2019)

**Quadro 4:** Informações referentes à leitura de umidade relativa e temperatura

<b>ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS PARA MEDIDOR DE UMIDADE</b>		
Escala	Umidade Temperatura	10 a 95 U.R. 0 a 50°C/ 32 a 122°F
Resolução	Umidade Temperatura	0.1% U.R. 0.1°C/ 0.1°F
Precisão 23 ± 5°C	Umidade: ≥ 70% U.R.: ± 3% de leitura + 1% de U.R. < 70% U.R.: ± 3% U.R. *Após a calibração	
	Temperatura: °C: ± 0.8°C °F: ± 1.5°F	
Observações: As precisões acima referem-se à leitura do display. As especificações são testadas somente em ambientes com campo RF menor do que 3V/M e frequência menor do que 30MHz.		

(Fonte: HOMIS, 2019)

### 3.2 DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE EXAUSTÃO DO FLUXO DE AR DA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA

A determinação da área pela qual o fluxo de exaustão é despejado para a atmosfera constitui, neste estudo, um fator imprescindível, para que se possa obter a vazão volumétrica posteriormente. Esse processo foi realizado através da verificação inicial do diâmetro do bocal de saída da torre em questão, sendo que tal dimensão pode ser definida pela consulta em catálogo do fabricante da torre de resfriamento de água utilizada para as medições.

Determinado o diâmetro por onde a exaustão deve ser canalizada à atmosfera, o cálculo referente à área, uma vez conhecida tal dimensão, tornou-se necessário e possível.

Ressalta-se que a Equação 10 possibilita a obtenção da respectiva variável.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (10)$$

onde:

A: área (m<sup>2</sup>)

D: diâmetro (m)

É importante salientar que a área utilizada como base para os cálculos da máxima potência teórica passível de aproveitamento, por aerogerador com rotor tipo Savonius, consistiu na área de varredura do rotor, conforme especificado pela Equação 4. Essa variável foi obtida em função da geometria do rotor, fator este vinculado às dimensões do bocal de exaustão da torre. Conhecidas as áreas (de exaustão do bocal da torre e de varredura do rotor), diferentes valores de vazão foram obtidos para fins comparativos.

### 3.3 CONSTATAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO DA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA

Para a efetivação das análises, primeiramente, foi necessário tomar conhecimento da capacidade de trabalho da torre de resfriamento de água durante as medições, pois diferentes valores de dados poderiam ser obtidos para diferentes condições de trabalho.

Nesse sentido, para a torre de resfriamento de água, utilizada como base durante as medições realizadas, verificou-se que a mesma trabalha em regime intermitente, dependendo diretamente das necessidades do processo produtivo no qual está atrelada.

Destarte, é pertinente ressaltar que, durante seu funcionamento, as condições são constantes, de forma que a potência produzida pelo motor de acionamento do ventilador não é variável. Com isso, foi possível assegurar a uniformidade para a obtenção dos dados relevantes, bem como a coerência lógica na assunção de seu funcionamento como contínuo. Nesse sentido, todas as medições necessárias, bem como os cálculos realizados foram sustentados em tais condições operacionais, para que não ocorressem imprecisões devido às flutuações de funcionamento.

### 3.4 DEFINIÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO NA TORRE DE RESFRIAMENTO DE ÁGUA E A QUANTIDADE DE MEDIÇÕES

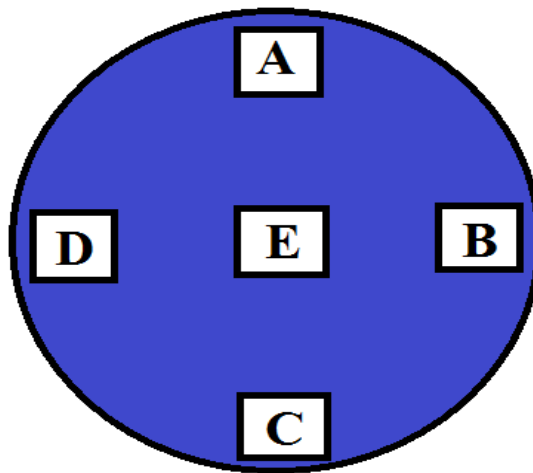
Para o conhecimento dos valores médios de velocidade, temperatura e umidade relativa na exaustão da torre de resfriamento de água, tornou-se imprescindível a definição dos pontos no bocal da torre no qual as medições foram conduzidas por meio do uso do termo-higroanemômetro. De modo igual, o número de medições foi definido previamente.

Tomando a disponibilidade de tempo e a conveniência no procedimento de medição como aliados para a definição dos pontos e o número de medições a serem realizados, foram

conduzidas quatro medições em cinco pontos diferentes da torre de resfriamento de água, com o propósito de se obter, em um primeiro momento, diferentes leituras para cada variável e, posteriormente, a determinação dos valores médios.

Destaca-se que a definição de um número diferente de pontos ou medições implica diretamente na precisão do resultado final, de forma que, quanto maior o número de pontos adotados e medições conduzidas, maior é a confiabilidade do resultado final.

A Figura 11, em conjunto com o Quadro 5, demonstram as posições de cada ponto de medição selecionado em relação à torre de resfriamento e às coordenadas cardeais. Em cada um dos pontos de medição, quatro valores distintos para cada variável de medida foram obtidos, ou seja, um para cada procedimento de medição.



**Figura 11:** Pontos de medição adotados

(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

**Quadro 5:** Orientação de cada ponto

PONTO	ORIENTAÇÃO
A	Noroeste
B	Nordeste
C	Sudeste
D	Sudoeste
E	-

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

Nota: as orientações foram retiradas através da ferramenta Google Earth®.

Conhecidos os pontos nos quais as leituras de velocidade, de temperatura e de umidade relativa seriam obtidas para cada medição, foi possível a determinação dessas variáveis com o

uso do termo-higro-anemômetro. Conveniente destacar que o procedimento de medição foi realizado em ordem alfabética conforme a disposição dos pontos ilustrados pela Figura 11.

### 3.5 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE VAZÃO DO AR

A determinação do potencial eólico do fluxo de exaustão é dependente da medição da velocidade deste fluxo, visto que, consoante Beer, Johnston Júnior e Cornwell (2012), a energia cinética representa a capacidade de realizar trabalho associada à velocidade.

Destarte, para que seja possível a verificação dessa variável, realizou-se a medição na exaustão da torre em questão com o uso de termo-higro-anemômetro. Importante considerar que tal mensuração foi conduzida sob condições de trabalho previamente estabelecidas, sendo que, como já mencionado, quatro medições foram realizadas em cinco pontos diferentes na saída da torre, o que possibilitou a determinação da velocidade média de exaustão. Uma vez determinada a velocidade proveniente dos testes realizados em conjunto com a área, foi possível o cálculo da vazão volumétrica.

### 3.6 CÁLCULO DA VAZÃO VOLUMÉTRICA DE AR

Conhecida a área de exaustão do ar na torre de resfriamento de água, como também a velocidade média do fluxo, foi feito o cálculo referente à vazão volumétrica de ar úmido, despejado pela torre à atmosfera. Tal variável foi determinada pela Equação 9.

$$Qv = V.A \quad (9)$$

Outrossim, pôde-se identificar o volume de mistura entre ar e água, ejetado pela torre, passível de aproveitamento eólico mediante aplicação de aerogerador. Desse modo, dois valores de vazão foram obtidos, sendo um referente à área total de exaustão e outro relacionado à área de varredura do rotor, variável esta determinada em função das dimensões do bocal da torre. Assim sendo, uma análise referente à importância da vazão volumétrica para o potencial de geração de energia pôde ser conduzida, o que contribuiu para a tomada de conclusões.

