



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

MANASSÉS MEDEIROS ROCHA

**ESTUDO DE UM CONTROLADOR *FUZZY* APLICADO A UM
SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

**MOSSORÓ – RN
2017**

MANASSÉS MEDEIROS ROCHA

**ESTUDO DE UM CONTROLADOR *FUZZY* APLICADO A UM
SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Patrocínio da Silva – UFRN

**MOSSORÓ
2017**

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira © Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R Rocha, Manassés Medeiros.
672e Estudo de um Controlador Fuzzy aplicado a um sistema eólico de velocidade variável conectado à rede elétrica / Manassés Medeiros Rocha. - 2017.
76 f. : il.
Orientador: José Patrocínio da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, 2017.
1. Energia Eólica. 2. Fonte renovável. 3. Lógica Fuzzy. 4. PMSG. I. Silva, José Patrocínio da, orient.
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MANASSÉS MEDEIROS ROCHA

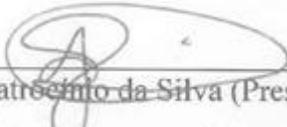
**ESTUDO DE UM CONTROLADOR *FUZZY* APLICADO A UM
SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL
CONECTADO À REDE ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – PPGSCA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

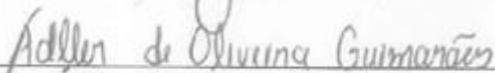
Orientador(a): Prof. Dr. José Patrocínio da Silva – UFRN

Defendida em: 30 / 03 / 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Patrocínio da Silva (Presidente e Orientador - UFRN)



Prof. Dr. Adler de Oliveira Guimarães (Membro Interno - UFERSA)



Prof. Dr. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto (Membro Externo - IFRN)

DEDICATÓRIA

A Deus por sua infinita misericórdia.

A minha esposa Elizane Regina Teixeira de Mendonça Rocha, por toda paciência que teve durante a elaboração deste trabalho.

A minha mãe, Maria da Conceição Carlos de Medeiros Rocha, por ter me incentivado. Sem ela nada seria possível.

Ao meu pai, Francisco Aquino da Rocha, por todo ensinamento e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que se fez presente e mais uma vez permitiu a realização de um sonho em minha vida.

A minha Esposa, Elizane Regina Teixeira de Mendonça Rocha, por sempre estar pronta para me aconselhar e apoiar.

Aos meus pais Francisco Aquino da Rocha e Maria da Conceição Carlos de Medeiros Rocha, pelo amor, carinho, incentivo e por nunca terem se negado a investir nos meus estudos.

Aos meus irmãos Mateus Medeiros Rocha e Ismaiane Medeiros Rocha, por terem me apoiado e incentivado em todos os momentos.

A Família Garcia e a Família Rocha, minha Família. Minhas Avós, tios, primos e sobrinhos.

A meu orientador, José Patrocínio da Silva, pela sabedoria com que me instruiu a fazer o presente trabalho.

A Francisco das Chagas Barbosa de Sena, pela disponibilidade e coorientação, necessários para o desenvolvimento do presente trabalho.

Ao professor Idalmir de Souza Queiroz Júnior, pela preocupação com todos que fazem parte do PPGSCA, por seu ensinamento, tanto profissional quanto pessoal, um homem muito sábio e que me inspira.

Aos Professores Marcelo Roberto Bastos Guerra Vale, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella Guerra, Elmer Rolando Llanos Villarreal e Antônio Ronaldo Gomes Garcia, pelo aprendizado nas disciplinas ministradas.

A todos os meus amigos, em especial os residentes da vila acadêmica, casa 09, pelo apoio e do LASIC.

A Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA, pela disponibilidade da estrutura e pelo ensino de qualidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação (PPGSCA), através de seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado.

A CAPES pelo suporte financeiro.

EPÍGRAFE

Pois o Senhor é quem dá sabedoria; de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento.

(Provérbios 2:6)

RESUMO

A energia eólica é uma fonte renovável que tem crescido em aplicação e desenvolvimento tecnológico. Além do mais, a geração de eletricidade a partir desses sistemas não compromete o meio ambiente como os sistemas tradicionais como, por exemplo, as gerações hidráulica e térmica de energia elétrica. Responsável por captar e converter as energias dos ventos em energia elétrica, a turbina eólica é o principal componente dos sistemas eólicos de geração de eletricidade. Devido ao comportamento não linear do vento, o desenvolvimento de um modelo matemático que descreva o comportamento de tal sistema é uma tarefa complexa e, algumas vezes, impraticável. Contudo, algumas aplicações envolvendo sistemas de controle moderno podem ser utilizados com o objetivo de otimizar o aproveitamento do vento. Uma possibilidade é a utilização de um sistema de controle baseado em Lógica *Fuzzy*, uma vez que essa técnica não requer o detalhamento matemático do sistema. Desse modo, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de um Controlador *Fuzzy* aplicado a um sistema eólico de velocidade variável com gerador síncrono de ímãs permanentes (do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator* - PMSG) conectado à rede. O foco principal, foi a utilização do sistema para simular uma carga real composta pela rede para escoamento da energia gerada. Verificou-se o desempenho do Controlador *Fuzzy* quando comparado ao de um Controlador Proporcional Clássico. Os resultados obtidos mostram que o Controle *Fuzzy* apresenta uma maior eficiência e aumenta a capacidade de geração de potência com redução no tempo de acomodação e menor erro em regime permanente.

Palavras-Chave: Energia Eólica. Fonte renovável. Lógica *Fuzzy*. PMSG.

ABSTRACT

Wind energy is a renewable source that has grown in application and technological development. Moreover, the generation of electricity from these systems does not compromise the environment as traditional systems such as the hydraulic and thermal generation of electricity. Responsible for capturing and converting wind energy into electricity, the wind turbine is the main component of wind power generation systems. Due to the nonlinear wind behavior, the development of a mathematical model that describes the behavior of such a system is a complex and sometimes impractical task. However, some applications involving modern controls systems can be used with the aim of optimizing the use of wind. One possibility is the use of a control system based on Fuzzy Logic, since this technique does not require the mathematical detailing of the system. Thus, this work aims to analyze the behavior of a Fuzzy Controller applied to a variable-speed wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG) connected to the grid. The main focus was the use of the system to simulate a real load composed by the network to flow the generated energy. The performance of the Fuzzy Controller was verified when compared to that of a Classical Proportional Controller. The results show that the Fuzzy Control presents a higher efficiency and increases the capacity of power generation with reduction in the time of accommodation and less error in permanent regime.

Keywords: Wind Energy. Renewable source. Fuzzy Logic. PMSG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição geral dos ventos.....	27
Figura 2 - Curva típica de potência de turbinas eólicas.....	29
Figura 3 - Etapa de conversão de um SCEE.....	29
Figura 4 - Componentes de um Aerogerador	30
Figura 5 - Fluxo de ar através de uma área transversal A	33
Figura 6 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.....	34
Figura 7- (a) Turbina Eólica de eixo horizontal; (b) Turbina eólica de eixo vertical.....	37
Figura 8 - (a) Turbina de <i>downwind</i> ; (b) Turbina de <i>upwind</i>	38
Figura 9 - Atuação das forças aerodinâmicas sobre a pá de um rotor	39
Figura 10 – (a) Fluxo de ar aderente ao perfil da pá (b) Fluxo separado (estol) em volta do perfil	40
Figura 11 - Classificação das configurações utilizadas em sistemas eólicos	42
Figura 12 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação binária.....	45
Figura 13 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação <i>Fuzzy</i>	45
Figura 14 - Função de pertinência dos conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B	47
Figura 15 - Resultado da união entre os conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B.....	48
Figura 16 - Resultado da intersecção entre os conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B.....	48
Figura 17 - Resultado do complemento entre os conjuntos <i>Fuzzy</i> A e B.....	49
Figura 18 - Estrutura geral de um sistema <i>Fuzzy</i>	50
Figura 19 - Função de pertinência e variáveis linguísticas.....	51
Figura 20 - Esquema Inferência Mamdani de duas regras	53
Figura 21 - Esquema Inferência Takagi-Sugeno de duas entradas.....	54
Figura 22 - Esquema Inferência Tsukamoto.....	55
Figura 23 - Exemplo do método de Defuzzificação CAA.....	55
Figura 24 – Diagrama de blocos de um sistema eólico conectado à rede elétrica	57
Figura 25 - Sistema eólico conectado à rede elétrica	58
Figura 26 – Conversor CA/CA.....	59
Figura 27 - Controlador <i>Pitch Fuzzy</i> implementado no Simulink.....	60
Figura 28 - Controlador <i>Pitch</i> Clássico implementado no <i>Simulink</i>	60
Figura 29 – Função de pertinência da entrada do controlador: Erro de velocidade do rotor ...	61

