PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Marina Thury Mosqueira Rodrigues Lopes

Concepção, Modelagem e Simulação de uma Turbina Eólica em Escala

Conception, Modelling and Simulation of a Small Scale Wind Turbine

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro
Dezembro de 2016

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a algumas pessoas, que exerceram papel de importância inestimável para a conclusão deste projeto e, principalmente, de minha vida acadêmica.

Ao meu orientador, Mauro Speranza Neto, que me guiou, ajudou, incentivou e acalmou, sempre dizendo que tudo seria possível.

Aos meus chefes e amigos Lucas Cardoso Sanchez e Guilherme München Wenzel, que possuem muito conhecimento sobre o tema e me proporcionaram reflexões e diferentes pontos de vista sobre o projeto.

Aos meus amigos de curso da PUC-Rio, cuja camaradagem, companheirismo e parceria, sem dúvida alguma, viabilizaram a minha graduação. Sem eles, esta longa caminhada teria sido mais difícil e monótona.

Às minhas amigas de infância, que por não participarem do mundo da Engenharia, me ajudaram a esquecer-lo diversas vezes nas horas de stress e desespero, proporcionando-me momentos felizes quando mais precisei.

A todas as pessoas que um dia cruzaram meus caminhos e contribuíram para eu me tornar, quem hoje eu sou.

Aos meus irmãos, Gabriel e Gustavo Thury M. R. Lopes, que estiveram comigo em todos os momentos. Me ajudaram da melhor forma que podiam e trouxeram, ironicamente, paz para o meu espírito.

Aos meus pais, Simone Thury M. R. Lopes e Eduardo de Barros Rodrigues Lopes, que me deram a vida, me mostraram que eu poderia sonhar alto, que eu era capaz de realizar o que eu quisesse, e quando o caminho se tornasse difícil, eles estariam lá para me levantar. A eles, eu devo tudo o que sou.

Marina Thury Mosqueira Rodrigues Lopes

Resumo

Este projeto de graduação tem três principais objetivos: a Concepção, a Modelagem e o Controle de uma Turbina Eólica de pequeno porte.

Após a revisão teórica para melhor compreensão e desenvolvimento deste projeto, será realizada a Concepção da Turbina. Nesta fase serão determinados parâmetros e dimensões do aerogerador, tais como a Potência que será gerada pela máquina.

Em seguida, será apresentada a Modelagem do Sistema, que será realizada a partir da ferramenta de Grafos de Ligação.

Por fim, será realizado o Controle do Sistema da Turbina Eólica, utilizando o software Matlab e sua extensão Simulink.

Palavras-Chave: Turbina Eólica, Potência, Coeficiente de Potência, Ângulo Pitch, Relação de Velocidades

Abstract

These graduation Project has three main objectives. The Conception, Modelling and Control of a small scale Wind Turbine.

After a theoretical review for a better comprehension and development of the Project, the Conception of the Wind Turbine will be fulfilled. Parameters and dimensions of the turbine will be determined, such as the Power generated by the machine.

Subsequently the Modelling of the System will be presented, which will be implemented with the Bond Graphs Methodology.

Finally the Control of the System of the Wind Turbine will be achieved by using the software Matlab and its extensions Simulink.

Key Words: Wind Turbine, Power, Power Coefficient, Pitch Angle, Tip-Speed-Ratio

1 Sumário

2	<i>Introdução</i>	10
2.1	Objetivo	10
2.2	Motivação	10
2.3	O Vento	11
2.4	Componentes de uma Turbina Eólica	12
2.4.1	Nacele	13
2.4.2	Pás, Cubo do Rotor e Eixo	13
2.4.3	Transmissão e Caixa Multiplicadora	14
2.4.4	Gerador	14
2.4.5	Torre	14
3	<i>Fundamentação Teórica do Projeto</i>	15
3.1	Princípios Básicos	15
3.1.1	Energia do Vento	15
3.1.2	Coeficiente de Potência	17
3.2	Aerodinâmica	18
3.2.1	Influência dos Ângulos	20
3.3	Curva de Potência	22
3.4	Torque	23
4	<i>Concepção</i>	25
4.1	Parâmetros do Projeto	25
4.1.1	Altura de Cubo e Diâmetro do Rotor	25
4.1.2	Fator de Interferência	25
4.1.3	Fatores Limitantes	26
4.1.4	Potência Nominal	32
4.1.5	Resumo do Projeto	33
5	<i>Modelagem</i>	33
5.1	Grafos de Ligação	33
5.1.1	Variáveis de Potência e de Energia	34
5.1.2	Elementos Fundamentais	35
5.2	Modelo da Turbina Eólica	40

5.3	Gráfico de Ligação da Turbina Eólica.....	42
5.3.1	Equações da Dinâmica do Sistema.....	42
6	Controle.....	48
6.1	Modelo de Controle.....	48
6.2	Variáveis de Entrada e Saída	48
6.2.1	Gerador	48
6.2.2	Engrenagens.....	49
6.2.3	Pás.....	49
6.2.4	Sistema de Controle.....	49
6.3	Dinâmica do Sistema	49
6.4	Coeficiente de Potência C_p	51
6.5	Simulação.....	52
7	Resultados	53
7.1	Conclusão.....	56
8	Bibliografia.....	57

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Movimento do ar devido ao aquecimento terrestre e Força de Coriolis.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 – Componentes de uma Turbina Eólica.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 - Nacele</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 – Princípio básico de funcionamento</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 - Fluxo de ar a velocidade v através da área A</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 – Relação Potência x Velocidade do Vento</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 – Fluxo de ar através da pá.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8 – Representação das Forças de Empuxo e Arrasto</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 – Diagrama Velocidades e Ângulos.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 – Curva de Potência típica.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11 – Força do Vento sobre Aerogerador</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12 – Relação Altura e Velocidade</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13 – Força concentrada na Altura de Cubo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14 – Gráfico Velocidade x Raio da Torre</i>	<i>31</i>
<i>Figura 15 – Meia Seta</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16 – Causalidade.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17 – Fontes de Esforço e de Fluxo</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18 – Causalidade preferencial de Capacitores</i>	<i>37</i>
<i>Figura 19 – Causalidade preferencial da Inércia.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 20 – Transformador de Fluxo</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 – Transformador de Esforço.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22 – Girador: Fluxo em Esforço</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23 – Girador: Esforço em Fluxo</i>	<i>39</i>
<i>Figura 24 – Modelo de Turbina Eólica</i>	<i>40</i>
<i>Figura 25 – Modelo de Turbina Simplificado</i>	<i>41</i>
<i>Figura 26 – Grafo de Ligação simplificado.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 27 – Grafo de Ligação: Rotor</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28 – Grafo de Ligação: Eixo de Transmissão 1.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29 - Grafo de Ligação: Caixa Multiplicadora.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 30 – Grafo de Ligação: Gerador Elétrico</i>	<i>46</i>
<i>Figura 31 – Sistema Global e Subsistemas.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 32 – Sistema de Controle</i>	<i>48</i>
<i>Figura 33 – Modelo Simulink.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 34 – Curva de Potência</i>	<i>53</i>
<i>Figura 35 – Relação Velocidade Angular x Velocidade do Vento.....</i>	<i>54</i>

<i>Figura 36 – Gráfico C_p x Velocidade do Vento</i>	<i>55</i>
<i>Figura 37 – Relação C_p x Relação de Velocidades</i>	<i>56</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Dimensões</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2 – Propriedade dos aços</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3 – Dimensões da torre</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4 – Relação de velocidades</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 5 – Variáveis de Potência e Energia em diferentes Domínios Físicos</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 6 - Componentes</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 7 – Coeficientes das equações das curvas de Potência</i>	<i>51</i>

2 Introdução

2.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é a concepção, modelagem e controle de uma turbina eólica de pequena escala. O mesmo poderá ser usado para a eventual construção de um aerogerador, podendo ter suas dimensões adaptadas, de acordo com as necessidades e especificações do interessado.

2.2 Motivação

O ser humano ao longo das décadas vem desenvolvendo e aprimorando novas tecnologias em diversos setores da indústria. Este grande avanço tecnológico ocasionou mudanças climáticas, e ao longo dos últimos anos, estas têm se tornado cada vez mais presentes e severas. Como exemplo temos diferentes desastres naturais tais como enchentes, furacões, degelo das calotas polares, extinção de diversas espécies entre muitos outros, que passaram a ocorrer com mais frequência e maior intensidade.