### 3.7 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR NA SAÍDA DA TORRE

A determinação da temperatura e da umidade relativa do ar na exaustão da torre de resfriamento de água é essencial. Isso porque, conhecidas as variáveis, foi possível definir a densidade do ar despejado pela torre mediante utilização da carta psicrométrica. Logo, a vantagem de se conhecer tal variável no fluxo de exaustão da torre é notável, uma vez que este parâmetro é imprescindível para o cálculo da potência eólica passível de aproveitamento.

Para a verificação de tais grandezas, o termo-higro-anemômetro, dispositivo capaz de apresentar leituras tanto de velocidade quanto de temperatura e umidade relativa, é fundamental. Na sequência, após a medição, utilizou-se o software GRAPSI 5.1, para determinação do estado da mistura ar e vapor de água de exaustão, baseado nas leituras de temperatura e umidade relativa média. Por meio dessa condição, foi possível avaliar o volume específico do fluxo e, por extensão, a sua densidade.

Por fim, a conduta às medições para tais variáveis foi a mesma que a adotada para a velocidade, conforme explicitado no item 3.4, ou seja, quatro medições distintas em cinco pontos diferentes na exaustão da torre de resfriamento de água, determinando, assim, os valores médios.

### 3.8 CÁLCULO DA MÁXIMA POTÊNCIA PASSÍVEL DE APROVEITAMENTO

A determinação da máxima potência, que pode ser extraída do ar na exaustão da torre de resfriamento de água, alicerçou a pesquisa, visto que esse dado viabiliza a aplicabilidade do sistema a nível técnico e favorece o aproveitamento.

Para a obtenção de conhecimento de tal variável, há necessidade da realização de análises prévias, conforme se abordou nos itens 3.2, 3.5 e 3.7 por meio da aplicação da Equação 4.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4)$$

Todavia, conforme se esclareceu no item 2.6.3, a máxima potência, extraída de uma turbina eólica, é limitada pelo Coeficiente de Lanchester-Betz o qual corresponde a 59,3% do valor calculado pela Equação 4 para um número infinito de pás. Contudo, para aerogeradores

com rotor tipo Savonius, esse valor é ainda mais limitado, conforme se observou no Gráfico 7, correspondendo a aproximadamente 15% do valor calculado pela Equação 4.

Em decorrência disso, é vital a realização da multiplicação do valor obtido através dessa mesma Equação pela constante equivalente ao limite de Lanchester-Betz para aerogeradores com rotor tipo Savonius. Desse modo, obtém-se a maior potência que teoricamente pode ser extraída pela máquina eólica cuja área do rotor condiz com a área correspondente às dimensões de suas pás. Diante disso, a avaliação quanto à viabilidade técnica de aplicação de aerogerador com rotor tipo Savonius em torres de resfriamento de água tornou-se possível para, neste estudo, ser devidamente analisada.

### 3.9 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DO SISTEMA

Conhecida a máxima potência que pode ser extraída do fluxo de ar na exaustão da torre de resfriamento de água via aerogerador com rotor tipo Savonius, a condição tornou-se favorável à análise no que tange ao potencial de geração de energia desses aerogeradores em torres de tal natureza, à luz da potência produzida e à sua viabilidade a nível técnico.

Como critério avaliativo para essa viabilidade, adotou-se a seguinte premissa: caso a energia que pode ser gerada na exaustão da torre de resfriamento de água fosse passível de aproveitamento, o sistema seria tomado como viável a nível técnico. Entretanto, caso a máxima potência a ser produzida pela exaustão do ar não fosse aproveitável, o sistema seria entendido como inviável tecnicamente.

Infere-se, após a avaliação, que há possibilidade de análise tanto da máxima potência, que pode ser teoricamente extraída do fluxo de exaustão, como também da viabilidade de implantação de aerogeradores com rotor tipo Savonius em torres de resfriamento de água em seu viés técnico, assegurando, assim, um exame mais apurado e conclusões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DADOS COLETADOS

Conforme exposto no item 2.7, as torres de resfriamento de água consistem em resfriadores evaporativos cujo objetivo é o resfriamento da água. Mediante a pesquisa de campo, os dados necessários para a realização dos cálculos, conforme estipulados pela lógica metodológica da pesquisa, foram obtidos.

Relevante considerar, uma vez mais, que todas as informações e dados necessários para o desenvolvimento da pesquisa foram coletados na empresa “XYZ” localizada em Cascavel-PR, mediante as medições realizadas na torre de resfriamento modelo 180/9, série R, marca KÖRPER, conforme ilustra a Figura 12.



**Figura 12:** Torre de resfriamento de água na qual as medições foram conduzidas

(Fonte: O autor, 2019)

#### 4.1.1 Condições ambientes no momento das medições

Conforme já se mencionou, a coleta de dados ocorreu no mês de setembro de 2019, mais especificamente no dia 06, entre as 16h 17min e 17h 15min (horário de Brasília). Para a data e horário em questão, as condições ambientes se encontravam conforme descrito no Quadro 6.

**Quadro 6:** Condições ambientes no momento das medições

CONDIÇÕES AMBIENTES DURANTE AS MEDIÇÕES			
DATA	HORA	TEMPERATURA	UMIDADE RELATIVA
06/09/2019	16h 17min às 17h 15min	24,1°C	53,2%

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

#### 4.1.2 Determinação do diâmetro do bocal de exaustão da torre de resfriamento de água

Para a correta determinação do diâmetro do bocal de exaustão da torre de resfriamento de água na qual os testes foram conduzidos, consultou-se o catálogo do fabricante de forma a garantir assertividade nos dados utilizados, minimizando possíveis interpretações errôneas e/ou utilização inadequada de instrumentos de medição.

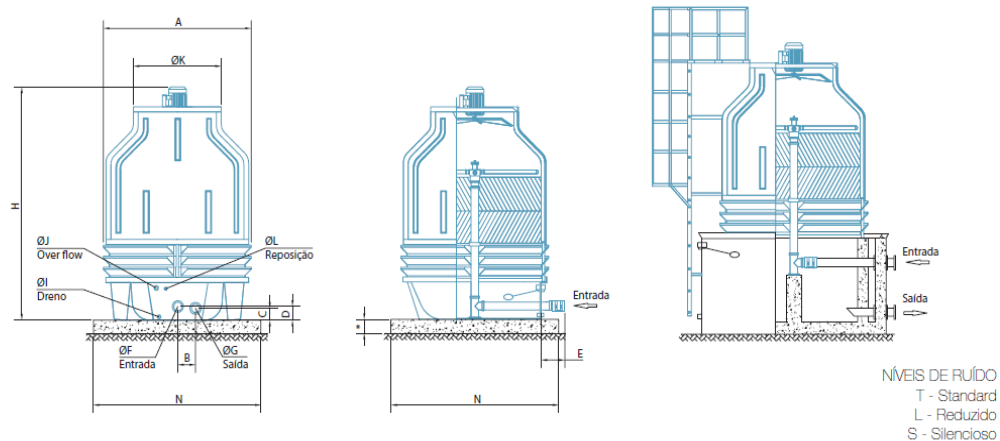
Acrescenta-se que, para a determinação do diâmetro do bocal de exaustão, foi imprescindível a identificação da torre em questão através de sua plaqueta de identificação, conforme ilustrada pela Figura 13.