Figura 30 – Função de pertinência da entrada do controlador: Derivada do erro da velocidade do rotor	61
Figura 31 - Função de pertinência da saída do controlador: ângulo de <i>Pitch</i>	62
Figura 32 - Visualização da superfície de controle	63
Figura 33 - Velocidade do vento em função do tempo	65
Figura 34 - Resposta do Controle <i>Pitch</i> Clássico	66
Figura 35 - Resposta do Controle <i>Pitch Fuzzy</i>	66
Figura 36 - Comparativo entre as potências geradas	67
Figura 37 - Comparativo entre os conjugados mecânicos	68
Figura 38 - Comparativo entre as velocidades mecânicas do rotor	69
Figura 39 – Tensões de Linha na saída do conversor	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada e a previsão de crescimento da fonte eólica	26
Gráfico 2 - Emissão de CO ₂ evitadas por mês em 2014.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos ventos em função de sua velocidade: escala Beaufort de ventos	28
Tabela 2 - Coeficientes das equações das curvas de potência	36
Tabela 3 - Comparação entre turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical	37
Tabela 4 - Base de regras para o Controlador <i>Pitch Fuzzy</i>	62
Tabela 5 - Comparativo entre as potências geradas	67
Tabela 6 - Comparativo entre os conjugados mecânicos	69
Tabela 7 - Comparativo entre as velocidades mecânicas do rotor	69

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área da secção transversal do cilindro
A_1	Área transversal do volume de vento de entrada na turbina
A_2	Área transversal do volume de vento de saída
a.C.	Antes de Cristo
ABEEÓLICA	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AG	Algoritmos Genéticos
CAA	Centro da Área
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
C_p	Coefficiente de potência
CPC	Controlador Proporcional Clássico
d.C.	Depois de Cristo
<i>diffErro</i>	Derivada do Erro
DFIG	<i>Doubly Fed Induction Generator</i>
E	Energia cinética (joules)
<i>Erro</i>	Erro entre a velocidade atual do rotor e a referência
IA	Inteligência Artificial
LF	Lógica <i>Fuzzy</i>
m	Massa do ar
MA	Método das Alturas
MM	Média dos Máximos
NL	Negativo Grande
NM	Negativo Médio
NS	Negativo Pequeno
P	Controlador Proporcional
P	Potência disponível no vento
PI	Controlador Integral
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
<i>pitchAngle</i>	Ângulo <i>pitch</i> de saída

PL	Positivo Grande
PM	Positivo Médio
P_{mec}	Potência Mecânica
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PS	Pouco Positivo
pu	Por unidade
R	Raio das pás
RN	Redes Neurais
SCEE	Sistemas de Conversão de Energia Elétrica
SCIG	<i>Squirrel Cage Induction Generator</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
t	Tempo (s)
T_{mec}	Conjugado Mecânico
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
U	Universo de discurso
v	Velocidade do vento
V	Velocidade do vento no nível das pás
V_1	Velocidade do vento de entrada da turbina
V_2	Velocidade do vento de saída da turbina
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i>
WRSG	<i>Wound Rotor Synchronous Generators</i>
ZE	Zero
β	Ângulo de passo
λ	Razão de velocidade na ponta das pás da turbina eólica
μ	Grau de pertinência
μ_A	Função de pertinência do Conjunto <i>Fuzzy</i> A
μ_B	Função de pertinência do Conjunto <i>Fuzzy</i> B
$\mu_{A \cap B}(x)$	Espaço de representação da intersecção <i>Fuzzy</i>
$\mu_{\bar{A}}(x)$	Espaço de representação do complemento <i>Fuzzy</i>
$\mu_{A \cup B}(x)$	União <i>Fuzzy</i> aplicado aos conjuntos A e B
\dot{m}	Taxa de variação da massa

ρ	Massa específica do ar ao nível do mar
ω_{ref}	Velocidade mecânica de referência do rotor
ω_{rotor}	Velocidade mecânica do rotor

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE GRÁFICOS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 PROBLEMAS E HIPÓTESES DO TRABALHO	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.3 JUSTIFICATIVA	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2. CONCEITOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA.....	25
2.1 ENERGIA EÓLICA	25
2.2 O VENTO	26
2.3 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA (SCEE)	29
2.4 AEROGERADORES E SEUS COMPONENTES.....	30
2.5 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO	31
2.6 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS TURBINAS EÓLICAS	36
2.6.1 Classificações das turbinas	36
2.6.2 Aerodinâmica das pás	39
2.6.3 Controle de potência.....	39
2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS SCEE EM FUNÇÃO A VELOCIDADE DE OPERAÇÃO: FIXA E VARIÁVEL	41
3. LÓGICA FUZZY.....	43
3.1 CONJUNTOS FUZZY E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	44
3.2 OPERAÇÃO COM CONJUNTOS FUZZY	47
3.3 ESTRUTURA DO SISTEMA FUZZY.....	49
3.3.1 Fuzzificação	50
3.3.2 Base de regras	51
3.3.3 Sistemas de Inferência Fuzzy	52
3.3.4 Defuzzificação	55
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1 SISTEMA EÓLICO UTILIZADO	56

4.2	CONSTRUÇÃO DOS CONTROLADORES	59
4.3	ESCOLHA DOS CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	60
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

A energia proveniente dos ventos vem sendo utilizada há vários séculos pelo homem em diferentes aplicações, tais como: aproveitamento da força mecânica dos ventos para impulsionar velas acopladas a embarcações; moinhos de grãos; e bombeamento de água. Por consequência da crise do petróleo na década de 70, a utilização dessa energia tornou-se uma alternativa para a geração de eletricidade. No Brasil, a energia eólica é uma fonte de geração complementar, mas tem-se observado um aumento crescente de sua participação na matriz energética. Esse fato deve-se, principalmente, ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) (BRASIL, 2005).

Normalmente, as turbinas utilizadas para a geração de energia elétrica são de eixo horizontal. Esse modelo pode ser classificado em dois tipos, a saber: sistemas de velocidade fixa; e sistemas de velocidade variável. O sistema de velocidade variável tem sido o mais utilizado, devido conferir melhoria na qualidade da energia gerada e por possuir maior faixa de operação (SENA, 2015).

Os sistemas eólicos também podem ser classificados quanto à conexão em três tipos, são eles: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede elétrica. Os sistemas interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, toda energia gerada é entregue à rede elétrica (CRESESB, 2008).

É importante destacar que ventos de intensidade elevada podem comprometer a estrutura física e o funcionamento das turbinas. Por estes motivos, essas turbinas possuem sistemas de controles que buscam evitar ou minimizar esses efeitos prejudiciais. Existem dois tipos de controle, a saber: controle de *pitch*; e controle por *estol*. No controle *estol*, a inclinação da pá é mantida fixa com certo ângulo de ataque, sendo que as pás não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. Diferentemente, tem-se que através do controle de *pitch* é possível movimentar continuamente as pás, buscando obter o melhor desempenho para uma determinada velocidade de vento (MACÊDO, 2012).

Uma das dificuldades para aplicação de sistemas de controle clássico em sistemas eólicos refere-se ao comportamento não linear do vento, o que dificulta ou inviabiliza a obtenção de um modelo matemático preciso. Para contornar essa dificuldade, pode-se utilizar um conjunto de regras (Lógica *Fuzzy*) para obtenção do algoritmo de controle. Os Controladores *Fuzzy* tratam igualmente sistemas lineares e não lineares, e são capazes de

controlar sistemas multivariáveis complexos. Além disso, não requererem o modelo matemático do processo a ser controlado para atuar eficientemente em um sistema específico (JÚLIO, 2010).

Nesse trabalho, o objetivo principal é analisar o comportamento de um Controlador *Fuzzy* aplicado a um sistema eólico de velocidade variável com gerador do tipo PMSG conectado à rede. Para tanto, expandiu-se o sistema eólico isolado, modelado em Sena (2015), adaptando-o para atuar em um sistema real e funcional de geração de energia eólica conectado à rede de escoamento. Para implementação do sistema *Fuzzy* utilizou-se o *Fuzzy Logic ToolboxTM*, disponível no *MATLAB[®]*. A modelagem do sistema eólico e do sistema de potência foi feita através da utilização do *SIMULINK[®]*, *toolbox* disponível no *MATLAB[®]*, onde foi possível modificar a implementação para suportar uma carga real e obter o modelo do sistema eólico conectado à rede.

1.1 PROBLEMAS E HIPÓTESES DO TRABALHO

PROBLEMAS

- (1) Como evitar o desgaste da máquina para velocidades do vento acima da velocidade de operação?
- (2) Qual o melhor gerador a ser utilizado?
- (3) Como realizar o controle de um sistema de comportamento não linear?

HIPÓTESES DO TRABALHO

- (1) Através da utilização de sistemas eólicos com controle *pitch*. Esse controle é necessário para garantir confiabilidade e segurança aos equipamentos, limitando a potência de saída a seu valor nominal, evitando assim sobrecarga do sistema e desgaste dos componentes mecânicos.
- (2) O gerador PMSG tornou-se atualmente uma solução bastante atraente em aplicações de turbinas eólicas de velocidades variáveis, apresentando vantagens sobre a máquina assíncrona de dupla alimentação em virtude de possuir maior eficiência, ausência de excitação externa, não apresenta perdas nos circuitos de campo e não possuem escovas (reduzindo os custos com manutenções).
- (3) Ao longo dos anos, os Sistemas *Fuzzy* tem crescido em popularidade e aplicação, pois não requerem o completo conhecimento matemático do sistema a ser controlado e são adequados para aplicações envolvendo situações de não linearidade, que impossibilitam a utilização dos sistemas de controles clássicos, como o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) e suas variações.