As mudanças climáticas foram agilizadas e mais facilmente perceptíveis devido à emissão de quantidades excessivamente grandes de gases poluentes na atmosfera terrestre, os quais intensificam o chamado Efeito Estufa. Este é responsável pela manutenção da temperatura da Terra, porém sua intensificação altera o equilíbrio terrestre, tendo efeitos catastróficos.

A demanda por energia não diminuiu e a tendência é continuar aumentando. Apesar disso, a necessidade de diminuir a emissão de gases poluentes tornou-se uma das prioridades globais, o que incentivou que novas tecnologias “limpas” fossem mais frequentemente utilizadas.

Sendo assim, novas tecnologias cuja a energia proviesse de fontes ilimitadas, ou seja, que não são esgotáveis apesar de seu uso, começaram a ser desenvolvidas e aprimoradas com a finalidade de diversificar a matriz energética mundial. Estas são conhecidas como *energias renováveis* e temos como o exemplo os raios do sol e o vento.

2.3 O Vento

O vento pode ser definido como o movimento do ar. Este é causado devido ao aquecimento desigual da superfície terrestre. A energia térmica fornecida pelos raios solares é absorvida pela Terra e então convertida em energia cinética. A desigual absorção da energia solar pela superfície é causada por diversos fatores, como por exemplo latitude e inclinação de terreno. Além disso, superfícies líquidas, como oceanos, rios e lagos aquecem-se mais lentamente que superfícies terrestres, devido às diferentes capacidades térmicas. O ar sobre as superfícies é também aquecido e por ser menos denso que ar frio, o primeiro sobe. Dessa forma, cria-se uma área de baixa pressão, logo o ar em área de pressão mais alta desloca-se para a área de baixa pressão, gerando vento. Este princípio é responsável pela geração tanto de pequenos ventos como de grandes massas de ar, ao redor de todo o planeta.

O deslocamento do ar tem como consequência a Força de Coriolis. De acordo com a Primeira Lei de Newton, a mudança de estado (inercial para em movimentação) de um corpo (ar) só é possível se houver um desbalanceamento das forças que atuam sobre o mesmo. A Força de Coriolis é considerada uma força de reação ao movimento. Se, teoricamente, o movimento do ar for observado por um sistema de coordenadas não inercial, ou seja, fixo sobre a superfície terrestre, surgem duas “forças fictícias”: a força centrífuga e a força de Coriolis. A primeira produz a gravidade, através da força de atração gravitacional verdadeira entre o ar e o planeta. A segunda atua sobre o corpo em movimento e é sempre perpendicular a este. Logo, a força de Coriolis altera a direção do movimento. A Força de Coriolis é uma das responsáveis pela direção do movimento de grandes massas de ar, em que desvia os ventos no sentido horário no Hemisfério Norte e no sentido anti-horário no Hemisfério Sul.

Devido à grande quantidade de fatores envolvidos para determinar a direção, sentido e intensidade do vento pode-se concluir que sua inteira compreensão é extremamente complexa, de forma que para poder usá-lo como uma fonte de energia confiável deve-se realizar diversos estudos para determinar o regime de ventos na região onde se deseja implantar uma usina eólica.

Na Figura 1 pode-se visualizar uma imagem que ajuda a compreender melhor o movimento de grandes massas de ar considerando o aquecimento desigual da superfície terrestre.

Figura 1 - Movimento do ar devido ao aquecimento terrestre e Força de Coriolis

2.4 Componentes de uma Turbina Eólica

Para melhor compreensão do trabalho, será feita uma breve descrição dos principais componentes de uma turbina eólica genérica, lembrando que pode haver certas variações entre fabricantes e modelos na indústria, tais como tamanho e formato diferentes da nacele, pela presença ou não da caixa multiplicadora ou pelo gerador utilizado. A seguir, pode-se visualizar na Figura 2 uma turbina eólica e seus principais componentes.

Figura 2 – Componentes de uma Turbina Eólica

2.4.1 Nacele

A nacele é o componente em que muitos outros são instalados, tais como o gerador, a caixa de engrenagens, o sistema de controle, sensores de velocidade e direção do vento, motores para posicionar a turbina de forma a aproveitar melhor o vento, entre outros. Na Figura 3 pode-se visualizar a nacele e estes outros elementos em maior detalhe.

Figura 3 - Nacele

2.4.2 Pás, Cubo do Rotor e Eixo

As pás exercem um papel extremamente importante em uma turbina eólica, uma vez que o desempenho desta depende do design e eficiência das pás para converter a energia cinética presente no vento em energia mecânica. Na maioria dos modelos encontrados na indústria, a otimização da conversão desta energia depende dos ângulos em que as pás estão posicionadas, de forma que o controle da potência que está sendo gerada está diretamente vinculado com estes ângulos.

As pás são conectadas, com auxílio de flanges, ao cubo do rotor. Na indústria eólica, a altura em que o cubo está localizado serve como referência para a modelagem do vento e os cálculos de produção de energia envolvidos. Em caso de turbinas com sistema de

controle de velocidade (que é o caso do aerogerador deste trabalho) os motores para ajustar o ângulo das pás estão também posicionados no cubo do rotor.

O cubo é acoplado ao gerador através do eixo, responsável pela transferência da energia mecânica gerado pela turbina. Caso haja uma caixa multiplicadora, serão necessários dois eixos; o de baixa rotação, que está ligado ao rotor e o de alta rotação, que está conectado ao gerador.

2.4.3 Transmissão e Caixa Multiplicadora

A caixa multiplicadora é englobada pela transmissão, cuja função é transmitir a energia mecânica extraída pelo rotor até o gerador. Este sistema é formado por eixos, mancais, engrenagens e acoplamentos. Tem também como objetivo adequar a velocidade de rotação do eixo conectado ao rotor com a velocidade de rotação específica do gerador, que costuma ser mais elevada. Atualmente há modelos de aerogeradores que não possuem relação de transmissão. Em vez disso, geradores multipolos de baixa velocidade são usados.

2.4.4 Gerador

O gerador elétrico é o responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica, através de equipamentos de conversão eletro-mecânica. Geradores conectados à rede elétrica devem ter sua rotação mantida a velocidade constante, de forma a manter uma frequência aproximada de 60 Hz, para que a máquina possa ser conectada à rede elétrica. Esta é uma das razões para que haja sistemas de controle em aerogeradores.

2.4.5 Torre

A torre tem como função a sustentação e posicionamento do rotor e da nacelle. Sua altura tem grande importância, tanto por questões financeiras quanto para a produção de energia, uma vez que a velocidade do vento aumenta proporcionalmente com a altura.

3 Fundamentação Teórica do Projeto

3.1 Princípios Básicos

A energia cinética presente no vento pode ser extraída através da turbina eólica e convertida em energia mecânica de rotação ao passar pelo rotor da mesma. Esta energia é transmitida através de um eixo para o gerador, que é por fim transformada em energia elétrica, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Princípio básico de funcionamento

3.1.1 Energia do Vento

A máxima quantidade de energia disponível no vento é dada pela fórmula:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad 3.1$$

Onde

m é a massa do ar em movimento [kg]

v é a velocidade do vento [m/s]

Sabendo que

$$\dot{m} = \rho.A.v \quad 3.2$$

Em que

$\dot{m}$ é a vazão mássica do ar [kg/s]

ρ é densidade do ar [kg/m³]

A é a área da seção transversal pela qual o vento passa [m²]

Figura 5 - Fluxo de ar a velocidade v através da área A

Logo, a potência máxima que pode ser extraída do vento é:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho.A.v^3 \quad 3.3$$

$P_{\max}$ é a máxima potência disponível no vento [W]

Nota-se que a potência varia cubicamente com a velocidade do vento, logo um estudo aprofundado sobre o regime de ventos do local onde se planeja construir o empreendimento eólico é imprescindível para que a potência gerada seja otimizada.

Na Figura 6 – Relação Potência x Velocidade do Vento, pode-se visualizar uma curva genérica, que represente a relação entre estas duas grandezas.

Figura 6 – Relação Potência x Velocidade do Vento

Naturalmente, este gráfico é apenas teórico. Na prática, velocidades muito elevadas do vento são raras, de forma que não é economicamente interessante projetar uma turbina que suporte estes ventos mais intensos. Por isso é importante um sistema de controle, que reduza a eficiência aerodinâmica das pás, limitando a potência aproveitada.