**Figura 13:** Plaqueta de identificação da torre de resfriamento de água

(Fonte: O autor, 2019)

Conhecida, então, a série, o modelo e o fabricante da torre em que as medições foram realizadas, sua correta identificação em catálogo tornou-se possível, haja vista que, por intermédio desta, constatou-se que a torre utilizada possui um diâmetro de exaustão de ar igual a 820 milímetros, de acordo com a Figura 14.



Modelo	Dimensões principais (mm)						Conexões hidráulicas					Conjunto ventilador						Pressão na entrada (mCA)	Base assentamento (mm)		Peso (kg)	
	ØA	H	B	C	D	E	ØF	ØG	ØI	ØJ	ØL	ØK	Potência (cv)	Pólos	Potência (cv)	Pólos	Potência (cv)		Pólos	N	Embarque	Operação
70/6	1.270	1.880	130	70	100	50	2"	2 1/2"	1"	1 1/4"	3/4"	540	0,5	4	-	-	0,5	6	2,0	1.370	70	187
70/9	1.270	2.180	130	70	100	50	2"	2 1/2"	1"	1 1/4"	3/4"	540	0,5	4	-	-	0,5	6	2,0	1.370	86	205
110/6	1.440	1.900	130	110	100	50	2"	2 1/2"	1"	1 1/4"	3/4"	670	-	-	0,5	6	0,5	8	2,0	1.540	98	280
110/9	1.440	2.200	130	110	100	50	2"	2 1/2"	1"	1 1/4"	3/4"	670	-	-	0,5	6	0,5	8	2,0	1.540	112	296
180/6	1.780	2.000	130	75	100	50	2 1/2"	3"	1"	1 1/4"	3/4"	820	0,75	6	0,75	8	0,5	8	2,5	1.880	143	406
180/9	1.780	2.300	130	75	100	50	2 1/2"	3"	1"	1 1/4"	3/4"	820	0,75	6	0,75	8	0,5	8	2,5	1.880	159	424

**Figura 14:** Principais dimensões da torre de resfriamento de água segundo catálogo do fabricante

(Fonte: adaptado de KORPER, 2019)

#### 4.1.3 Condições de trabalho da torre de resfriamento de água durante as medições

Conforme abordado no item 3.3, diferentes condições de operação da torre podem produzir resultados divergentes. Diante disso, é preciso tomar conhecimento das características de trabalho da torre de resfriamento de água antes do momento das medições realizadas.

Ainda de acordo com o que se expôs no item 3.3, o regime de trabalho da torre de resfriamento de água selecionada para o estudo se caracteriza como intermitente, devido às necessidades do processo produtivo. No entanto, durante seu acionamento, as condições de operação são constantes. Dessa forma, a atribuição do funcionamento da torre de modo contínuo se justifica, atrelada à proposta da pesquisa, em virtude da máxima potência passível de ser extraída do fluxo de saída da torre.

A tomada do funcionamento da torre, constante para a realização dos cálculos, foi vista, diante do tempo para a realização das medições, como fator limitante, visto que as mensurações necessárias à obtenção de resultados, com precisão aceitável, tendo em vista o funcionamento como intermitente, poderiam ir além do cronograma estabelecido para a realização da pesquisa. Apesar desse fator, depreende-se que os resultados obtidos nas medições, em conjunto com a assunção do funcionamento da torre, como contínuo, produziram resultados consistentes e compatíveis com o estudo realizado.

A Figura 14 exhibe as características relevantes às condições de trabalho da torre, a exemplo da potência do motor de acionamento do ventilador de exaustão da torre. Destaca-se ainda que não foi possível a identificação deste, durante as medições, devido à deterioração de sua plaqueta de identificação, conforme ilustrado pela Figura 15, indicando, assim, que a assunção do motor do equipamento é o mesmo que o indicado em catálogo.



**Figura 15:** Deterioração da plaqueta de identificação do motor da torre

(Fonte: O autor, 2019)

#### 4.1.4 Determinação da velocidade média de exaustão

Para o conhecimento da velocidade média de exaustão do ar pela torre de resfriamento, estipulou-se, conforme exemplificado pelo item 3.4, a realização de quatro medições distintas em cinco pontos diferentes no bocal de saída de ar da torre, por fins de conveniência e disponibilidade de tempo.

Logo, adotado o procedimento metodológico abordado no item 3.4, foi possível a determinação dos diferentes valores de velocidade através da utilização do termo-higro-anemômetro e seu valor médio, conforme apresentado pelo Quadro 7.

**Quadro 7:** Leituras de velocidade obtidas e valores médios

<b>TESTES PARA AVALIAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE SAÍDA</b>		
<b>TESTE</b>	<b>PONTO DE MEDIÇÃO</b>	<b>VELOCIDADE DO AR DE SAÍDA (m/s)</b>
TESTE 1	A	14,4
	B	12,6
	C	12,5
	D	15,6
	E	1,1
	<b>MÉDIA TESTE 1</b>	<b>11,24</b>
TESTE 2	A	12,1
	B	12,5
	C	12,5
	D	17,4
	E	1,2
	<b>MÉDIA TESTE 2</b>	<b>11,14</b>
TESTE 3	A	14,1
	B	14,5
	C	14,5
	D	15
	E	1,4
	<b>MÉDIA TESTE 3</b>	<b>11,9</b>
TESTE 4	A	13,5
	B	12,3
	C	12,8
	D	14,8
	E	1,1
	<b>MÉDIA TESTE 4</b>	<b>10,9</b>
<b>MÉDIAS FINAIS</b>		<b>V<sub>m</sub> = 11,29m/s</b>
Nota: as medições foram realizadas dia 06/09/19, às 16:17. As condições ambientes eram de 24,1°C e UR de 53,2%. Destaca-se ainda que, os valores de velocidade obtidos no ponto “E” de medição, são inferiores à média esperada devido a sua localização logo acima do motor de acionamento do ventilador, ocasionando bloqueio no fluxo de ar.		

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

#### 4.1.5 Determinação da temperatura média de exaustão

As medições de temperatura nos diferentes pontos de exaustão da torre de resfriamento de água foram sustentadas, conforme o procedimento metodológico abordado no item 3.4, de

forma análoga à velocidade. Ainda, os pontos adotados para as medições se encontram ilustrados pela Figura 11 e orientados segundo o Quadro 5. Assim sendo, quatro valores distintos de temperatura de exaustão foram obtidos para cada ponto com a utilização do termo-higro-anemômetro, o que possibilitou a determinação de seu valor médio, conforme Quadro 8.

**Quadro 8:** Leituras de temperatura obtidas e valores médios

<b>TESTES PARA AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DE SAÍDA</b>		
<b>TESTE</b>	<b>PONTO DE MEDIÇÃO</b>	<b>TEMPERATURA (°C)</b>
TESTE 1	A	21,5
	B	21,6
	C	21,5
	D	20,7
	E	20,8
	<b>MÉDIA TESTE 1</b>	<b>21,22</b>
TESTE 2	A	21,1
	B	21,1
	C	21
	D	20,4
	E	20,9
	<b>MÉDIA TESTE 2</b>	<b>20,9</b>
TESTE 3	A	21,1
	B	21,1
	C	21
	D	21,4
	E	20,5
	<b>MÉDIA TESTE 3</b>	<b>21,02</b>
TESTE 4	A	21
	B	21,3
	C	21,3
	D	21,1
	E	21
	<b>MÉDIA TESTE 4</b>	<b>21,14</b>
<b>MÉDIAS FINAIS</b>		<b>T<sub>m</sub> = 21,07°C</b>
Nota: As medições foram realizadas dia 06 de setembro de 2019, às 16h 17min. As condições ambientes eram de 24,1°C e UR de 53,2%.		