1.2 OBJETIVOS

GERAL

Analisar o comportamento de um Controlador *Fuzzy* aplicado a um sistema de geração eólico de velocidade variável conectado à rede, tomando-se como base a dissertação de Sena (2015), que fez uso de um Controle *Fuzzy* para otimizar o desempenho de um sistema eólico isolado.

ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o sistema com Controlador Proporcional Clássico (CPC);
- Expandir o sistema eólico isolado proposto por Sena (2015) para um sistema conectado à rede, realizando as devidas alterações que permitam a conexão do mesmo ao sistema de potência;
- Implementar e simular o modelo de Controle Proporcional tradicional e o *Fuzzy*;
- Coletar e analisar os resultados experimentais obtidos através de simulações no *SIMULINK*[®];
- Comparar o desempenho de ambos os controladores.

1.3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho está respaldado nas seguintes justificativas:

- Desenvolver a análise de novas técnicas de controles, diferente dos sistemas clássicos tradicionalmente utilizados, buscando identificar novas formas de melhorar a eficiência e qualidade da potência elétrica gerada pelos sistemas eólicos. Entende-se que melhorando a eficiência dos sistemas eólicos é possível aumentar a importância e participação desse tipo de geração na matriz energética brasileira.
- De acordo com Sena (2015), no que se refere ao sistema de controle, a otimização de sistemas eólicos constitui-se uma excelente oportunidade de explorar um campo pouco empreendido, mas de grande importância para o setor elétrico brasileiro, uma vez que minimiza as chances de novas crises energéticas.
- Além disso, a Região Nordeste tem um elevado potencial para geração de energia elétrica, apresentando níveis de fator de capacidade alto quando comparado com outras regiões do país. Os níveis de incerteza são pequenos e perfeitamente possíveis de serem alcançados, sobretudo quando os estudos são conduzidos de forma a se obter sistemas mais eficientes para aproveitamento do vento e consequentemente rompendo o paradigma do atual modelo brasileiro.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho proposto foi organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1 trata-se de uma introdução a respeito do tema, onde foram apresentados os problemas, hipóteses e as justificativas da pesquisa. Além disso, foram expostos os objetivos gerais e específicos levantados como metas a serem alcançadas ao término do mesmo.

No capítulo 2 são apresentados conceitos básicos dos Sistemas de Conversão de Energia Eólica (SCEE) e os mecanismos para que ocorra a extração de energia disponível no vento. Esse capítulo também apresentará a classificação dos SCEE.

O Capítulo 3 trata sobre a teoria de controle utilizando Lógica *Fuzzy* (LF), conhecimentos específicos como: conjuntos *Fuzzy*, funções de pertinência, variáveis linguísticas, Fuzzificação; regras de controle; Defuzzificação; e sistema de inferência *Fuzzy*.

No Capítulo 4, é feita uma descrição dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, detalhando o sistema eólico utilizado, a construção dos controladores, a escolha dos conjuntos *Fuzzy*, a escolha das regras e os métodos de Fuzzificação, inferência e Defuzzificação.

No Capítulo 5 são discutidos os resultados e discussões referentes à aplicação do controle desenvolvido. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros. Além disso, todas as referências utilizadas para o desenvolvimento do trabalho aqui proposto.

2. CONCEITOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e definições acerca dos sistemas eólicos de geração de energia elétrica, tais como: características; componentes; energia e potência extraída do vento; e a classificação.

2.1 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica vem sendo utilizada pelo homem há muitos anos. A utilização dessa fonte de energia tem numerosas vantagens quando comparada às fontes de energia tradicionais e até mesmo com outros tipos de energias renováveis. No final do século XIX surgiram as primeiras tentativas da geração de eletricidade a partir da energia dos ventos, mas somente no século XX houve investimentos que viabilizassem o desenvolvimento e aplicação em escala comercial. Nesse contexto, resultando na primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública instalada em 1976, na Dinamarca (BRASIL, 2005).

O Brasil possui enorme potencial para geração eólica de eletricidade, apesar disso, somente em 1992 teve a instalação da primeira turbina eólica, no arquipélago de Fernando de Noronha (PE). O aerogerador foi instalado com capacidade de 75 kW de potência, 23 m de altura e 17 m de diâmetro (BRASIL, 2008).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA, 2015), foram instaladas 96 novas usinas eólicas, em 2014, com um total de 238 usinas. Com a adição das novas usinas, soma-se, 2.495,52 MW de potência a Matriz Elétrica Brasileira. Ao todo, foram 5.961,59 MW de potência eólica instalada, representando assim, um crescimento de 72% de potência em relação a dezembro de 2013, com esse aumento, a fonte eólica passou a compor 4,4% da matriz energética brasileira. O Gráfico 1, mostra a evolução da capacidade instalada e a previsão de crescimento da fonte eólica em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e também no mercado livre.

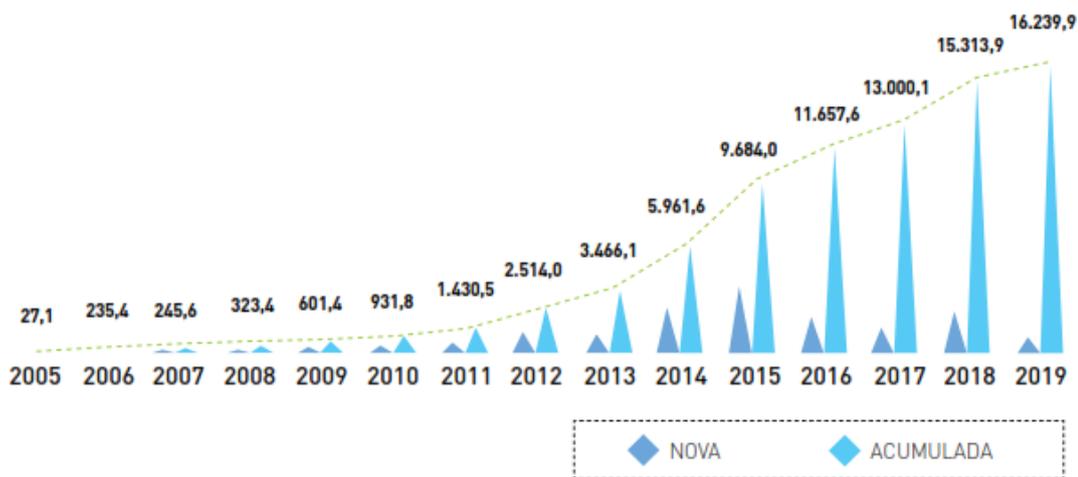


Gráfico 1 - Evolução da capacidade instalada e a previsão de crescimento da fonte eólica
 Fonte – ABEEÓLICA, 2015.

Segundo ABEEÓLICA (2015), devido a geração eólica, em 2014 evitou que 6,09 milhões de toneladas de CO₂ fosse lançado na atmosfera, valor equivale à emissão anual de mais de 3 milhões de automóveis. O Gráfico 2 mostra a emissão de CO₂ evitada por mês em 2014 devido a geração eólica de energia elétrica.

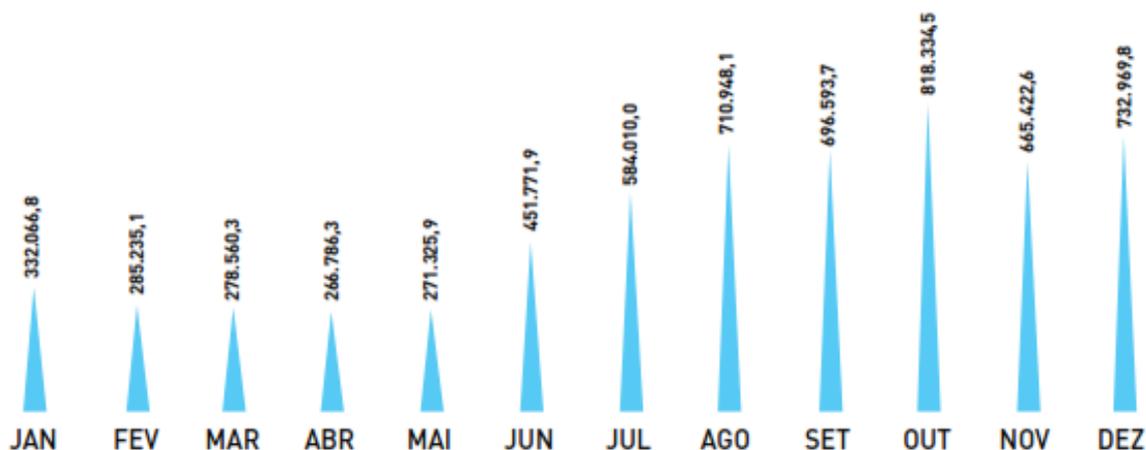


Gráfico 2 - Emissão de CO₂ evitadas por mês em 2014
 Fonte – ABEEÓLICA, 2015.