3.1.2 Coeficiente de Potência

A turbina eólica não é capaz de extrair toda a energia disponível no vento e convertê-la em energia mecânica. Para representar esta taxa de conversão foi definido o Coeficiente de Potência C_p , que pode ser definido como a razão entre a potência extraída e a potência máxima disponível.

$$C_p = \frac{P_r}{P_{\max}} \quad 3.4$$

Onde

P_r é a Potência extraída do vento pelo rotor [W]

O valor máximo que o Coeficiente de Potência C_p pode atingir, também conhecido como Limite de Betz, é $C_p = \frac{16}{27} = 0,593$.

Aerogeradores modernos operam perto deste limite, aproximadamente com $C_p = 0,5$, o qual deve ser otimizado a fim de aproveitar o máximo de energia possível.

Assim sendo, a Potência extraída do vento se dá pela fórmula:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3 \quad 3.5$$

A área da seção transversal é:

$$A = \pi \cdot R^2 \quad 3.6$$

Em que,

R é o raio do rotor [m]

Conclui-se dessa forma que

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad 3.7$$

3.2 Aerodinâmica

Pás de turbinas eólicas são estruturas longas e esbeltas, normalmente feitas de fibra de vidro. Ao atingir as pás, o vento se decompõe em duas componentes perpendiculares e uma paralela à direção do fluxo. Uma das componentes perpendiculares ao fluxo é muito menor que as outras, logo pode ser considerada desprezível. Sendo assim, o fluxo do vento é assumido como sendo 2D, ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxo de ar através da pá

A componente z da figura acima é desprezada, de forma que o fluxo tem componentes apenas x e y .

Quando o fluxo de ar atinge as pás duas forças são geradas sobre a mesma: a Força de Empuxo e a Força de Arrasto. A Força de Empuxo é a força vertical orientada para cima, causada pela pressão do fluido sobre o corpo (pá); e a Força de Arrasto é a força que atua sobre o corpo na mesma direção que a o fluido escoar. Foi descoberto que é muito mais eficiente usar a Força de Empuxo do que a Força de Arrasto para a rotação do rotor, logo a posição e design da pá devem ser otimizados para obter a mais eficiente razão entre estas forças possível durante a operação da turbina, representadas na Figura 8.

Figura 8 – Representação das Forças de Empuxo e Arrasto

Sendo,

F a Força Resultante [N]
 L a Força de Empuxo [N]
 D a Força de Arrasto [N]
 α o Ângulo de Ataque [°]

3.2.1 Influência dos Ângulos

3.2.1.1 Relação de Velocidades λ

A relação de Velocidades, também conhecida como tip-speed-ratio, é uma variável importante para a modelagem e controle de uma turbina eólica, e pode ser definida como sendo a relação entre a velocidade das pás e a velocidade efetiva do vento. Em (Bertelsen, Hansen, Pedersen, Schwensen, & Sivabalan, 2011) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi encontrado como valor recorrente para o tip-speed-ratio $\lambda=3,5$, e este será o valor utilizado algumas vezes ao longo projeto.

$$v_{pás} = \Omega_r R \quad 3.8$$

$$\lambda = \frac{v_{pás}}{v} \quad 3.9$$

Logo,

$$\lambda = \frac{\Omega_r \cdot R}{v} \quad 3.10$$

Sendo,

Ω_r é a velocidade rotacional das pás [rad/s]
 R é o Raio do rotor [m]
 $v_{pás}$ é a velocidade das pás [m/s]
 v é a velocidade do vento [m/s]

3.2.1.2 Ângulo Pitch β

O ângulo de ataque α está vinculado ao ângulo pitch β , o qual influencia diretamente no valor do C_p , porque uma vez que a potência nominal da turbina é atingida, um sinal é emitido e as pás do rotor são giradas em torno de seu eixo longitudinal, alterando o ângulo de pitch. Esta mudança diminui as forças aerodinâmicas atuando sobre as pás e, conseqüentemente, a potência sendo extraída.

Na Figura 9 pode-se visualizar um diagrama representando os ângulos e velocidade relativa para melhor compreensão.

Figura 9 – Diagrama Velocidades e Ângulos

Onde

β é o ângulo pitch da pá [°]

ϕ é o ângulo entre a velocidade relativa do vento e direção de rotação da pá [°]

E

$$\alpha = \phi - \beta \quad 3.11$$

A direção relativa do vento muda de acordo com a velocidade do vento e velocidade de rotação. Devido à esta complexa relação de variáveis, através de controle externo, as

pás variam sua posição e, conseqüentemente, os ângulos citados acima. Dessa forma, o ângulo pitch β influencia a velocidade relativa de modo que se atinja o torque máximo. Ou seja, C_p é função do ângulo pitch β e da relação de velocidades λ .

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad 3.12$$

3.3 Curva de Potência

A curva de potência de um aerogerador é uma representação gráfica da dependência da potência gerada pela turbina e a velocidade do vento. Como já demonstrado anteriormente, a potência varia cubicamente com a velocidade, o que pode ser visualizado na curva. Entretanto, por motivos técnicos, após uma determinada velocidade ser atingida esta potência passa a ser mantida constante com auxílio do sistema de controle da turbina. Este sistema aciona as pás da turbina para que o ângulo pitch delas varie, de modo a não aproveitar o vento completamente.

Tipicamente a curva de potência pode ser representada segunda a Figura 10.

Figura 10 – Curva de Potência típica

Para melhor compreensão da Curva de Potência, podemos dividi-la em quatro fases.

I: Potência gerada é nula, pois o vento não é forte o suficiente para acionar o rotor. Normalmente a velocidade mínima aceitável para que a turbina opere é 2 m/s e este será o valor utilizado para o projeto.

II: Uma velocidade mínima é atingida, e até a velocidade nominal a potência varia cubicamente com a velocidade. Nesta fase, toda a potência do vento é aproveitada e o C_p é máximo.

III: Após a velocidade nominal ser atingida, o sistema de controle é acionado. A potência é mantida constante, apesar do aumento da velocidade do vento, pois o C_p está variando juntamente com o ângulo pitch β .

IV: Uma velocidade máxima é atingida e a turbina é desligada para sua própria preservação. Normalmente, o maior limitador é o gerador elétrico. Usualmente, acima de 25 m/s a turbina é desligada e assim será considerado ao longo do trabalho.

Este trabalho apresentará adiante, como um dos resultados, a curva de potência característica deste projeto.

3.4 Torque

O Torque T_a aplicado no aerogerador pode ser calculado a partir da potência e velocidade de rotação. O torque no rotor pode ser definido como sendo o torque presente no vento multiplicado pelo coeficiente de torque C_Q da turbina. Esta grandeza pode ser calculada tanto pelo C_p quanto pelas medidas da turbina. O cálculo por ambas as formas encontra-se abaixo.

$$T_a = \frac{P_r}{\Omega_r} \quad 3.13$$

Ou seja,

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p \cdot \frac{1}{\Omega_r} \quad 3.14$$

Pela fórmula (3.10), página 20, podemos substituir Ω_r e obter:

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot C_p \cdot \frac{1}{\lambda} \quad 3.15$$

E

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot C_Q \quad 3.16$$

Uma vez que

$$C_Q = \frac{C_p}{\lambda} \quad 3.17$$

Onde

T_a é o torque aerodinâmico do rotor [N.m]

Ω_r é a velocidade angular das pás [rad/s]

C_Q é o Coeficiente de Torque [-]

$$T_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad 3.18$$

4 Concepção

4.1 Parâmetros do Projeto

4.1.1 Altura de Cubo e Diâmetro do Rotor

Para a execução deste Projeto foi necessário tomar algumas decisões quanto às dimensões, de acordo com interesses futuros. A fim de cumprir com um dos objetivos do presente trabalho, que é ser usado como modelo para a eventual construção de turbinas eólicas de pequeno porte posicionadas em cima de edifícios, foi escolhida para a altura do cubo do rotor $H=1,50$ m e diâmetro $D=1,40$. A partir destas decisões outras grandezas puderam ser determinadas, modeladas e/ou controladas.