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

Ressalta-se ainda que, assim como nas medições de velocidade, a ordem das mensurações de temperatura se deu de forma alfabética, de acordo com a orientação dos pontos. Ademais, tanto os dados de velocidade quanto de temperatura foram obtidos de forma simultânea, por meio da correta configuração do equipamento empregado.

#### 4.1.6 Determinação da umidade relativa média de exaustão

Do mesmo modo que as informações de velocidade e temperatura, o conhecimento dos dados de umidade relativa foi obtido de acordo com os procedimentos metodológicos adotados, de forma que os pontos empregados para a realização das medições fossem os mesmos conforme ilustrados pela Figura 11 e orientados pelo Quadro 5 para as quatro mensurações conduzidas. Com isso, os percentuais de umidade relativa para cada medição e seu valor médio foram obtidos em conformidade com o exposto no Quadro 9.

**Quadro 9:** Leituras de umidade relativa obtidas e valores médios

<b>TESTE PARA AVALIAÇÃO DA UMIDADE RELATIVA MÉDIA DE SAÍDA</b>		
<b>TESTE</b>	<b>PONTO DE MEDIÇÃO</b>	<b>UR DE SAÍDA (%)</b>
TESTE 1	A	100
	B	100
	C	100
	D	100
	E	100
	<b>MÉDIA TESTE 1</b>	<b>100%</b>
TESTE 2	A	97,3
	B	98,3
	C	100
	D	100
	E	100
	<b>MÉDIA TESTE 2</b>	<b>99,12%</b>
TESTE 3	A	100
	B	100
	C	100
	D	100
	E	100
	<b>MÉDIA TESTE 3</b>	<b>100%</b>
TESTE 4	A	100
	B	100
	C	100
	D	100
	E	100
	<b>MÉDIA TESTE 4</b>	<b>100%</b>
<b>MÉDIA FINAL</b>		<b>URm = 99,78%</b>
Nota: As medições foram realizadas dia 06 de setembro de 2019, às 17h 15min. As condições ambientes eram de 24,1°C e UR de 53,2%.		

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

Vale ainda destacar que o procedimento adotado para as demais variáveis (velocidade e temperatura) foi mantido para a umidade relativa, ou seja, ordenação alfabética de medição, conforme a disposição dos pontos e configuração correta do equipamento para leitura precisa em concordância com a unidade selecionada.

Conveniente salientar também que a presença de gotículas de água no ar de exaustão conferia a este, quase sempre, o estado de saturação em sua saída.

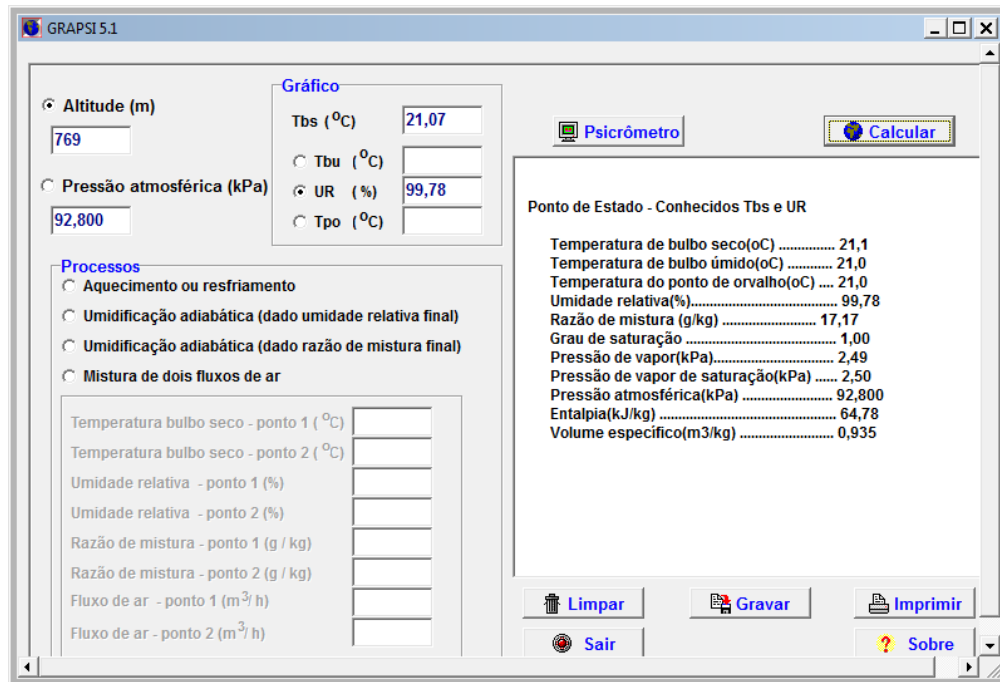
#### 4.1.7 Determinação da densidade média do ar no fluxo de exaustão

Para o conhecimento da densidade do fluxo de ar de exaustão pela torre de resfriamento, é necessário, como se abordou no item 3.7, a consulta à carta psicrométrica, utilizando como dados de entrada as leituras de temperatura e umidade relativa média, obtidas de acordo com dados expostos nos Quadros 8 e 9.

Objetivando a redução de possíveis leituras errôneas, a verificação dos parâmetros psicrométricos foi realizada pelo software GRAPSI 5.1, desenvolvido pelo Prof. Evandro de Castro Melo, em conjunto com a Dra. Daniela de Carvalho Lopes. Dessa forma, pôde-se assegurar que o fator humano referente à interpretação e à leitura gráfica não constituiu um fator limitante.

Além dos valores médios de temperatura e umidade relativa obtidos, utilizou-se, igualmente, como dado de entrada, a altitude média relacionada à cidade de Cascavel-PR, desprezando-se a variação de altitude referente à altura da torre em relação ao solo.

A Figura 16 apresenta as informações obtidas por intermédio do uso do software e destaca que o valor de altitude média adotado foi de 769m, segundo dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2011.



**Figura 16:** Parâmetros psicrométricos obtidos através do software GRAPSI 5.1

(Fonte: O autor, 2019)

Conforme exposto pela Figura 16, o volume específico do ar de exaustão da torre de resfriamento de água, no momento das medições, apresenta um valor médio de  $0,935 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Logo, sua densidade pode ser determinada através do inverso do valor de volume específico, obtido através do software, visto que volume específico e densidade são grandezas inversas.

$$\rho = \frac{1}{v}$$

onde:

$\rho$ : massa específica do ar ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$v$ : volume específico ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

Logo, tem-se:

$$\rho = \frac{1}{0,935 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$\rho = 1,069 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

## 4.2 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS FUNDAMENTAIS

### 4.2.1 Cálculo da área total de exaustão da torre de resfriamento de água

Conhecido o diâmetro da secção circular de exaustão da torre de resfriamento de água, é possível, através de tal dimensão obtida via catálogo, a determinação da área total de exaustão, mediante aplicação da Equação 10.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (10)$$

onde:

A: área (m<sup>2</sup>)

D: diâmetro (m)

Logo, tem-se:

$$A = \frac{\pi \cdot (0,82m)^2}{4}$$

$$A = 0,528m^2$$

Não obstante, é importante enfatizar que a área utilizada como base para a realização do cálculo da potência disponível dos ventos, passível de aproveitamento por aerogerador com rotor tipo Savonius, é a área de varredura do rotor, conforme calculada pelo item 4.3.1. Dessa forma, a área total de exaustão é aplicada exclusivamente para a determinação da máxima vazão, obtida para a torre em questão, dado este utilizado para análises comparativas posteriormente.