2.2 O VENTO

A energia eólica é uma forma indireta de obtenção da energia proveniente do sol, uma vez que os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Este fenômeno inconstante deve-se à orientação dos raios solares e aos movimentos da terra, fazendo com que as regiões tropicais sejam mais aquecidas que as regiões polares, por receber os raios

solares quase que perpendicularmente. Cerca de 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Mesmo baixo, esse percentual representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DUTRA, 2008).

A Figura 1 representa o mecanismo de movimentação das massas de ar ao redor do globo. O ar quente e de alta pressão, que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais, tende a subir e fluir na direção das regiões polares. Enquanto, o ar frio e de baixa pressão, das regiões polares, tem tendência de ir em direção as regiões tropicais, formando um ciclo. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos (RODRIGUES, 2011).

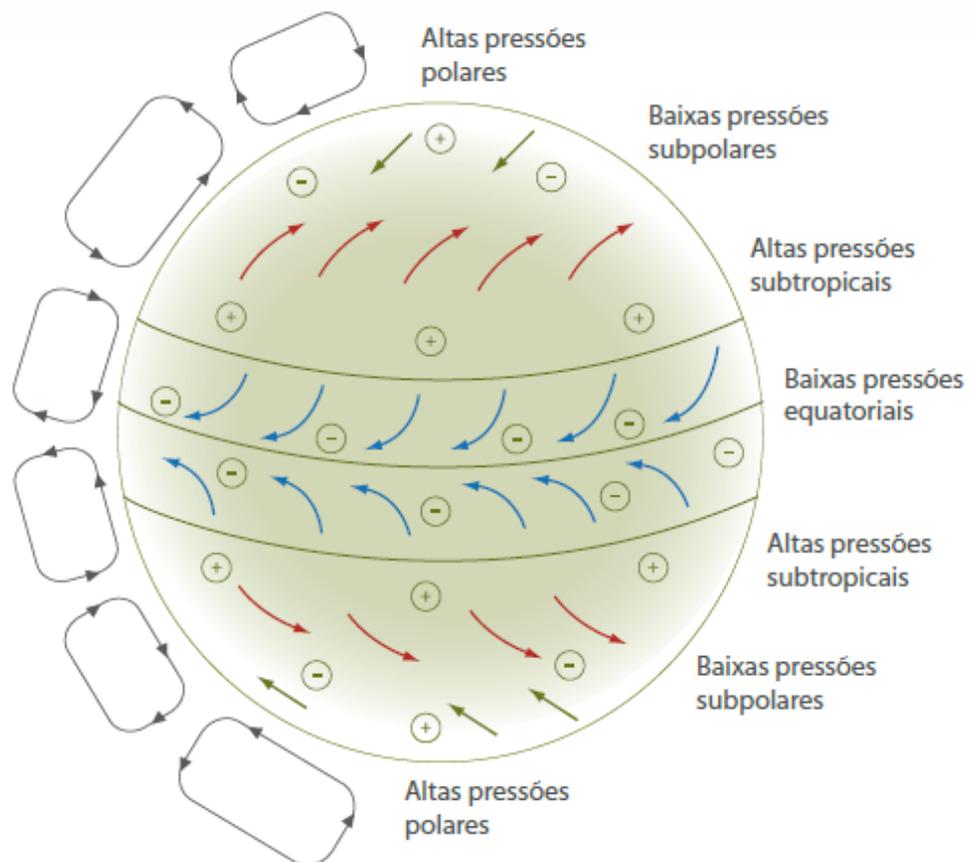


Figura 1 - Distribuição geral dos ventos

Fonte: Rodrigues, 2011.

A Tabela 1 apresenta a escala de Beaufort de ventos para uma determinada altura da superfície do solo e suas respectivas classificações.

Tabela 1 - Classificação dos ventos em função de sua velocidade: escala Beaufort de ventos

Velocidade do vento à altura de 10 metros da superfície do solo		Escala de Beaufort dos ventos	Classificação
[m/s]	[km/h]		
< 0,4	< 1	0	Calmo
0,4 – 1,8	1 – 5	1	Ar suave
1,8 – 3,6	6 – 11	2	Brisa suave
3,6 – 5,8	12 – 19	3	Brisa
5,8 – 8,5	20 – 28	4	Brisa moderada
8,5 – 11	29 – 38	5	Brisa fresca
11 – 14	39 – 49	6	Brisa forte
14 – 17	50 – 61	7	Próximo de temporal
17 – 21	62 – 74	8	Temporal
21 – 25	75 – 88	9	Temporal forte
25 – 29	89 – 102	10	Tempestade
29 – 34	103 – 117	11	Tempestade violenta
> 34	> 117	12	Furacão

Fonte: Carvalho, 2006.

A Figura 2 mostra a curva de potência de turbinas eólicas em relação à velocidade do vento em metros por segundo. De acordo com a mesma, a geração elétrica inicia-se com velocidades de vento próximo à 3,0 m/s, valores abaixo não justificam o aproveitamento energético desta fonte. Entre 15,0 m/s e 25,0 m/s a potência da máquina é máxima. Velocidades acima de 25 m/s o sistema automático de proteção atua, desconectando o sistema elétrico do gerador da rede elétrica.

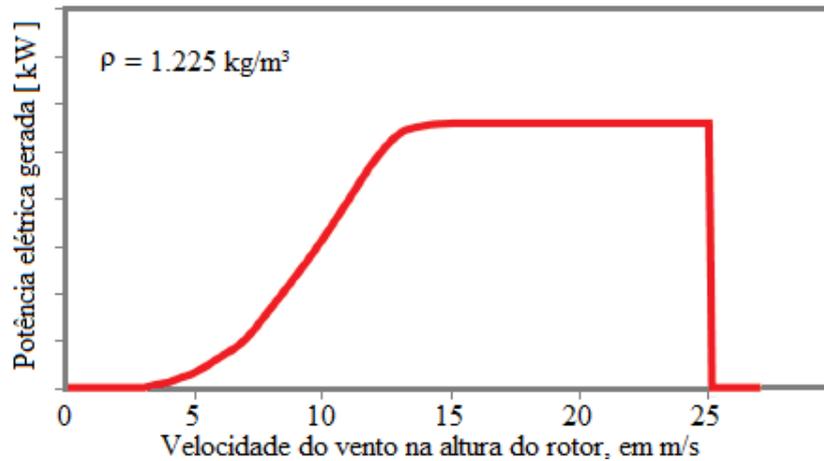


Figura 2 - Curva típica de potência de turbinas eólicas
 Fonte: Amarante *et al*, 2001.

2.3 SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA (SCEE)

O desenvolvimento de pesquisas e o surgimento de novas tecnologias tem contribuído para melhorar o desempenho e a confiabilidade dos SCEE, além de promoverem redução de custos e, impactos ambientais. Por isso, tem-se observado o aumento crescente da geração de energia elétrica por meio de unidades aerogeradoras.

Um SCEE pode ser representado pela Figura 3, onde três formas de conversões de energia são representadas: conversão aerodinâmica; conversão mecânica e conversão elétrica.

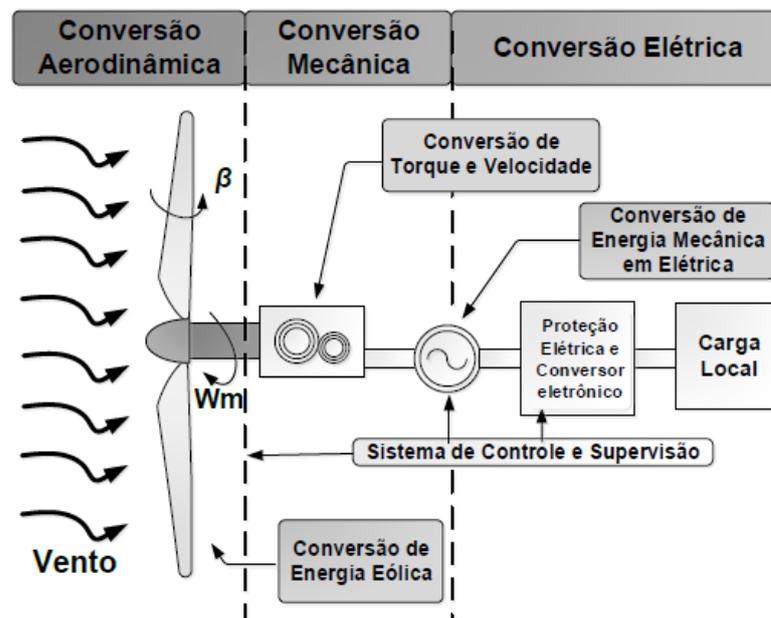


Figura 3 - Etapa de conversão de um SCEE
 Fonte: Martinello, 2015.

Inicialmente a massa de ar se movimenta a uma determinada velocidade sobre as pás do aerogerador. A energia cinética associada ao movimento é captada através de um sistema de hélice convertendo a energia cinética de translação do vento em energia cinética de rotação, obtendo-se potência mecânica. A potência mecânica, disponível inicialmente nas pás e posteriormente no eixo de uma turbina, é transferida até um gerador elétrico. Por fim, a potência mecânica é transmitida ao gerador que por meio de um processo de conversão eletromecânica, que converte a potência mecânica em potência elétrica.