4.1.2 Fator de Interferência

A taxa de conversão da potência presente no vento para a potência extraída no rotor é uma das formas como o Coeficiente de Potência pode ser definido (Fórmula 3.1.2, página 17). A potência extraída do vento P_r depende da força do vento atuante sobre o rotor e a velocidade que o atinge.

$$P_r = F_D \cdot v_D \quad 4.1$$

Onde

F_D é a Força do vento nas pás [N]

v_D é a velocidade do vento atuante sobre o rotor [m/s]

A velocidade do vento no rotor é calculada a partir da velocidade do vento na frente do mesmo e do fator de interferência a . Este fator quantifica a desaceleração do vento ao passar pela turbina eólica.

$$v_D = v(1 - a) \quad 4.2$$

A força do vento nas pás pode ser calculada, segundo Modelling and Control of a Small Scale Wind Turbin **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a partir de

$$F_D = 2.\rho.A.v.a.v_D \quad 4.3$$

Substituindo em 4.1

$$P_r = 2.\rho.A.v^3.a.(1-a)^2 \quad 4.4$$

Em que

a é o fator axial de interferência.

Substituindo na fórmula que define C_p (3.4, página 17), obtém-se que

$$C_p = 4.a.(1-a)^2 \quad 4.5$$

Este fator varia de máquina para máquina e otimizá-lo é imprescindível para uma turbina mais eficiente. Esta variável depende do design da pá e há diversas outras complexas considerações a serem feitas a seu respeito, que não são foco principal deste trabalho. Sabendo-se que seu limite teórico é $a = \frac{1}{3} = 0,33$, calculado de forma que o Coeficiente de Potência C_p não ultrapasse o Limite de Betz, usaremos para os próximos cálculos o valor $a=0,20$ obtendo desta forma $C_p=0,512$. Este valor para Coeficiente de Potência será considerado como o valor máximo que pode ser atingido, que é condizente com os obtidos na prática em turbinas de tamanho real, segundo levantamento feito.

4.1.3 Fatores Limitantes

Para o dimensionamento de outros componentes da turbina eólica e o cálculo da potência, que por ela seria gerada levou-se em conta quais fatores são limitantes para que a mesma opere corretamente. Dois motivos foram levantados, sendo eles a estrutura da torre e o gerador elétrico.

1.1.1-1 Estrutura

Sob a estrutura incide diretamente a Força do Vento F_D . A partir da força máxima suportada pela estrutura será possível calcular a velocidade máxima do vento que pode incidir sobre a turbina, sem que haja qualquer dano sobre ela. A força é representada na Figura 11.

Figura 11 – Força do Vento sobre Aerogerador

Em turbinas eólicas de tamanho real, o perfil do vento varia com a altura, ou seja, a ponta inferior do rotor é atingida por um vento mais fraco do que a ponta superior do rotor. Isto ocorre devido a um fenómeno meteorológico conhecido como *Wind Shear*, que pode ser entendido como um gradiente de vento, dado pela fórmula:

$$v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^\alpha \quad 4.6$$

Sendo,

v_2 velocidade a uma altura z_2 [m/s]

v_1 velocidade a uma altura z_1 [m/s]

z_2 altura superior [m]

z_1 altura inferior [m]

α expoente de Wind shear (normalmente menor que 0,3)

O que produz um perfil de velocidade do vento que pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Relação Altura e Velocidade

Esta característica influencia também o perfil da Força do Vento, que tem uma relação diretamente proporcional com a variação da sua velocidade. Entretanto, como neste trabalho a variação da altura é pequena, será considerado um perfil constante da Força do vento, cuja concentração será na altura do cubo do rotor, que pode ser melhor compreendido na Figura 13.

Figura 13 – Força concentrada na Altura de Cubo

Estruturas sofrendo esforços devido à aplicação de uma força concentrada é dada por:

$$\sigma = \frac{M.y}{I} \quad 4.7$$

Onde,

- σ é a tensão de escoamento do material [MPa]
 M é o momento de inércia causado pela força F_D a uma altura H [N.m]
 Y distância ao centroide [mm]
 I é o momento de inércia [mm⁴]

Sabendo que a estrutura da torre tem perfil circular vazado, a fórmula acima é desenvolvida para:

$$\sigma = \frac{F_D H \cdot (R + t/2)}{\pi \cdot R^3 t} \quad 4.8$$

Em que,

- R é o raio da torre [m]
 t é a espessura da parede [mm]

Pela estrutura, pode-se concluir que a Força limite é dada por

$$F_D = \frac{\pi \cdot R^3 \cdot t \cdot \sigma}{H \cdot (R + t/2)} \quad 4.9$$

Pela fórmula 4.3 da página 26, podemos simplificar que a força do vento determinada a partir das dimensões do rotor é:

$$F_D = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot a \cdot v^2 \cdot (1 - a) \quad 4.10$$

Para simplificar, todos estes fatores multiplicando v serão substituídos por k obtendo-se

$$F_D = k \cdot v^2 \quad 4.11$$

Juntando as fórmulas 4.9 e 4.11, conclui-se que a velocidade limite é dada por:

$$v = \sqrt{\frac{\pi \cdot R^3 \cdot t \cdot \sigma}{H \cdot (R + \frac{t}{2}) \cdot k}}$$

Após pesquisa e consulta, concluiu-se que o aço estrutural seria um material apropriado para a construção da torre, mais especificamente: ASTM-A36, ASTM-A572 e ASTM-A514.

Após pesquisa sobre relação da altura com o diâmetro da torre, foram realizados alguns cálculos para diversas dimensões. Estes parâmetros serão utilizados ao longo do trabalho e podem ser visualizados na Tabela 1 – Dimensões.

$H [m]$	C_p	a	$R_{rotor} [m]$	$A_{pás} [m^2]$	$\rho [kg/m^3]$	k
1,5	0,512	0,2	0,7	1,53938	1,225	0,603437

Tabela 1 – Dimensões

Após consulta em Gere & Goodno **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, foram encontrados como limite de escoamento para estes materiais os seguintes valores encontrados na Tabela 2 – Propriedade dos aços.

ASTM - A36 [Mpa]	ASTM-A572 [Mpa]	ASTM-A514 [Mpa]
250	340	700

Tabela 2 – Propriedade dos aços

Como raio e espessura da torre foram usados os seguintes valores, lembrando que a proporção utilizada entre raio e espessura foi 1 para 10.

$R [m]$	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14
$t [m]$	0,01	0,011	0,012	0,013	0,014

Tabela 3 – Dimensões da torre

A partir destes parâmetros, vários cenários de velocidade máxima, que seriam suportados pela torre foram calculados utilizando as fórmulas descritas acima e estão representados na Tabela 4

Aço	Raio da Torre [m]			
	0,1	0,11	0,12	0,13
ASTM-A36	287,4674	331,6482	377,8858	426,0923
ASTM-A572	335,2418	386,765	440,6867	496,9047
ASTM-A514	481,025	554,9536	632,3238	712,9888

Tabela 4 – Relação de velocidades

Para melhor visibilidade foi plotado um gráfico com estes valores. O aço ASTM- A36, cujo limite de escoamento é o mais baixo entre os três citados acima, já é resistente o suficiente para o projeto.

Figura 14 – Gráfico Velocidade x Raio da Torre

Pode-se facilmente notar que as velocidades suportadas pela estrutura, até mesmo a menor delas, é bem acima do necessário. Dessa forma, pode-se concluir que a estrutura não é um fator limitante para a velocidade máxima que a turbina eólica pode suportar.

1.1.1-2 Gerador Elétrico

Sabendo que a estrutura não é o limitador, deve-se escolher um gerador elétrico que se adeque ao projeto da turbina eólica. Em turbinas eólicas de grande escala costuma-se ter uma caixa multiplicadora entre o eixo conectado ao rotor (baixa rotação) e a eixo conectado ao gerador (alta rotação), com relação de transmissão N ($N < 1$).

$$N = \frac{\Omega_r}{\Omega_G} \quad 4.13$$

Entretanto, em turbinas de pequeno porte o acoplamento pode ser feito através de conexão direta, pois as rotações do rotor podem ser altas o suficiente para suprir a velocidade necessária do gerador, ou seja, a relação de transmissão é $N=1$.

Esta característica se deve à relação entre a velocidade angular e o diâmetro do rotor, a qual é inversamente proporcional. Segundo o **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Atlas Eólico – RJ **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, há uma fórmula que fornece aproximadamente a rotação nominal de operação de uma turbina a partir do diâmetro do rotor.

$$rpm = \frac{895}{D} + 6,9 \quad 4.14$$

Para o diâmetro de $D=1,4m$ a rotação do rotor calculada é de $646,2 rpm$, o que resulta em uma velocidade angular de rotação de $\Omega_r = 67,67 rad/s$.