#### 4.2.2 Cálculo da máxima vazão volumétrica de ar

A vazão volumétrica de ar, conforme exemplificado pelo item 3.6, pode ser obtida mediante a aplicação da Equação 9, que consiste na multiplicação da velocidade média de exaustão do ar da torre de resfriamento por sua respectiva área de secção transversal, conforme determinada pelo item 4.2.1.

$$Qv = V.A \quad (9)$$

onde:

$Qv$ : vazão volumétrica ( $m^3/s$ )

$V$ : velocidade média na secção ( $m/s$ )

$A$ : área da secção de escoamento ( $m^2$ )

Com isso, obtém-se:

$$Qv = \frac{11,29m}{s} \cdot 0,528m^2$$

$$Qv = 5,961m^3/s$$

Vale a ressalva de que o valor de vazão volumétrica obtido consiste em um valor médio, visto que a velocidade utilizada como base para o cálculo é a média obtida através das medições de velocidade realizadas. Ainda, considera-se que esta vazão volumétrica de ar é relacionada a toda a área de secção transversal de escoamento de exaustão da torre de resfriamento, sendo determinada para fins comparativos entre potências teoricamente obtidas a posteriori.

Sob esse prisma, o cálculo da vazão referente à área de varredura do rotor é necessário visto que, partindo desse valor, pode-se obter a máxima potência teórica passível de aproveitamento para o aerogerador com rotor tipo Savonius. Por fim, a vazão volumétrica referente à área de varredura do rotor é determinada pelo item 4.3.2.

#### 4.3 CÁLCULO DA MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA PASSÍVEL DE APROVEITAMENTO VIA AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS

A determinação da máxima potência que pode ser teoricamente aproveitada do fluxo mediante aplicação de máquina eólica com rotor tipo Savonius é essencial, pois, partindo desse dado, a tomada de conclusões quanto à existência de potencial para geração de energia torna-se possível.

Para que se conheça essa máxima potência aproveitável, é indispensável a aplicação da Equação 4 (equação de potência disponível dos ventos), conforme item 2.6.3, seguido ainda pela multiplicação do valor obtido pelo equivalente ao limite de Lanchester-Betz para aerogeradores com rotor tipo Savonius.

Ressalta-se ainda que essa análise é restrita à eficiência de conversão energética entre a energia disponível dos ventos e a energia capaz de ser captada pelo rotor em função de seu tipo construtivo. Dessa maneira, desconsideram-se fatores referentes à eficiência de conversão eletromecânica.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4)$$

onde:

P: potência disponível dos ventos (W)

$\rho$ : densidade do vento (Kg/m<sup>3</sup>)

A: área de varredura (m<sup>2</sup>)

$v$ : velocidade do vento (m/s)

Além do mais, a Equação 4 pode ser reescrita pela combinação de seus termos, para que se evidencie a importância da vazão volumétrica (Equação 9) em relação à potência que pode ser obtida. Dessa maneira, obtém-se:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot Qv \cdot V^2 \quad (4)$$

onde:

$Q_v$ : vazão volumétrica ( $m^3/s$ )

Salienta-se que, das variáveis envolvidas na Equação utilizada, as categorias densidade e velocidade do vento encontram-se determinadas conforme exemplificadas nos itens 4.1.4 e 4.1.7. Com isso, a única variável ainda não completamente definida consiste na área de varredura do rotor (área do rotor projetada perpendicularmente à direção do fluxo), estabelecida no item 4.3.1.

Destarte, a combinação dessa área obtida em conjunto com a velocidade média de exaustão possibilita a determinação da vazão volumétrica referente à área de varredura do rotor e, conseqüentemente, a máxima potência teórica para o tipo de rotor aplicado.

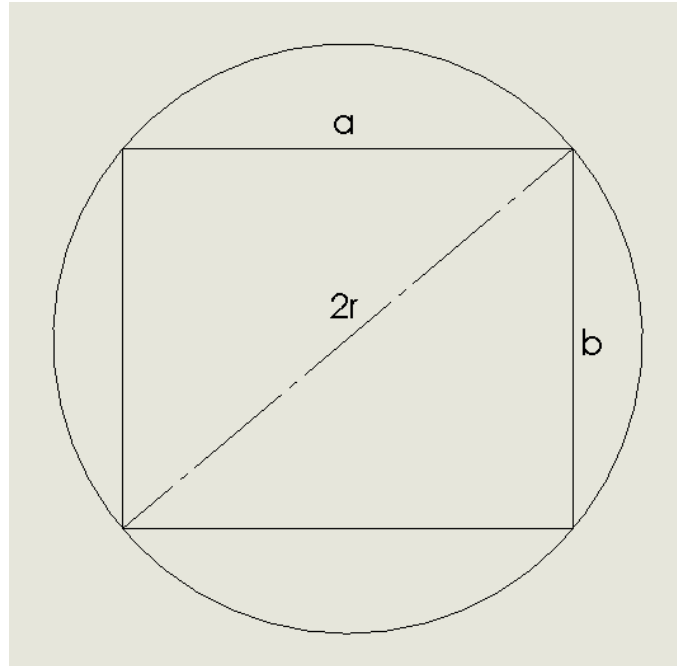
#### 4.3.1 Determinação da área de varredura do rotor tipo Savonius

O bocal de exaustão da torre de resfriamento no qual as medições foram realizadas é, conforme explanado pelo item 4.1.2, uma circunferência de diâmetro igual a 820mm. Visando à obtenção da máxima potência teórica passível de aproveitamento para o caso analisado, pode-se afirmar que o rotor a ser aplicado na torre de resfriamento em questão possui geometria quadrada, visto que o retângulo<sup>5</sup> de maior área que pode ser inscrito em uma circunferência consiste em um quadrado. Outrossim, quanto maior é a área de varredura do rotor, maior é a potência teoricamente passível de aproveitamento por este.

A Figura 17 apresenta a relação geométrica de um retângulo inscrito em uma circunferência.

---

<sup>5</sup> Atribui-se a figura retangular para o cálculo da área do rotor em virtude da planificação de sua geometria. Em outras palavras, o perfil planificado do rotor tipo Savonius em relação à direção de incidência do vento consiste em um retângulo. Essa característica pode ser examinada através da avaliação das pás do rotor tipo Savonius em relação à direção do vento, conforme exposto pela Figura 3.