2.4 AEROGERADORES E SEUS COMPONENTES

A estrutura de um aerogerador pode variar em tamanho, formato, fabricante e potência. Sua estrutura é composta por equipamentos mecânicos, elétricos e hidráulicos, como descrito na Figura 4.

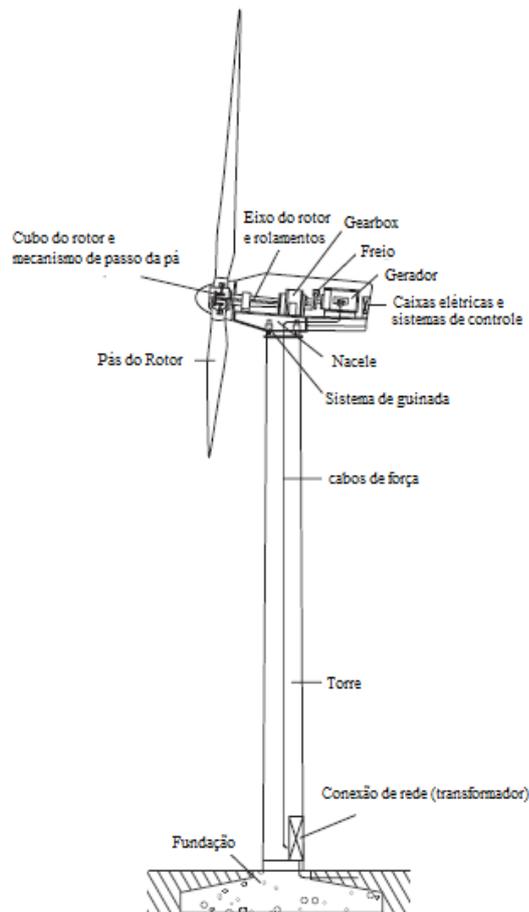


Figura 4 - Componentes de um Aerogerador
Fonte: Adaptado de Hau, 2006.

Os principais componentes de um Aerogerador são:

Fundação – Responsável pela sustentação da turbina eólica, cujo dimensionamento dependerá das características do aerogerador (da torre) e da constituição do solo de fundação;

Nacele - É o componente, acima da torre, que abriga diversos outros componentes, tais como o gerador, a caixa de engrenagens, o sistema de controle, a medição do vento, os motores que regulam o posicionamento da estrutura em relação ao vento, entre outros;

Pás do rotor - elemento responsáveis pela interação com o vento, capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional, transmitida ao gerador através de um eixo de conexão;

Freio – responsável por promover a frenagem das pás em caso de falha no sistema ou sobrecarga de energia;

Cubo – recebe as pás, e junto com estas formam o rotor, responsável por transmitir a energia captada pelas pás para o eixo;

Eixo - responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador, transfere a energia rotacional para uma caixa multiplicadora ou diretamente para o gerador;

Gearbox - também conhecido como caixa de engrenagem responsável por elevar a velocidade e reduzir o torque imposto ao gerador;

Gerador Elétrico – responsável por converter a energia mecânica do eixo da turbina em energia elétrica;

Sistema de controle – responsável por monitorar o sistema, desligando em caso de mau funcionamento, proporcionando uma maior eficiência e maior vida útil dos equipamentos;

Sistema de Guinada – responsável por alinhar o rotor com a direção do vento, através da rotação da turbina sobre o próprio eixo vertical;

Torre – responsável por sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para uma maior conversão de energia.

2.5 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

Em SCEE's é necessário um modelo aerodinâmico preciso e, que possibilite a determinação da potência mecânica aplicada ao eixo do gerador. Existem modelos que representam o comportamento aerodinâmico do rotor, sendo o modelo baseado na quantidade

de energia cinética presente em uma coluna de massa de ar, de velocidade constante, que se desloca pela seção de rotação das pás do rotor, o mais utilizado.

Considerando uma massa de ar m , com uma velocidade de deslocamento v , em uma direção x , a energia cinética E pode ser obtida pela Equação 1:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

Onde:

E = Energia cinética (J);

m = massa do ar (kg); e

v = velocidade do vento (m/s).

Uma vez determinada a energia cinética, pode-se traduzir na forma de potência, de acordo com as seguintes Equações:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (2)$$

P = potência disponível no vento (W);

t = tempo (s); e

\dot{m} = taxa de variação da massa.

Considere que essa massa (m) em movimento, passa através de uma Área (A), em um dado intervalo de tempo (t), conforme mostra a Figura 5, a taxa de variação da massa é dada por:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v \quad (3)$$

Onde,

ρ = massa específica do ar [kg/m^3] (1.225 kg/m^3 ao nível do mar);

A = área da seção transversal do cilindro [m^2];

Substituindo (3) em (2), tem-se a Equação da potência disponível no vento.

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

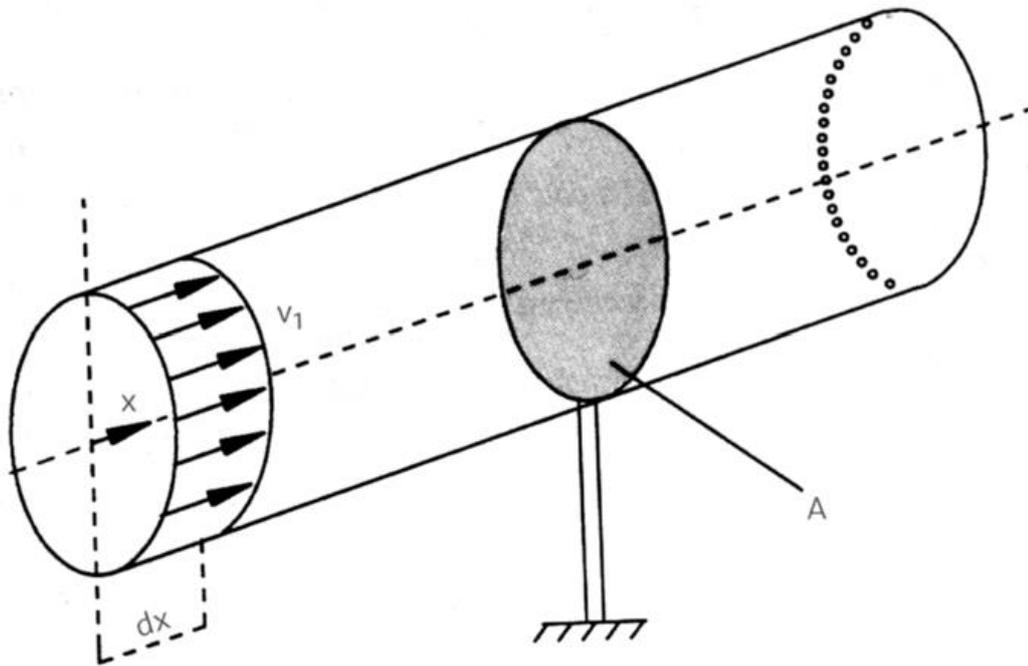


Figura 5 - Fluxo de ar através de uma área transversal A
Fonte: Marques, 2004.

A potência eólica é convertida em potência mecânica, através da rotação das pás da turbina. No entanto, apenas uma fração da potência disponível no vento pode ser convertida em energia elétrica, esse fato é explicado pelo físico alemão Albert Betz na década de 1920. Em seu experimento, Betz determinou o valor máximo da parcela de energia extraída do vento que pode ser convertida em energia elétrica, o qual foi denominado de coeficiente de potência (C_p).

Na Figura 6, V_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, V a velocidade do vento no nível das pás e V_2 a velocidade do vento após deixar as pás. Pode-se observar a variação da velocidade do vento através do rotor ao chegar a turbina com velocidade inicial V_1 , após atravessar a mesma, sofre redução de velocidade (V_2), pois, parte da energia cinética será usada para movimentar as pás da turbina. Havendo redução de pressão e aumento de volume. Pela lei da continuidade, tem-se que:

$$V_1 A_1 = V A = V_2 A_2 \quad (5)$$

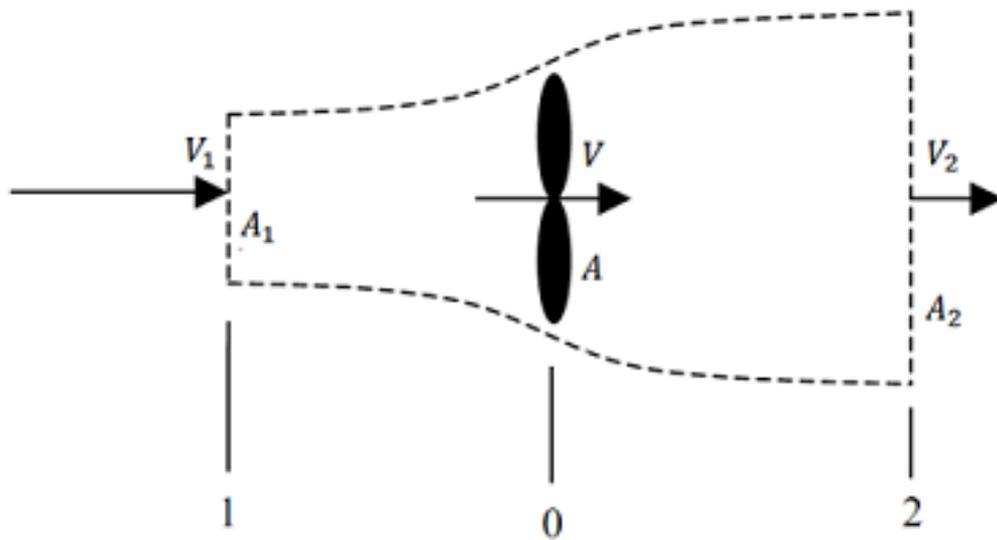


Figura 6 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina
Fonte: Tsuchida, 2012.