Utilizando a Fórmula 3.10, página 20 que relaciona a velocidade angular do rotor com a velocidade do vento, pode-se calcular a velocidade nominal de operação da turbina eólica.

A velocidade nominal da turbina projetada é $v_{nominal} = 13,5 m/s$.

Os valores de velocidade nominal geralmente variam entre 9,5 m/s e 15 m/s, de forma que a apresentada acima está consistente com a realidade.

Para que a turbina a ser projetada possa ser construída, basta encontrar um gerador elétrico que opere sob condições semelhantes de velocidade de rotação do eixo e de potência nominal.

4.1.4 Potência Nominal

A partir dos parâmetros calculados e dados utilizados, pode-se obter a potência nominal da turbina a ser projetada utilizando a fórmula 3.7, página 18.

A Potência Nominal da turbina é $P_n = 1187,75 \text{ W}$.

Todos estes valores serão de extrema importância para a modelagem do sistema de controle do aerogerador.

4.1.5 Resumo do Projeto

O trabalho em questão está projetando uma turbina eólica, cuja torre será feita de aço A-36, com altura de cubo igual a $H=1,5 \text{ m}$, diâmetro do rotor $D= 1,4 \text{ m}$, gerando uma potência nominal de $P_n = 1187,75 \text{ W}$.

Para estes cálculos foram considerados fator de interferência $a=0,2$ o que resulta em um coeficiente de potência de $C_p = 0,512$ e densidade do ar de $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

5 Modelagem

A modelagem de sistemas é uma ferramenta poderosa para desenvolver modelos abstratos, e então poder simulá-los e analisá-los em função do tempo de forma rápida e eficiente. Atualmente, estes modelos são representados graficamente permitindo que se esquematize o sistema e obtenha-se boa visualização deste como um todo, além das etapas e variáveis nele envolvidas.

A partir dos resultados da simulação, pode-se analisar a influência de cada elemento no sistema e então realizar os ajustes necessários, de forma a atingir os objetivos definidos para este determinado modelo.

Existem diversas técnicas para abordar esta questão e para o presente trabalho, será utilizada a técnica dos Grafos de Ligação.

Esta técnica foi mais ampla- e detalhadamente abordada por Speranza Neto & Ribeiro da Silva, 2005 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

5.1 Grafos de Ligação

A técnica dos Grafos de Ligação é considerada completa em diversos aspectos, em que os principais são a simplicidade, generalidade e facilidade para obtenção de modelos. Este método é caracterizado por algo conhecido como *modularidade*, ou seja, no modelo são definidas “ligações” de entrada e saída de potência entre os elementos. Esta forma de representação possibilita que diversos sistemas, a princípio independentes, possam ser interligados obtendo-se um sistema global capaz de reproduzir todos os detalhes relacionados a cada um de seus subsistemas.

Todos estes sistemas físicos têm como característica comum as leis de conservação de massa e energia, ou seja, estes sistemas interagem de forma que a energia seja transportada de um para o outro. A energia pode ser armazenada ou convertida para outras formas, mas é importante ressaltar que ela jamais será dissipada. Pode-se imaginar que se a energia está sendo alterada de alguma forma em algum lugar, ela também estará sendo modificada da forma oposta em outro.

A potência, que é a variação da energia no tempo flui pelos subsistemas através das portas.

5.1.1 Variáveis de Potência e de Energia

Cada porta tem em si associadas duas Variáveis de Potência: a variável de esforço “*e*” e a variável de fluxo “*f*”. Elas foram assim nomeadas, uma vez que seu produto resulta na potência instantânea que é transferida entre componentes ou sistemas. Esta potência pode ser calculada a partir de:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad 5.1$$

Além destas duas, há também as variáveis de quantidade de movimento “*p*” e de deslocamento “*q*”, chamadas de Variáveis de Energia, pois são calculadas a partir do processo de integração das variáveis de potência. Estas variáveis serão menos utilizadas ao longo do trabalho.

$$p(t) = \int e(t) dt = p_o + \int_0 e(t) dt \quad 5.2$$

E

$$q(t) = \int f(t)dt = q_o + \int_0^t f(t)dt \quad 5.3$$

Todas estas variáveis são generalizadas para que possam representar praticamente todos os sistemas mantendo estas definições. Na Tabela 5, retirada de **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível visualizar quais significados elas possuem para os diferentes sistemas físicos.

DOMÍNIO FÍSICO	ESFORÇO e	FLUXO f	QUANTIDADE DE MOVIMENTO p	DESLOCAMENTO q
MECÂNICO DE TRANSLAÇÃO	Força [N]	Velocidade [m/s]	Quantidade de Movimento [N.s]	Posição [m]
MECÂNICO DE ROTAÇÃO	Toque [N.m]	Velocidade Angular [rad/s]	Quant. de Movimento [N.m.s]	Ângulo [rad]
ELÉTRICO	Voltagem [V]	Corrente [A]	Enlace de Fluxo [V.s]	Carga [C]
HIDRÁULICO	Pressão [Pa]	Vazão Volumétrica [m³/s]	Quant. de Mov. de Pressão [Pa.s]	Volume [m³]
TEMODINÂMICO	Temperatura [K]	Fluxo de Entropia [W/K]	---	Entropia [J/K]
MAGNÉTICO	Força Magneto-motiva [A]	Derivada de Campo [Wb/s]	---	Densidade do Campo [Wb]
DIFUSÃO	Potencial Químico [J/mole]	Fluxo Molar [mole/s]	---	Quantidade [mole]
REAÇÃO QUÍMICA	Afinidade [J/mole]	Taxa de Reação [mole/s]	---	Avanço [mole]
PSEUDO-GRAFO DE LIGAÇÃO TÉRMICO	Temperatura [°C]	Fluxo de Calor [W]	---	Energia [J]
PSEUDO-GRAFO DE LIGAÇÃO FLUIDO	Pressão [Pa]	Vazão em Massa [kg/s]	---	Massa [kg]

Tabela 5 – Variáveis de Potência e Energia em diferentes Domínios Físicos

5.1.2 Elementos Fundamentais

Alguns elementos fundamentais, juntos, são responsáveis por toda a representação gráfica dos mais diferentes sistemas. Segue abaixo uma breve descrição deles.

5.1.2.1 Meia Seta

O elemento mais importante de todos é representação por uma meia seta. Ela indica em que sentido a potência é transferida. As variáveis de esforço são sempre posicionadas

acima ou à esquerda da seta e as variáveis de fluxo em baixo ou à direita, representado na Figura 15.

Figura 15 – Meia Seta

As variáveis de esforço e de fluxo estão sempre presentes nas ligações, entretanto é fisicamente possível controlar apenas uma delas, sendo a outra função da potência. Dessa forma, pode-se retratar essa característica uma como sendo a entrada do sistema e a outra, saída.

Para definir esta relação, atribui-se a *causalidade* entre estas variáveis, ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Causalidade

A seta da direita indica que a variável de fluxo é a entrada e vai de “A” para “B”. Já a seta da esquerda demonstra que a variável de esforço é considerada a variável de entrada, também de “A” para “B”.

É importante ressaltar que a causalidade representa a relação de causa e efeito entre as variáveis e a meia seta indica em qual sentido a potência é positiva.

5.1.2.2 Fontes Ideais

Fontes ideais, que podem ser Fonte de Esforço S_e ou Fonte de Fluxo S_f , são fontes que provém energia ao sistema, de forma ilimitada. A primeira tem como entrada uma variável de esforço e a segunda tem uma variável de fluxo como entrada. O valor fornecido pode ser constante ou seguir alguma função do tempo. Esta energia que é fornecida independe da potência que é necessária ao sistema, conforme Figura 17.

Figura 17 – Fontes de Esforço e de Fluxo

Na imagem acima, a seta da direita representa a fonte de esforço e da esquerda, de fluxo.

5.1.2.3 Resistor

Essencialmente o resistor R é um componente do sistema que dissipa energia deste. Este elemento permite ambas as causalidades. Entretanto, para certos modelos de resistor pode não ser aceita alguma delas. A relação entre esforço e fluxo pode ser descrita por:

$$e = \phi_R(f) \quad 5.4$$

5.1.2.4 Capacitor

O capacitor é um armazenador de energia. Ambas as causalidades também são possíveis aqui, porém preferencialmente usa-se a variável de fluxo como entrada no elemento e esforço é retornado, representado na Figura 18.