**Figura 17:** Relação geométrica de um retângulo inscrito em uma circunferência

(Fonte: elaborada pelo autor, 2019)

Tomando a Figura 17 como referência, pode-se assumir a circunferência de raio “r” como sendo o bocal de exaustão da torre de resfriamento e o retângulo de lados “a” e “b” como a área de varredura do rotor tipo Savonius para o aerogerador aplicado. Sendo assim, a aplicação da Equação 11 a qual consiste no cálculo da área de retângulos é totalmente válida.

$$A(a, b) = a \cdot b \quad (11)$$

onde:

A: área do retângulo inscrito (m<sup>2</sup>)

a: medida do lado “a” (m)

b: medida do lado “b” (m)

Logo, pela Equação 12, correspondente ao teorema de Pitágoras<sup>6</sup>, tem-se:

$$(2r)^2 = a^2 + b^2 \quad (12)$$

<sup>6</sup> Teorema relacionado ao comprimento dos lados de um triângulo retângulo, enunciando que a soma dos quadrados de seus catetos corresponde ao quadrado de sua hipotenusa.

onde:

r: raio da circunferência (m)

a: medida do cateto “a” (m)

b: medida do cateto “b” (m)

Dessa forma, pode-se expressar a medida do cateto “a” como:

$$a = \sqrt{4r^2 - b^2}$$

Substituindo na Equação 11, obtém-se:

$$A(b) = b \cdot \sqrt{4r^2 - b^2}$$

a qual consiste em uma função cuja única variável é “b”. Logo, através da derivação, pode-se determinar seu ponto de máximo como sendo

$$A'(b) = \sqrt{4r^2 - b^2} + \frac{-b^2}{\sqrt{4r^2 - b^2}} = \frac{4r^2 - 2b^2}{\sqrt{4r^2 - b^2}}$$

igualando a zero:

$$A'(b) = 0$$

$$4r^2 - 2b^2 = 0$$

logo, tem-se:

$$b = r\sqrt{2}$$

e realizando as devidas substituições, obtém-se:

$$a = b = r\sqrt{2}$$

Portanto, o maior retângulo que pode ser inscrito em uma circunferência é, de fato, um quadrado. Nessa perspectiva, a área de varredura do rotor tipo Savonius pode ser determinada pela Equação 11, realizando-se as devidas substituições:

$$A = 2r^2$$

$$A = 2 \cdot (0,41m)^2$$

$$A = 0,3362m^2$$

#### 4.3.2 Vazão volumétrica referente à área de varredura do rotor aplicado

Combinando a área de varredura do rotor obtida, conforme explicitação do item 4.3.1, com a velocidade média de exaustão, pode-se calcular a vazão volumétrica restrita a essa mesma área que evidentemente compõe a parcela do fluxo de exaustão com potencial energético aproveitável para o aerogerador analisado. Com isso, aplicando-se a Equação 9, tem-se:

$$Qv = V \cdot A \tag{9}$$

$$Qv = \frac{11,29m}{s} \cdot 0,3362m^2$$

$$Qv = \frac{3,7957m^3}{s}$$

#### 4.3.3 Valor da máxima potência teórica obtida através de aerogerador com rotor tipo Savonius

Conhecidas as variáveis relacionadas ao fluxo de exaustão e à área de varredura do rotor tipo Savonius, a aplicação da Equação 4, expressa em função da vazão volumétrica, é viável, de forma que a potência disponível dos ventos é:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot Qv \cdot V^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,069Kg}{m^3} \cdot 3,7957m^3/s \cdot \left(\frac{11,29m}{s}\right)^2$$

$$P = 258,72W$$

No entanto, o valor obtido deve ser multiplicado pelo coeficiente de Lanchester-Betz que, por sua vez, corresponde a aproximadamente 15% (0,15) do valor calculado pela Equação 4 para aerogeradores com rotor tipo Savonius, conforme analisado pelo Gráfico 7. Desse modo, a máxima potência teoricamente aproveitável do fluxo mediante aplicação de aerogerador com rotor tipo Savonius é:

$$P = 258,72W \cdot 0,15$$

$$P = 38,80W$$

É importante destacar que o valor da máxima potência teoricamente aproveitável, obtida por aerogerador com rotor tipo Savonius, consiste em uma aproximação do valor real. Isso se dá devido ao fato de que o valor de coeficiente de potência foi obtido mediante análise gráfica, sendo assim, suscetível à interpretação errônea.

#### 4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

Conhecida a máxima potência que pode teoricamente ser obtida por intermédio da implantação de aerogerador com rotor tipo Savonius na torre analisada, é possível conduzir a análise referente à sua aplicabilidade a nível técnico, seguindo a premissa adotada no item 3.9.

Outrossim, como eixo norteador para este estudo de viabilidade, pode-se adotar a Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, que estabelece as condições para o acesso da micro e minigeração de energia disposta aos sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como regulamentar os sistemas de compensação de energia.

#### 4.4.1 Possibilidade de aproveitamento via sistema *on-grid*

No que tange ao aproveitamento da energia passível de ser gerada pelo aerogerador com rotor tipo Savonius, a primeira possibilidade viável de exploração consiste nos chamados sistemas *on-grid*, também conhecidos como *grid-tie*.

Tais sistemas fundamentam-se, conforme Resolução nº 482/2012, da ANEEL, na geração de energia de forma independente conectada à rede pública. Salienta-se que, caso a produção seja superior ao consumo, créditos com a concessionária são gerados em relação ao excedente, podendo ser consumidos em até cinco anos. Concomitantemente, caso essa geração de energia seja inferior ao consumo, a rede pública complementa com a energia restante, resultando, assim, em uma redução na conta de luz.

Ademais, para esses sistemas se faz necessária, além do aerogerador em questão, a aplicação de alguns componentes que permitem o correto funcionamento do sistema como um todo, tais como:

- a) retificador: converte a corrente alternada (AC) gerada pelo aerogerador em corrente contínua (CC), permitindo a passagem de corrente em apenas um sentido;
- b) inversor *grid-tie*: tem como objetivo converter a energia elétrica produzida de CC, vinda do retificador, para AC, além de sincronizar a energia gerada com a energia da rede elétrica;
- c) medidor bidirecional: sua função é medir o consumo de energia elétrica assim como a energia injetada na rede, fundamentando o sistema de compensação de energia.

Sob essa lógica, os sistemas *on-grid* apresentam-se tecnicamente como uma opção viável de aproveitamento da energia que pode ser gerada pelo aerogerador mediante o fluxo de exaustão. Confirma-se, portanto, sua viabilidade a nível técnico para a possibilidade de aproveitamento explorada.

#### 4.4.2 Possibilidade de aproveitamento via sistema *off-grid*

A segunda possibilidade de aproveitamento da energia passível de ser gerada pelo aerogerador com rotor tipo Savonius consiste nos sistemas *off-grid* que, por sua vez, são sistemas isolados ou autônomos.

Esses sistemas caracterizam-se por não possuírem conexão com a rede elétrica, necessitando, portanto, de um banco de baterias estacionárias para o armazenamento da energia

gerada pela turbina eólica. Ainda, os sistemas *off-grid* são explorados e indicados para locais remotos que não possuam acesso à rede elétrica pública, como, por exemplo, áreas rurais e afins.

Assim como nos sistemas *on-grid*, para o correto funcionamento de sistemas *off-grid*, são necessários alguns componentes além do aerogerador, tais como:

- a) retificador: igualmente aos sistemas *on-grid*, possui a função de converter a AC do aerogerador em CC;
- b) controlador de carga: realiza o controle da carga das baterias, evitando sobrecargas ou grandes descargas;
- c) baterias: responsáveis por armazenar a energia elétrica gerada;
- d) inversor *off-grid*: possui a função básica de converter a energia gerada de CC das baterias para AC, realizando um monitoramento das baterias e desligando-se quando a carga se apresenta muito baixa, evitando, com isso, danos com descarga excessiva.