A potência extraída pela turbina é definida pela diferença entre a potência de entrada e a potência de saída, dessa forma tem-se que:

$$P_{mec} = P_2 - P_1 = \frac{1}{2} \rho \cdot (V_1 A_1^3 - V_2 A_2^3) \quad (6)$$

Para que ocorra a potência máxima extraída é necessário que:

$$V = \frac{2}{3} \cdot V_1 \text{ e } V_2 = \frac{1}{3} V_1 \quad (7)$$

Substituindo a Equação (7) em (5) obtém-se a relação entre as áreas:

$$A = \frac{3}{2} \cdot A_1 \text{ e } A_2 = 3A_1 \quad (8)$$

Substituindo na Equação (6), as relações (7) em (8) tem-se que:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \cdot \left(\frac{8}{9} \cdot A_1 \cdot V_1^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \cdot \left(\frac{16}{27} \cdot A \cdot V^3 \right) \quad (9)$$

Através da Equação 9, pode-se determinar o coeficiente de potência do rotor (C_p), que representa a fração máxima da energia contida no vento que pode ser extraída pela turbina, da seguinte maneira:

$$C_{\max} = \frac{16}{27} \cong 59,26\% \quad (10)$$

A potência mecânica que pode ser extraída dos ventos é definida por:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (11)$$

Por meio da Equação (11), tem-se o conjugado mecânico:

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (12)$$

Como pode ser observado, o C_p depende da relação entre a velocidade na ponta das pás (λ) e o ângulo de inclinação da mesma (β). Esta relação denominada *tip speed ratio* (TSR) e é dada por:

$$\lambda = \frac{\omega_{rotor} R}{V_1} \quad (13)$$

onde:

R - raio das pás (m)

V - velocidade de entrada da turbina (m/s)

ω_{rotor} - Velocidade do rotor da turbina (rad /s)

Abad *et al* (2011) apresenta uma forma genérica usada para representar o valor de C_p dada por:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left[\frac{c_2}{c_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right] e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (14)$$

onde :

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (15)$$

Os coeficientes c_1 à c_9 variam segundo o projeto aerodinâmico da turbina. Na Tabela 2, tem-se os valores para os coeficientes propostos por Heier, e por Sootweg (para turbinas de velocidade constante e variável).

Tabela 2 - Coeficientes das equações das curvas de potência

Autor	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9
Heier (1998)	0,5	116	0,4	0	–	5	21	0,08	0,035
Velocidade constante (Sootweg)	0,44	125	0	0	0	6,94	16,5	0	- 0,002
Velocidade variável (Sootweg)	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	-0,02	- 0,003

Fonte: Adaptado de Ackerman (2005).

2.6 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS TURBINAS EÓLICAS

Esta seção contempla as principais características e definições acerca de turbinas eólicas, tais como: classificação, aerodinâmica das pás e controle de potência.

2.6.1 Classificações das turbinas

As turbinas eólicas podem ser classificadas de várias maneiras. Segundo Bonelli (2010) esses sistemas podem ser classificados quanto a sua posição do eixo (horizontal, vertical), quanto à disposição das pás em relação à incidência do vento e quanto ao número de pás.

a) Posição do eixo

As turbinas eólicas podem ser de eixo vertical ou de eixo horizontal, conforme mostra a Figura 8. As turbinas de eixo horizontal são as mais conhecidas e utilizadas por possuírem maior eficiência que a turbina de eixo vertical. Apesar do seu maior custo, possui maior eficiência, fazendo destes os mais utilizados para geração de energia em larga escala. Essas turbinas são projetadas para terem controle sobre a potência a ser gerada.

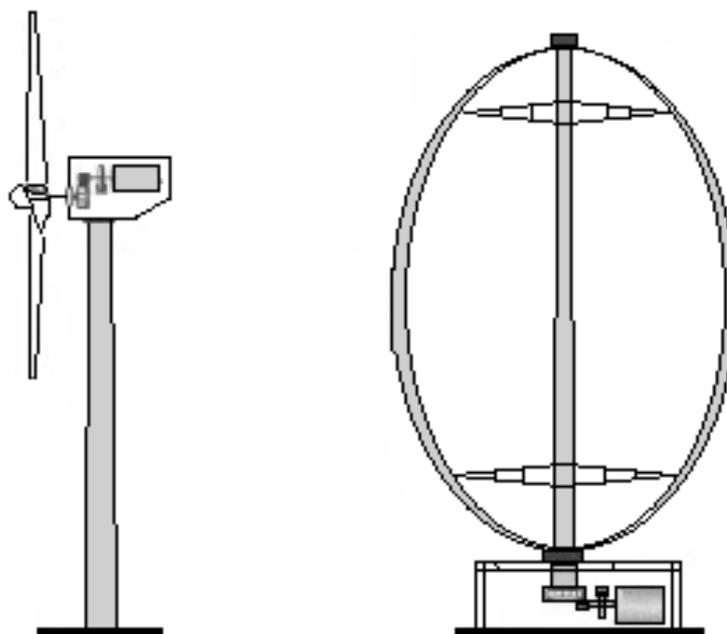


Figura 7- (a) Turbina Eólica de eixo horizontal; (b) Turbina eólica de eixo vertical.

Fonte – Wu *et al*, 2011.

Na Tabela 3, pode-se observar a comparação entre esses dois tipos de turbinas.

Tabela 3 - Comparação entre turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical

Tipo de Turbina	Vantagens	Desvantagem
Eixo Horizontal	Maior Eficiência na conversão de energia eólica.	Maior custo de instalação, devido ao peso de Nacele.
	O acesso a ventos fortes devido à altura da torre.	Cabo mais longo (do topo da torre à terra).
	Regulação de potência, por controle de ângulo de inclinação em ventos de alta velocidade.	Orientação necessária (controle de guinada).
Eixo Vertical	Menor custo de instalação e manutenção mais fácil devido a caixa de velocidades e gerador estarem ao nível do solo.	Eficiência de conversão de energia eólica mais baixa.
	Operação independente da direção do vento.	Flutuações de torque mais alto e propensas a vibrações mecânicas.
	Adequado para telhados (vento mais forte sem necessidade de torre).	Opções limitadas para regulagem de potência em altas velocidades de vento.

Fonte – Wu *et al*, 2011.

b) Disposição das pás em relação à incidência do vento

As pás de uma turbina podem ser colocadas a favor do vento (sistemas *downwind*) ou contra o vento (sistemas *upwind*), conforme ilustra a Figura 9. A opção *downwind* tem a vantagem de permitir que o próprio vento controle a guinada (alinhar o rotor com a direção do vento), de modo natural. No entanto, em caso de sombreamento da torre ocorre aumento do ruído da lâmina e redução da potência de saída. A opção *upwind*, por outro lado, requer sistemas de controle de guinada complexos para manter as pás voltadas para o vento. Em troca dessa complexidade operam mais suavemente e fornecem mais energia. A maioria das turbinas de vento modernas são do tipo *upwind* (MASTERS, 2004).

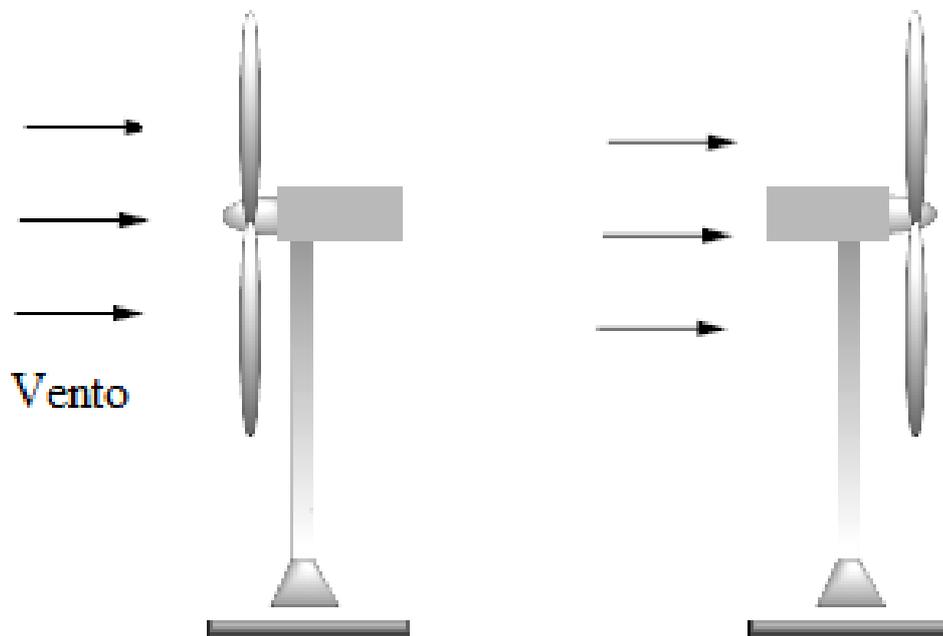


Figura 8 - (a) Turbina de *downwind*; (b) Turbina de *upwind*

Fonte – adaptado de Masters, 2004.

c) Número de pás

As turbinas eólicas mais utilizadas na geração de eletricidade são as de duas e três pás. Turbinas com 20 ou mais pás são utilizadas para o bombeamento mecânico de água. Atualmente, as turbinas eólicas que tem o domínio do mercado é a de três pás, por possuir menor ruído, melhor estética visual e melhor momento de inércia, se comparado com a de duas lâminas (ACKERMANN, 2005).