Figura 18 – Causalidade preferencial de Capacitores

A equação que descreve esta relação é:

$$e = \frac{1}{C} \int f \cdot dt = \frac{q}{C} \quad 5.5$$

5.1.2.5 Inércia

A inércia também é um componente que armazena energia. Também aceita as duas causalidades, apesar de preferencialmente utilizar-se a variável de esforço como entrada e ter como saída a variável de fluxo, ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Causalidade preferencial da Inércia

Sua equação correspondente é:

$$f = \frac{1}{I} \int e \cdot dt = \frac{P}{I} \quad 5.6$$

5.1.2.6 Transformador

O transformador é um elemento que tem a capacidade de transformar um esforço em um outro esforço e um fluxo em outro fluxo, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Transformador de Fluxo

As equações que representam a dinâmica acima são:

$$e_1 = m e_2 \quad 5.7$$

$$f_2 = m f_1 \quad 5.8$$

O símbolo do transformador de esforço pode ser visualizado na Figura 21.

Figura 21 – Transformador de Esforço

E suas equações são:

$$e_2 = \frac{1}{m} e_1 \quad 5.9$$

$$f_1 = \frac{1}{m} f_2 \quad 5.10$$

5.1.2.7 Girador

O último elemento que falta para modelas usando Grafos de Ligação é o Girador. Este componente tem como função transformar um fluxo em esforço e vice-versa, representado na Figura 22.

Figura 22 – Girador: Fluxo em Esforço

As equações que determinam a dinâmica acima são dada por:

$$e_1 = r f_2 \quad 5.11$$

$$e_2 = r f_1 \quad 5.12$$

E sua representação pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 – Girador: Esforço em Fluxo

E suas equações são:

$$f_1 = \frac{1}{r} e_2 \quad 5.13$$

$$f_2 = \frac{1}{r} e_1$$

5.14

5.2 Modelo da Turbina Eólica

Como base para este trabalho será utilizado o modelo de *Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph* **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, com algumas alterações. O modelo reflete a dinâmica do sistema de uma Turbina Eólica e auxilia a encontrar as equações que serão posteriormente utilizadas para o controle. A Figura 24 mostra as variáveis utilizadas para representar a turbina eólica.

Figura 24 – Modelo de Turbina Eólica

Entretanto, adaptações e simplificações resultaram no seguinte modelo, o qual será utilizado ao longo do trabalho e podem ser observadas na Figura 25.

Figura 25 – Modelo de Turbina Simplificado

Basicamente os componentes relacionados às pás serão encorpados pelos elementos do rotor, ou seja, serão contabilizados em termos numéricos como um componente único, com uma inércia, um amortecimento e um torque aerodinâmico incidindo sobre o rotor.

Na Tabela 6 - Componentes Tabela 6 pode-se visualizar o significado de cada sigla:

SIGLA	DESCRIÇÃO
T_a	Torque Aerodinâmico
J_H	Inércia do Rotor
D_H	Amortecimento do Rotor
$D_{H,GB}$	Amortecimento entre Rotor e Caixa Multiplicadora
$K_{H,GB}$	Rigidez entre Rotor e Caixa Multiplicadora
$J_{GB,1}$	Inércia da Engrenagem 1
$J_{GB,2}$	Inércia da Engrenagem 2
N_g	Relação de Transmissão
$D_{GB,G}$	Amortecimento entre Caixa Multiplicadora e Gerador
$K_{GB,G}$	Rigidez entre Caixa Multiplicadora e Gerador
J_G	Inércia do Gerador
D_G	Amortecimento do Gerador
T_{em}	Torque Eletromagnético

Tabela 6 - Componentes

5.3 Gráfico de Ligação da Turbina Eólica

Em Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é apresentado como modelo para uma Turbina Eólica o seguinte Gráfico de Ligação, que sofreu pequenas modificações apenas para ter representação horizontal e está representado na Figura 26.

Figura 26 – Grafo de Ligação simplificado

5.3.1 Equações da Dinâmica do Sistema

Nesta seção, as equações serão associadas à sua representação no Grafo de Ligação, de forma que será mais facilmente compreensível a origem das mesmas.

5.3.1.1 Rotor

Na Figura 27 – Grafo de Ligação: Rotor pode-se visualizar a representação apenas do rotor da turbina.

Figura 27 – Grafo de Ligação: Rotor

A fonte de esforço S_e caracteriza o Torque Aerodinâmico causado pela Força do vento ao atingir as pás do aerogerador. Analiticamente, esta grandeza pode ser definida como:

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad 5.15$$

Esta fórmula será utilizada posteriormente para o controle do Sistema, variando tanto o ângulo pitch β como a relação das velocidades λ .

A junção 1 indica que todas as velocidades aí representadas são iguais em módulo, ou seja, a velocidade do vento que atinge o rotor, influencia com mesma intensidade a inércia I , que armazena potência, e o amortecimento do rotor, aqui representado pela resistência R , pois é um elemento que dissipa potência.

Analiticamente, $v_1 = v_2 = v_3 = v_4$.

A junção 1 também simboliza a possível soma ou subtração dos esforços. Pelo sentido das setas pode-se concluir como os esforços se relacionam. O resultado seria $e_4 = e_1 - e_2 - e_3$, ou seja, a Potência que é transmitida pelo eixo e_4 é a Potência causada pelo vento e_1 menos a potência dissipada e armazenada pelo amortecedor e inércia do rotor, respectivamente.

Antes de analisar a equação que descreve esta dinâmica, é necessário entender um pouco melhor a dinâmica do Eixo de Transmissão, que liga o rotor e a Caixa Multiplicadora.

5.3.1.2 Eixo de Transmissão: Rotor – Caixa Multiplicadora

O modelo do primeiro Eixo de Transmissão pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Grafo de Ligação: Eixo de Transmissão 1

A junção 0 indica que os esforços, que neste domínio representam torque, têm a mesma intensidade, ou seja, o torque proveniente do rotor é inteiramente transmitido pelo eixo. Nota-se que esta junção 0 está ligada à 3 junções 1, o que indica que ela está vinculada a 3 fluxos (3 velocidades). A junção 1 da esquerda representa a velocidade proveniente do rotor, a da direita representa a velocidade que atinge a caixa multiplicadora e a de cima representa a diferença entre as duas. Esta diferença é causada devido à perda de potência causada pelo amortecimento R e rigidez C do eixo.

Sendo assim, a velocidade que é transmitida para a caixa multiplicadora é $v_8 = v_4 - v_5$.

A equação, que descreve a dinâmica destes dois blocos descritos acima, reproduz que o movimento do rotor é resultado do Torque Aerodinâmico ocasionado pela força do vento e que esta rotação é diminuída pelos amortecimentos e rigidez, que estão acoplados ao rotor. A Equação 5.16 caracteriza este resultado.

$$J_H \dot{\Omega}_H = T_a - D_H \Omega_H - D_{H,GB} (\Omega_H - \Omega_{GB}) - K_{H,GB} \theta_1 \quad 5.16$$

Onde:

$\dot{\Omega}_H$ é a aceleração angular do rotor

Ω_H é a velocidade angular do rotor

Ω_{GB} é a velocidade angular da caixa multiplicadora

θ_1 é o ângulo de torção do eixo 1

As demais variáveis e suas descrições encontram-se na Tabela 6 - Componentes.

Também está relacionada a esta dinâmica a seguinte equação:

$$\dot{\theta}_1 = \Omega_H - \Omega_{GB} \quad 5.17$$

Em que,

$\dot{\theta}_1$ é a diferença de velocidade entre rotor e caixa multiplicadora

5.3.1.3 Caixa Multiplicadora

A dinâmica da Caixa Multiplicadora pode ser representada pelo seguinte Grafo de Ligação da Figura 29.

Figura 29 - Grafo de Ligação: Caixa Multiplicadora

Como já previamente esclarecido, a junção 1 indica que o módulo das velocidades é igual e que os esforços se somam de alguma forma. A junção 1 da esquerda indica que o esforço que alcança a caixa multiplicadora e_{10} é resultado do torque proveniente do eixo de transmissão e_8 menos o que é armazenado pela Inércia do próprio componente J_{GB} , analiticamente $e_{10} = e_8 - e_9$.