Assim como os sistemas *on-grid*, a possibilidade de aproveitamento da energia teoricamente gerada pelo aerogerador via sistema *off-grid* também se apresenta praticável, viabilizando tecnicamente o sistema, apesar da baixa geração de energia (38,80W). Logo, é oportuno ressaltar que tais sistemas normalmente se apresentam mais custosos do que os sistemas *on-grid* devido aos componentes envolvidos.

#### 4.5 COMPARATIVO ENTRE A MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA OBTIDA VIA AEROGERADOR COM ROTOR TIPO SAVONIUS E A MÁXIMA POTÊNCIA TEÓRICA PARA A SITUAÇÃO IDEAL

Conforme determinado, a máxima potência teórica que pode ser extraída através da torre de resfriamento, cujas medições foram conduzidas, é de 38,80 Watts, utilizando o aerogerador com rotor tipo Savonius; sua área de varredura consiste em um quadrado inscrito na circunferência do bocal de exaustão, desconsiderando-se fatores de eficiência para conversão eletromecânica.

Porém, para fins comparativos, pode-se determinar a capacidade de geração de energia para a mesma torre de resfriamento de água. No entanto, aplicando-se aerogerador com um número teoricamente infinito de pás e assumindo a área de varredura de seu rotor como

coincidente à área total de exaustão da torre<sup>7</sup>. Essa situação pode ser considerada ideal, uma vez que, por meio dela, exemplifica-se a máxima potência do fluxo que poderia ser extraída por uma máquina eólica.

Portanto, aplicando-se a Equação 4, em função de vazão volumétrica e tomando os valores calculados nos itens 4.1.7, 4.2.1 e 4.2.2, tem-se:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot Qv \cdot V^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{1,069kg}{m^3} \cdot \frac{5,961m^3}{s} \cdot \left(\frac{11,29m}{s}\right)^2$$

$$P = 406,31W$$

Multiplicando o valor obtido pelo coeficiente de Lanchester-Betz para um número infinito de pás no rotor, obtém-se:

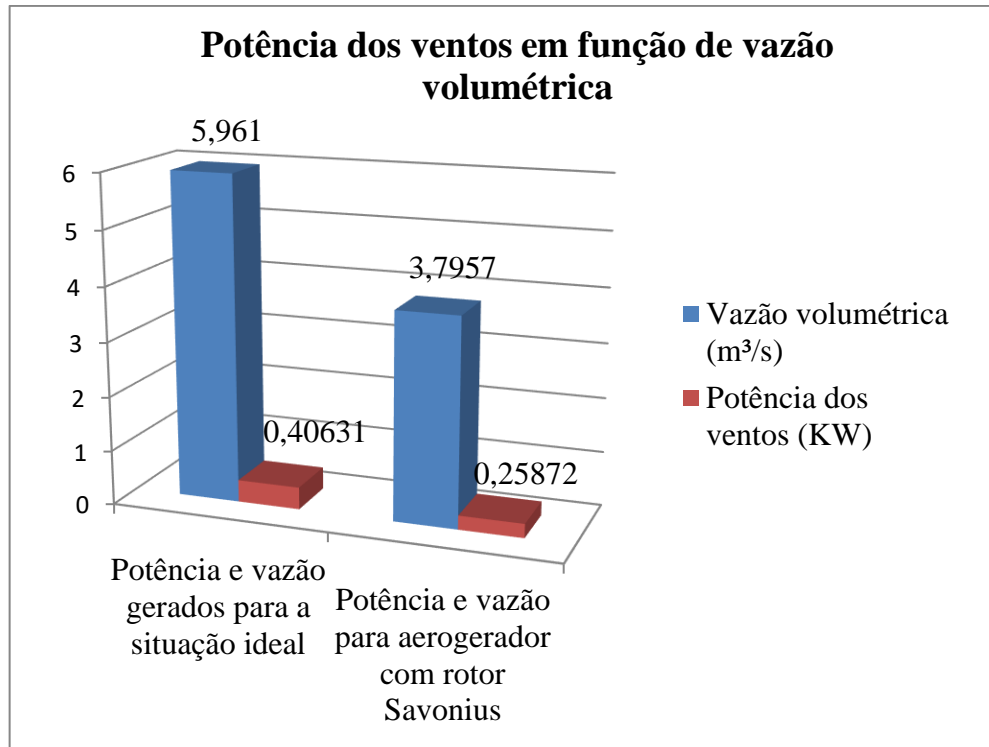
$$P = 406,31W \cdot 0,593$$

$$P = 240,95W$$

Logo, evidencia-se a importância da vazão volumétrica em relação à energia aproveitável do fluxo, conforme ilustrado pelo Gráfico 8. Ademais, a correta seleção do tipo de rotor a ser aplicado, visando à maior eficiência de captação de energia cinética dos ventos é também essencial, como pode ser analisado pelo exposto no Gráfico 9.

---

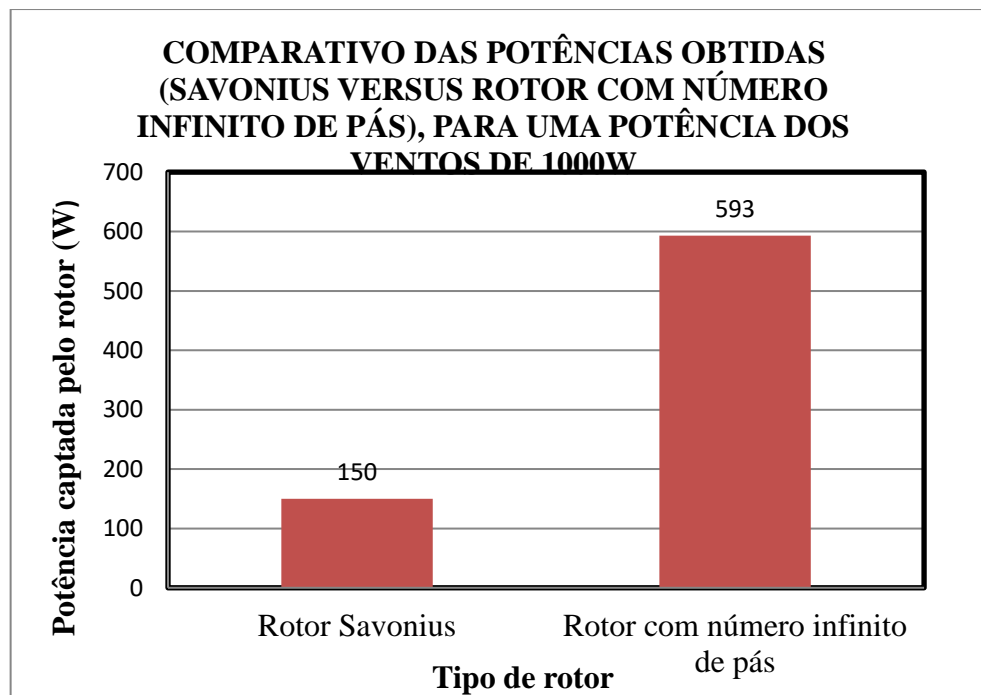
<sup>7</sup> Assumindo um número infinito de pás no rotor, pode-se adotar o coeficiente de Lanchester-Betz como sendo o limite teoricamente possível de 59,3%. Isso, em conjunto com o aproveitamento de toda a área de exaustão (fornece a máxima vazão volumétrica de ar), produz a maior potência que pode teoricamente ser gerada por uma turbina eólica para o fluxo em questão.