2.6.2 Aerodinâmica das pás

O princípio aerodinâmico de funcionamento nas asas de um avião é praticamente o mesmo utilizado em pás de turbinas eólicas de eixo horizontal. Quando o vento incide sob a pá, são duas forças aerodinâmicas que atuam sobre as pás do rotor da turbina eólica criando o torque resultante, que transmitido ao eixo, a força de sustentação, que atua perpendicularmente ao fluxo do vento, e a força de arrasto, que atua paralelamente ao fluxo do vento (TSUCHIDA, 2012). A Figura 10 ilustra estas duas forças aerodinâmicas atuantes nas hélices da turbina.

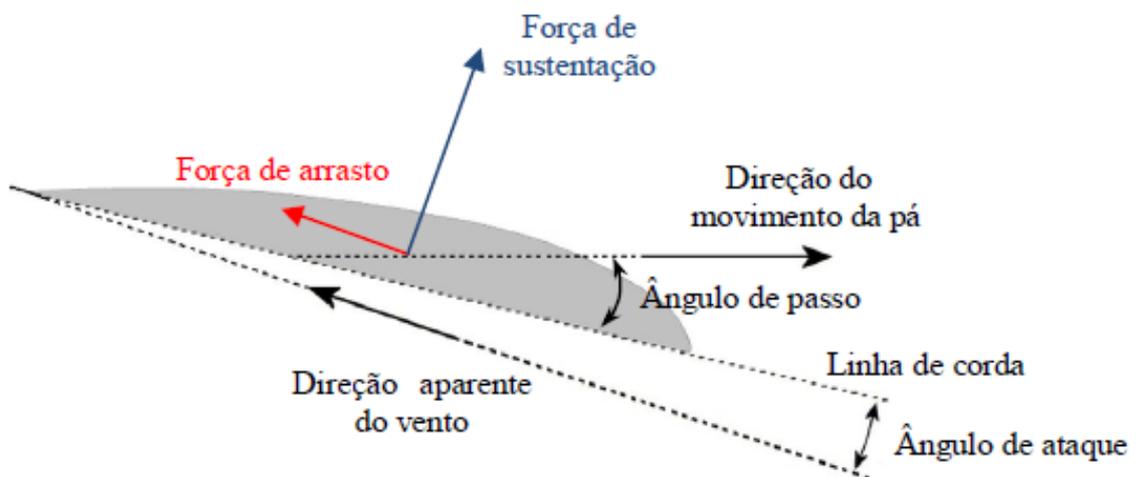


Figura 9 - Atuação das forças aerodinâmicas sobre a pá de um rotor
 Fonte: Ferreira, 2009.

Os rotores de eixo horizontal são movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Para uma mesma velocidade de vento, os rotores que utilizam a forças de sustentação liberam mais potência do que os que se movimentam com a forças de arrasto (CRESESB, 2008).

2.6.3 Controle de potência

As turbinas eólicas são projetadas para trabalhar em uma determinada faixa de velocidade do vento. Porém, o regime do vento possui características não constantes. Dessa forma, faz-se necessária a aplicação de controladores, objetivando evitar danos que comprometam a integridade física do sistema mecânico de conversão e, conseqüentemente, a redução da vida útil dos componentes do sistema eólico. Dentre os sistemas utilizados, dois

controles são frequentemente utilizados para promover limitação de potência elétrica, são eles: controle *stall* e controle de *pitch*.

Na sequência, é apresentada uma breve descrição das formas de controle mencionados anteriormente.

a) controle *stall*

No Controle *Stall*, as pás do rotor não podem girar em torno de seu eixo longitudinal, por possuírem ângulo de passo fixo. As turbinas eólicas que utilizam esse controle são mais simples do que as que utilizam o controle de *pitch*, por não necessitarem de um sistema de mudança de passo (GUERRA *et al*, 2012).

O controle *stall* é baseado nas características aerodinâmicas das pás do rotor. Neste tipo de controle, ocorre a redução das forças de sustentação e aumento das forças de arrasto, protegendo assim os componentes da turbina e assegurando uma geração praticamente constante. Para o efeito estol não ocorrer em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, as pás possuem uma pequena torção longitudinal para suavizar o desenvolvimento deste efeito (CARVALHO, 2006). A Figura 11(a) ilustra uma situação em que a velocidade do vento está próxima ao valor nominal, já a Figura 11(b), ilustra a atuação do controle *stall*, produzindo sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas.



Figura 10 – (a) Fluxo de ar aderente ao perfil da pá (b) Fluxo separado (estol) em volta do perfil
Fonte: Adaptado de Carvalho, 2006.

b) controle de *pitch*

No controle de *pitch*, as turbinas eólicas controladas têm pás ajustáveis no cubo do rotor e possuem a capacidade de rotacionar em torno do seu eixo longitudinal. Para velocidades do vento superior à nominal, ocorre a redução do ângulo de ataque do controlador, girando as lâminas gradualmente no sentido do vento. A diferença de pressão na

frente e na parte traseira da pá é reduzida, conseqüentemente, redução na força de sustentação sobre a pá (WU *et al*, 2011).

O controle de potência é feito pela variação do passo das pás, ou seja, sobre o ângulo de passo β , lembrando que o $C_p(\lambda, \beta)$, depende da razão de velocidade da pá e do ângulo de passo. Como visto na Figura 7, o C_p é máximo quando $\beta = 0^\circ$. Para auxiliar a parada da turbina, comumente, utiliza $\beta = 90^\circ$, minimizando a velocidade do rotor quando o freio é aplicado.

Segundo Tsuchida (2012) as principais vantagens do controle de *pitch* são: melhor aproveitamento na captura da energia eólica; possibilidade de controle de potência ativa sob todas as condições de vento; podem alcançar a potência nominal mesmo em condições de baixa massa específica do ar; facilidade na partida do rotor através da mudança de passo; e posição de embandeiramento¹ em caso de ventos extremos.

2.7 CLASSIFICAÇÃO DAS SCEE EM FUNÇÃO A VELOCIDADE DE OPERAÇÃO: FIXA E VARIÁVEL

Existe diversas configurações utilizadas na geração de energia eólica, todas elas se enquadram em geração eólica de velocidade fixa ou geração eólica com velocidade variável. A topologia de velocidade fixa é utilizada em geradores assíncronos, enquanto a de velocidade variável utiliza tanto geradores assíncronos quanto geradores síncronos (BONELLI, 2010).

Em turbinas de velocidade fixa o gerador de indução é a opção mais usada pelos fabricantes de aerogeradores, devido a sua simplicidade e robustez. Essa topologia caracteriza-se por ter velocidade de operação praticamente constante, devido o acoplamento ser direto a rede elétrica, independentemente da velocidade do vento (CARVALHO, 2006).

Segundo Bonelli (2010) as turbinas de velocidade fixa possuem algumas vantagens em relação à outra alternativa, dentre elas, destacam-se: Tecnologia simples e tradição bem-sucedida; Ausência de conversores eletrônicos; Operação com tensões e correntes senoidais; Menor custo inicial; Regulação da velocidade do rotor simples, através do acoplamento direto com a rede elétrica.

¹ Posição em que o ângulo de ataque é zero grau.

As turbinas de velocidade variável atualmente são as mais utilizadas. São projetadas para alcançar máxima eficiência aerodinâmica, por se adaptar a velocidade rotacional da turbina (CARVALHO, 2006).

As turbinas de velocidade fixa utilizam geradores de indução de gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Generator - SCIG*), conectados diretamente à rede sem o conversor de energia. As turbinas eólicas de velocidade variável se classificam quanto ao acionamento, podendo ser direto ou indireto. Em turbinas de acionamento direto, são utilizados os geradores síncronos de rotor-bobinado (*Wound Rotor Synchronous Generators - WRSGs*) e o geradores síncronos de ímã permanente (*Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSGs*), para os quais o uso de conversores de potência é necessário. Em turbinas de acionamento indireto, utilizam caixa de engrenagens, que combine a velocidade baixa da turbina com a alta velocidade do gerador. Neste caso, as configurações utilizadas são o WRSG, PMSG e SCIG, com conversores de potência de capacidade. Além desses, os geradores de indução duplamente alimentados (*Doubly Fed Induction Generator - DFIGs*) com conversores de capacidade reduzida e geradores de indução de rotor bobinado (*Wound Rotor Induction Generator - WRIGs*) com rotor de resistência variável do rotor (WU *et al*, 2011). A Figura 12 apresenta como se dá essa classificação.