O transformador tem a capacidade de transformar o fluxo f_{10} em outro fluxo f_{11} , neste caso considerando a relação de transmissão N_g , em que a velocidade é acelerada. A junção 0, como se sabe, simboliza que estes esforços são iguais em módulo e que estes fluxos de certa forma se somam e subtraem. A junção 1 da direita indica a velocidade que alcança o gerador, que será melhor descrito a seguir, e a última junção 1 representa a diferença de velocidade entre a caixa multiplicadora e o gerador. Novamente esta

diferença é resultado do armazenamento e dissipação de potência, ocasionados pela rigidez $K_{GB,G}$ e amortecimento $D_{GB,G}$ do eixo de transmissão.

A equação que descreve esta dinâmica é dada por:

$$J_{GB} \dot{\Omega}_{GB} = D_{H,GB}(\dot{\Omega}_H - \dot{\Omega}_{GB}) + K_{H,GB}\theta_1 - D_{GB,G}(N_g\Omega_{GB} - \Omega_G) - K_{GB,G}N_g\theta_2 \quad 5.18$$

E

$$\dot{\theta}_2 = N_g\Omega_{GB} - \Omega_G \quad 5.19$$

Onde,

Ω_G é a velocidade angular do gerador

θ_2 é o ângulo de torção do eixo 2

5.3.1.4 Gerador Elétrico

A representação do gerador utilizando Grafo de Ligação pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Grafo de Ligação: Gerador Elétrico

O resultado concluído a partir do grafo acima, é que há potência saindo do sistema total na forma de Fonte de Esforço. Ou seja, o sistema “Turbina Eólica” fornece energia na forma de Torque eletromagnético. O esforço e_{18} é resultado do esforço e_{15} transmitido pelo eixo subtraído pelo o que é armazenado pela Inércia e dissipado pelo amortecimento do gerador.

A equação que representa esta dinâmica é:

$$J_G \dot{\Omega}_G = -T_{em} + D_{GB,G}(N_g \dot{\Omega}_{GB} - \dot{\Omega}_G) + K_{GB,G}\theta_2 - D_G \dot{\Omega}_G \quad 5.20$$

5.3.1.5 Visão Global

Uma forma interessante de visualizar o sistema como um todo é como, de fato, cada componente de cada subsistema influencia no outro. Sendo assim, na figura abaixo pode-se ter uma visão de cada elemento separadamente e, simultaneamente, juntos, ilustrado na Figura 31.

Figura 31 – Sistema Global e Subsistemas

6 Controle

Como anteriormente já foi explicado, o controle da turbina eólica realizado por meio do controle do ângulo de suas pás é essencial para que a máquina seja o mais eficiente possível ao converter a energia cinética presente no vento em energia mecânica, a qual por fim será transformada em energia elétrica.

No presente trabalho será utilizada o Software Matlab, que possui interação com o Simulink. Este, por sua vez, é uma ferramenta de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, cuja interface é através de diagramação gráfica de blocos, sendo assim uma excelente forma de montar o sistema de controle.

6.1 Modelo de Controle

O modelo representado na Figura 32 é detalhado para que a simulação possa ser feita.

Figura 32 – Sistema de Controle

Para poder controlar o sistema corretamente é importante ter bem definido e compreendido quais são as variáveis de entrada e saída de cada subsistema do modelo. Com este objetivo, será feita uma breve explicação para cada bloco.

6.2 Variáveis de Entrada e Saída

6.2.1 Gerador

Como a turbina eólica projetada não possui freios, é desejado que a velocidade do vento seja controlada para que, se necessário, o motor possa gerar como saída, um torque T_{em}

para frear a máquina. Para verificar se o torque está sendo gerado, o sistema elétrico tem como entrada um torque de referência.

6.2.2 Engrenagens

As engrenagens conectam as pás da turbina com o gerador e são necessárias para que o gerador alcance a velocidade de rotação necessária para seu funcionamento, a partir da velocidade atingida por meio do vento. Em turbinas de grande porte esta relação de transmissão possui papel ainda mais importante, uma vez que quanto maior o raio do rotor, menor a velocidade angular das pás. As entradas para este bloco são ambos os torques gerados nas pás e no gerador. Em contrapartida, as engrenagens têm como saída a velocidade de rotação Ω_r e Ω_G .

6.2.3 Pás

As pás, que são responsáveis por captar a energia cinética proveniente do vento, transformam esta energia em torque. A quantidade convertida depende do ângulo pitch β e relação de velocidades λ . Levando estas premissas em consideração, conclui-se que a velocidade do vento, o ângulo pitch β de referência e a velocidade angular do rotor, usada no cálculo de λ , sendo as duas últimas utilizadas para o controle das pás, são entradas desde subsistema. Como saída, é fornecido o torque aerodinâmico T_a .

6.2.4 Sistema de Controle

O controle do sistema é realizado através do Simulink, extensão do Software Matlab. Para que este seja realizado é necessário, que a velocidade do vento, a diferença velocidade de rotação das pás e do gerador e o ângulo pitch β sejam entradas do sistema. Como resultado, são fornecidos o ângulo pitch e o torque do gerador, ambos de referência, como saídas.

6.3 Dinâmica do Sistema

O Matlab foi elaborado para ter alto rendimento com cálculo numérico de matrizes. Como o sistema de controle é complexo, será utilizada a forma matricial das equações que descrevem a dinâmica do sistema para obter-se melhores resultados durante a

simulação. A seguir, pode-se rever as equações do sistema utilizado, para melhor compreensão das matrizes, que descrevem a dinâmica.

$$J_H \dot{\Omega}_H = T_a - D_H \Omega_H - D_{H,GB}(\Omega_H - \Omega_{GB}) - K_{H,GB} \theta_1 \quad 5.16$$

$$J_{GB} \dot{\Omega}_{GB} = D_{H,GB}(\dot{\Omega}_H - \dot{\Omega}_{GB}) + K_{H,GB} \theta_1 - D_{GB,G}(N_g \Omega_{GB} - \Omega_G) - K_{GB,G} N_g \theta_2 \quad 5.18$$

$$J_G \dot{\Omega}_G = -T_{em} + D_{GB,G}(N_g \dot{\Omega}_{GB} - \dot{\Omega}_G) + K_{GB,G} \theta_2 - D_G \dot{\Omega}_G \quad 5.20$$

Escrevendo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Omega}_H \\ \dot{\Omega}_{GB} \\ \dot{\Omega}_G \\ \Omega_H \\ \Omega_{GB} \\ \Omega_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D_H - D_{H,GB}}{J_H} & \frac{D_{H,GB}}{J_H} & 0 & \frac{-K_{H,GB}}{J_H} & \frac{K_{H,GB}}{J_H} & 0 \\ \frac{D_{H,GB}}{J_{GB}} & \frac{-D_{H,GB} - D_{GB,G} N_g}{J_{GB}} & \frac{D_{GB,G}}{J_{GB}} & \frac{K_{H,GB}}{J_{GB}} & \frac{-K_{H,GB} - K_{GB,G} N_g^2}{J_{GB}} & \frac{K_{GB,G} N_g}{J_{GB}} \\ 0 & \frac{D_{GB,G} N_g}{J_G} & \frac{-D_{GB,G} - D_G}{J_G} & 0 & \frac{K_{GB,G} N_g}{J_G} & \frac{-K_{GB,G}}{J_G} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_H \\ \Omega_{GB} \\ \Omega_G \\ \delta_H \\ \delta_{GB} \\ \delta_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_G} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_{em} \end{bmatrix}$$

6.1

O conjunto de operações destas matrizes representam a dinâmica do sistema da turbina eólica, e pode ser simplificado para $\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U$

Pode-se perceber que o ângulo pitch β e a relação de velocidades λ não estão presentes em nenhuma das matrizes acima. Estas variáveis estão incluídas no torque aerodinâmico T_a , descrito pela Equação 5.15, da página 43.

6.4 Coeficiente de Potência C_p

O coeficiente de potência indica quanto de energia está sendo efetivamente aproveitado ao passar pelo rotor da turbina e ele varia de acordo com o ângulo pitch β das pás e também com a relação de velocidades λ .

Esta relação é própria de cada turbina, pois considera a aerodinâmica das pás entre outros fatores. Por ser um cálculo complexo, optou-se pela pesquisa de uma função analítica disponível ao público e foi encontrada a seguinte relação, proposta por (Heier, 1998).