**Gráfico 8:** Potência dos ventos obtida em função da vazão volumétrica de ar

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

Nota: A potência dos ventos é diretamente proporcional à vazão analisada, de forma que, caso a vazão volumétrica duplique, a potência dos ventos também aumentará duas vezes.



**Gráfico 9:** Comparativo entre as potências obtidas por um aerogerador com rotor tipo Savonius e um rotor com número infinito de pás

(Fonte: elaborado pelo autor, 2019)

É relevante salientar, enfim, a importância da velocidade do fluxo de exaustão para a potência aproveitável. Isso porque, de todos os termos da Equação 4 (equação de potência disponível dos ventos), a única variável tomada à terceira potência é a velocidade. Dessa forma, caso duplicada, o valor obtido aumenta oito vezes.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente demanda por energia é nítida na sociedade. Esse fato é devido ao aumento populacional, juntamente com o desenvolvimento tecnológico. Com isso, é assertivo afirmar que existe a clara necessidade de estudos referentes à exploração de novas fontes energéticas, bem como novos métodos de aprimoramento da eficiência global de processos, levando-se em consideração as questões ambientais.

Sob tal ótica, o objetivo da pesquisa concentrou-se à investigação do potencial de geração de energia eólica, mediante aerogerador com rotor tipo Savonius, na exaustão de torre de resfriamento de água, marca KORPER, série R, modelo 180/9, buscando, com isso, soluções para o questionamento relativo à existência desse suposto potencial.

Com esse propósito e com a metodologia adotada, os resultados alcançados apresentaram-se promissores quanto à possibilidade de aproveitamento energético, pois, por intermédio do valor de vazão obtido e da aplicação das equações cabíveis, provou-se que existe, de fato, uma certa parcela da potência dos ventos que pode ser captada pela máquina eólica, com rotor tipo Savonius, apesar de suas limitações em termos de eficiência.

Ademais, a investigação do funcionamento e aplicação de sistemas *on-grid* e *off-grid* apresentou-se favorável como meio de aproveitamento da energia captada pela máquina eólica, fortalecendo, assim, a aplicabilidade e a viabilidade do sistema a nível técnico.

Logo, através do estudo conduzido e dos resultados obtidos como consequência da metodologia adotada, conclui-se que realmente há energia do fluxo de exaustão da torre de resfriamento de água, marca KÖRPER, série R, modelo 180/9, que pode ser captada através do emprego de aerogerador com rotor tipo Savonius.

Não obstante, é possível afirmar que a energia apanhada pela turbina eólica é passível de aproveitamento por meio de sistemas *on-grid* ou *off-grid*, confirmando a viabilidade de implantação do sistema a nível técnico. Com isso, confirma-se a existência de um dado potencial energético no sistema investigado, em consonância com o objetivo proposto e também em concordância com a hipótese de caráter positivo levantada.

Além disso, é importante salientar que essa energia aproveitável pode ser aplicada para o acionamento dos dispositivos da torre, a exemplo da bomba hidráulica, seja pelo sistema *on-grid* ou *off-grid*.

Infere-se, portanto que, apesar dessa capacidade de geração de energia ser limitada devido à baixa eficiência de aerogeradores com rotor tipo Savonius, a aplicação de um rotor de maior eficiência, certamente, pode resultar em um potencial energético aproveitável ainda maior.

Por fim, depreende-se que os resultados obtidos explicitam um novo meio de aprimoramento da eficiência global de processos industriais, assim como um nicho ainda inexplorado no mercado, o que pode valorizar, ainda mais, os recursos energéticos existentes em prol do desenvolvimento sustentável.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a relevância do tema e partindo da premissa de que este trabalho pode servir de estímulo para a elaboração de novos projetos e trabalhos acadêmicos significativos, produtivos e desafiadores, são pertinentes as seguintes sugestões:

- a) análise do potencial de geração de energia eólica através da aplicação de aerogerador com rotor tipo Savonius em torre de resfriamento de água, com configuração diferente de corrente de ar induzido;
- b) condução da análise do potencial de geração de energia eólica para a mesma torre de resfriamento do presente estudo, utilizando, para tanto, aerogerador com rotor tipo Darrieus;
- c) construção de protótipo de aerogerador com rotor tipo Savonius e instalação em torre de resfriamento, realizando o estudo de viabilidade econômica por intermédio dos custos e da energia gerada via sistema *on-grid*;
- d) produção de protótipo de aerogerador com rotor tipo Savonius e instalação em torre de resfriamento, realizando o estudo de viabilidade econômica por meio dos custos e da energia gerada via sistema *off-grid*;
- e) análise da influência da presença de aerogerador com rotor tipo Savonius em relação às capacidades operacionais da torre de resfriamento.

## REFERÊNCIAS

ALPINA. **Excelência em resfriamento**. 2019. Disponível em:

<<https://www.alpinaequipamentos.com.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ANACLETO, J.; ANACLETO, A. Sobre a Primeira Lei da Termodinâmica: As diferenciais do calor e do trabalho. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 488-490, out. 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Coordenação de Organização da Informação Legislativa – CELEG, Serviço de Tratamento da Informação Legislativa – SETIL, Seção de Legislação Citada – SELEC. 11 dez. 2012. Disponível em: <[https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop\\_mostrarintegra;jsessionid=A073EBF9703B89310D82A0B5104F3DFC.proposicoesWebExterno1?codteor=1352763&filename=LegislacaoCitada+-PL+2058/2015](https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=A073EBF9703B89310D82A0B5104F3DFC.proposicoesWebExterno1?codteor=1352763&filename=LegislacaoCitada+-PL+2058/2015)>. Acesso em: 12 maio 2019.

BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R.; CORNWELL, P. J. **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Dinâmica**. 9. ed. Porto Alegre: Amgh, 2012.

BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis no 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no 9.648, de 27 de maio de 1998, no 3.890-A, de 25 de abril de 1961, no 5.655, de 20 de maio de 1971, no 5.899, de 5 de julho de 1973, no 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Brasília, DF, 26 abr. 2002. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em: 18 abr. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CREDER, H. **Instalações de Ar Condicionado**. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2004.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n. 72, p. 6-15, fev. 2007.

GWEC. Global Wind Energy Council. **Global Wind Energy Outlook 2016**. Bélgica: GWEC, 2016. Disponível em: <<http://files.gwec.net/files/GlobalWindEnergyOutlook2016>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

HOMIS DO BRASIL EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. 2019. Disponível em: <<https://www.homis.com.br/empresa>>. Acesso em: 04 abr. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, v.71, p.1-1 - 8-74, 2011. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/AEB/AEB2011.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2019.

KORPER. **Torres de Resfriamento**. 2019. Disponível em:

<<https://www.korper.com.br/torres-de-resfriamento>>. Acesso em: 08 abr. 2019.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2003.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. (Org.). **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. 3. ed. Itajubá, MG: FUPAI, 2006.

MAUAD, F. F.; FERREIRA, L. C.; TRINDADE, T. C. G. (Coord.) **Energia Renovável no Brasil: Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras**. São Carlos, SP: EESC/USP, 2017.

NETTO, A.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M.; ARAUJO, R.; ITO, A. E.. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Blucher, 1998.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. United Nations. **World Population Prospects: The 2017 Revision**. 2017. Disponível em:

<[https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_Wallchart.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_Wallchart.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2019.

REN21. **Renewables 2018: Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat. 2018. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652\\_GSR2018\\_FullReport\\_web\\_final\\_.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2019.

ROSA, A. V. **Processos de Energias Renováveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. (Org.). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Cenergia, 2003.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.