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 / \lambda_i} \quad 6.2$$

Onde,

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad 6.3$$

Os coeficientes propostos por (Heier, 1998) foram ajustados ao longo dos anos para melhor se adequar na indústria. Vale lembrar que estes valores foram desenvolvidos para turbinas eólicas de grande porte e que esta relação talvez não seja a mais adequada possível para aerogeradores de pequena escala.

Para o presente trabalho foram utilizados os seguintes coeficientes, fornecidos por (Ackerman, 2005) na Tabela 7.

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
0,73	151	0.58	0.002	2.14	13.2	18.4	0.02	-0.003

Tabela 7 – Coeficientes das equações das curvas de Potência

A partir das equações de estado e da curva de Potência foi desenvolvido um modelo no Simulink para reproduzir esta dinâmica.

6.5 Simulação

Os parâmetros utilizados para a simulação foram baseados nos valores apresentados no trabalho *Modelling and Control of a Small Scale Wind Turbine* **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Dados como inércia, amortecimento e rigidez presentes em turbinas, não são de livre acesso para a maioria de fabricantes de máquinas, além de que para calculá-los são necessárias informações como geometria, material, entre outras tornando-se um trabalho complexo, que não é o foco para este projeto. Entretanto, não foi possível comprovar que os parâmetros utilizados fossem os mais adequados para o presente trabalho.

Para a simulação foi desenvolvido o modelo de Simulink, ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Modelo Simulink

As equações de estado que descrevem a dinâmica do sistema estão descritas no bloco “State-Space” e a função do Coeficiente de Potência, no bloco “Cp”. Pode-se notar que há um comportamento cíclico no modelo. A velocidade angular do rotor “omegaH”, que é calculada dinamicamente a partir dos dados de entrada de velocidade do vento, é uma das variáveis utilizada no controle do ângulo Pitch e altera simultaneamente os valores de C_p . Como discutido, o coeficiente de Potência é utilizado para calcular o Torque aerodinâmico gerado nas pás e, como apresentado anteriormente, é uma das variáveis

de entrada para o cálculo da velocidade angular do rotor, configurando assim um *loop* no sistema.

O Matlab não foi capaz numericamente de solucionar o modelo, uma vez que os resultados apresentados não representavam o esperado.

Foram pesquisados novos modelos, tentados novos parâmetros, mas os resultados ainda assim não foram satisfatórios.

7 Resultados

O modelo apresentado não foi capaz de representar um sistema de controle adequado. Por outro lado, pôde-se gerar gráficos que representem as curvas típicas do modelo, com base na fundamentação teórica que governa a dinâmica. Na Figura 34 é possível observar a Curva de Potência e analisar o resultado.

Figura 34 – Curva de Potência

Esta curva mostra a variação cúbica da Potência gerada a partir da velocidade do vento e fica claro o momento que esta potência é mantida constante ao atingir a velocidade nominal de $v_n = 13,5 \text{ m/s}$ gerando a potência nominal de $P_n = 1187,75$, apesar do aumento da velocidade. Também pode-se notar que a potência é nula antes que a velocidade atinja 2 m/s e após ultrapassar 25 m/s, como se esperava.

Na Figura 35 está representada a curva que ilustra a relação da velocidade angular do rotor com a velocidade do vento. Nota-se que ela tem um comportamento semelhante à Curva de Potência, mantendo a rotação constante a 67,7 rad/s após a velocidade nominal ser atingida e então sendo levada a zero, o que representa o estado parado da máquina. Também é perceptível que só há rotação após o atingimento da velocidade mínima de 2m/s. Nota-se também a relação linear entre as duas velocidades, característica contemplada pela equação 3.8.

Figura 35 – Relação Velocidade Angular x Velocidade do Vento

Também foi gerada a curva que relaciona o Coeficiente de Potência com a velocidade do vento e pode ser visualizada na Figura 36.

Figura 36 – Gráfico C_p x Velocidade do Vento

Observa-se que o Coeficiente de Potência aumenta até atingir seu valor máximo próximo a 0,5. Como era de se esperar, sua curva decai após atingir este ponto, o que explica a Potência gerada no rotor não aumentar, com o acréscimo da velocidade do vento. Este decaimento é o responsável pelo valor constante da Potência.

Outro resultado importante é a curva que relaciona o Coeficiente de Potência C_p com a Relação de Velocidades λ . Foram geradas curvas para 5 diferentes ângulos Pitch β , que estão ilustradas na Figura 37.

Figura 37 – Relação C_p x Relação de Velocidades

Analizando o gráfico, pode-se concluir que, para o ângulo Pitch $\beta=0$ os valores do Coeficiente de Potência são maiores e vão decaindo à medida que o ângulo aumenta.

7.1 Conclusão

Após este projeto pôde-se confirmar a grande influência que o Coeficiente de Potência e o ângulo Pitch têm sobre a Potência que deve ser gerada em uma turbina eólica. Também pôde-se concluir que o sistema de controle do sistema é essencial para otimizar a eficiência do aerogerador, mas que o modelo e os parâmetros empregados neste trabalho devem ser aprimorados para melhores resultados.

A busca contínua pelo melhoramento dos processos e modelos é uma das funções essenciais de engenheiros, de forma que este trabalho cumpriu seu objetivo até certo ponto, mas que continuará a ser aperfeiçoado.

8 Bibliografia

- [1] (Dezembro de 2016). Fonte: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_011_2007.pdf
- [2] (Dezembro de 2016). Fonte: <https://evolucaoalp.files.wordpress.com/2012/06/imagem.jpg>
- [3] (Dezembro de 2016). Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap7/cap7-3.html>
- [4] (Dezembro de 2016). Fonte: http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2013/dimensionamento_das_pas.pdf
- [5] (Dezembro de 2016). Fonte: http://www.solar.coppe.ufrj.br/eolica/eol_txt.htm
- [6] Ackerman. (2005). 563.
- [7] Antonelli, J. (s.d.). *Reduced order modeling of wind turbines in MatLab for grid integration and control studies*. Department of Wind Energy, Gotland University.
- [8] Atlas Eólico - Rio de Janeiro. (Dezembro de 2016). Fonte: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf
- [9] Atlas Eólico - RJ. (s.d.).
- [10] Bakka, T., & Reza Karimi, H. (s.d.). *Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph*. University College of Engineering & Technology, The Islamia University of Bahawalpur, Pakistan.
- [11] Bertelsen, A., Hansen, T., Pedersen, R., Schwensen, J., & Sivabalan, S. (2011). *Em D. o.-A. University, Modelling and Control of a Small Scale Wind Turbine*.
- [12] Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. (s.d.). Fonte: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=3
- [13] (2016 de Dezembro). Fonte: <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>
- [14] *Dinâmica Planetária de Tempo e Clima*. (Dezembro de 2016). Fonte: <http://www.iag.usp.br/siae98/meteorologia/dinamica.htm>
- [15] *Eletrovento - Energia Alternativa*. (Dezembro de 2016). Fonte: <http://www.eletrovento.com.br/>
- [16] Engenheiros Associados - Soluções em Engenharia Elétrica. (Dezembro de 2016). Fonte: http://www.engenheirosassociados.com.br/artigos/generalidade_energia_eolica.php
- [17] *Fontes Alternativas de Energia*. (Dezembro de 2016). Fonte: http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores/178/arquivos/Fontes%20Alternativas/atividade_sit_eolicos.pdf
- [18] Geo Conceição. (Dezembro de 2016). Fonte: <http://geoconceicao.blogspot.com.br/2012/04/circulacao-da-atmosfera.html>
- [19] Gere, J., & Goodno, B. (s.d.). *Mecânica dos Materiais*, 7ª Edição.
- [20] Heier. (1998).
- [21] <http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1454.pdf>. (Dezembro de 2016).
- [22] *Katabatic Power*. (s.d.). Fonte: <http://es.ucsc.edu/~jnoble/wind/extrap/>
- [23] Macêdo, A. V. (Junho de 2012). *Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina Eólica Utilizando Lógica Fuzzy*.
- [24] MathWorks. (Dezembro de 2016). Fonte: <https://www.mathworks.com/help/aeroblks/windshearmodel.html>
- [25] *Revista Brasileira de Ensino de Física*. (2016 de Dezembro). Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172014000400007

- [26] Speranza Neto, M., & Ribeiro da Silva, F. (2005). *MODELAGEM e ANÁLISE de SISTEMAS DINÂMICOS*.
- [27] Ventos Brasil Comércios e Representações Ltda. (Dezembro de 2016). Fonte: <http://www.ventosbrasil.com/historico.html>