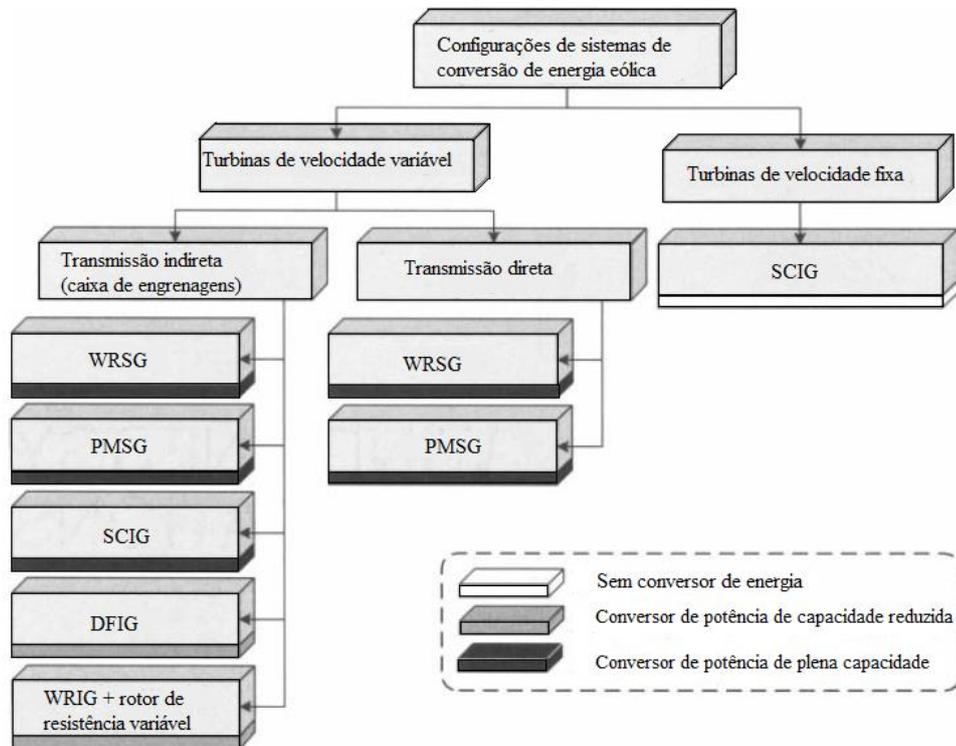


Figura 11 - Classificação das configurações utilizadas em sistemas eólicos

Fonte: Adaptado de Wu *et al*, 2011.

3. LÓGICA FUZZY

O conceito de Lógica *Fuzzy*, ou lógica nebulosa, foi introduzido por Zadeh, no ano de 1965, a partir de então, estudos vêm avançando tanto do ponto de vista teórico como prático (DELGADO, 2002).

A utilização dos Sistemas *Fuzzy* é adequada para raciocínios incertos ou aproximados, principalmente para sistemas com modelo matemático de difícil obtenção, permitindo a esses sistemas a tomada de decisão (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010).

De acordo com Mathworks (2016), o número e a variedade de aplicações da Lógica *Fuzzy* aumentaram nos últimos anos de forma significativa. Sendo utilizada em câmeras, filmadoras, máquinas de lavar roupa, fornos de micro-ondas, controle de processo industrial, instrumentação médica, sistemas de apoio à decisão e seleção de arquivo.

A Lógica *Fuzzy* mapeia um espaço de entrada para um espaço de saída, de maneira conveniente. Trata-se de uma ferramenta eficiente para aplicações em sistemas com grandes incertezas e ou não lineares. Alguns fatores justificam a utilização desta lógica, tais como: A Lógica *Fuzzy* é de fácil entendimento; é flexível; tolerante a dados imprecisos; modela funções não lineares de complexidade arbitrária; pode ser construída em cima da experiência de especialistas; pode ser misturada com técnicas convencionais de controle; é baseada na linguagem natural (MATHWORKS, 2016).

De acordo com Júlio (2010), a Lógica *Fuzzy* é uma técnica que introduz alguma forma de inteligência artificial nas máquinas, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em processos complexos. Sendo, portanto, uma alternativa para a solução de problemas de controle com não linearidades nas dinâmicas inerentes aos processos. Quando a utilização desta técnica se dá para o controle de turbinas eólicas, a mesma deve ser utilizada em conjunto com outras técnicas de controle, como, por exemplo: Controlador Proporcional (P); Integral (PI); ou Proporcional-Integral-Derivativo (PID).

As seções seguintes têm por objetivo ampliar o conhecimento a respeito dos conceitos e definições *Fuzzy*, tais como: conjuntos *Fuzzy* e funções de pertinência; operação com conjuntos *Fuzzy*; estrutura do sistema *Fuzzy*.

3.1 CONJUNTOS *FUZZY* E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Os conjuntos *Fuzzy* têm características de não possuir fronteiras bem definidas, sendo desenvolvidos para lidar com problemas onde as transições de uma classe para outra não acontecem de forma suave, pois os conjuntos clássicos apresentam essas limitações. (ORTEGA, 2001).

Segundo Artero (2008), na teoria clássica dos conjuntos, existe duas possibilidades de um elemento em relação a um conjunto, ou ele pertence, ou não pertence. Para este modelo ou é verdade que o elemento pertence a um conjunto ou é falso, e pode ser representado pelas seguintes funções de pertinência:

$$\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\} \quad (16)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Dado um conjunto Universo U , e A um subconjunto nebuloso pertencente a U . A é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$, que associa para cada x um grau de pertinência ao conjunto A , entre 0 e 1 (ARTERO, 2008). Para a condição anterior ser aceita, A tem que ser descrito como um conjunto de pares ordenados da seguinte forma:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in U \text{ e } \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (17)$$

Onde,

$\mu_A(x)$ é uma função pertinência que aponta o grau de x em A . $\mu_A(x)$ pode assumir os seguintes valores:

$\mu_A(x) = 1$, x pertencer totalmente ao conjunto A

$0 < \mu_A(x) < 1$, x pertencer parcialmente ao conjunto A

$\mu_A(x) = 0$, x não pertencer ao conjunto A .

De acordo com Cavalcanti *et al* (2012) os Sistemas *Fuzzy* ou Sistemas Inteligentes, caracterizam esforços na direção da emulação da capacidade humana. Na teoria clássica dos conjuntos, são ditos *crisp*, os conjuntos que podem ser vistos como um conjunto específico, de tal forma que um dado elemento do universo em discurso pertence ou não pertence ao

referido conjunto. Já, na teoria dos conjuntos *Fuzzy* existe um grau de pertinência de cada elemento a um determinado conjunto. Um elemento pertencerá a um subconjunto com grau de pertinência com intervalo $[0, 1]$. Desta forma, $\mu_A(x)=0.85$ significa que x pertence 85 por cento ao conjunto A . Como exemplo tem-se as Figuras 13 e 14, que representam uma Função de pertinência da altura de uma pessoa com representação Clássica e *Fuzzy*, respectivamente.

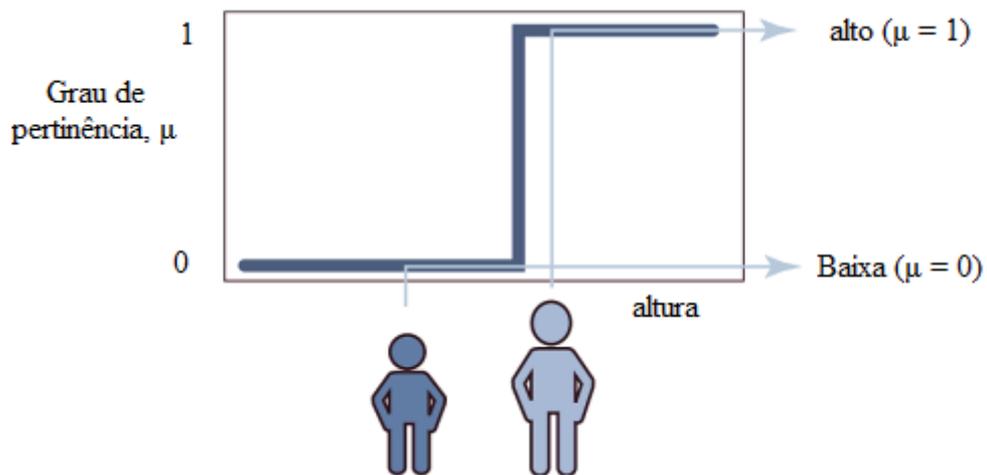


Figura 12 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação binária
Fonte: Adaptado de Mathworks, 2016.

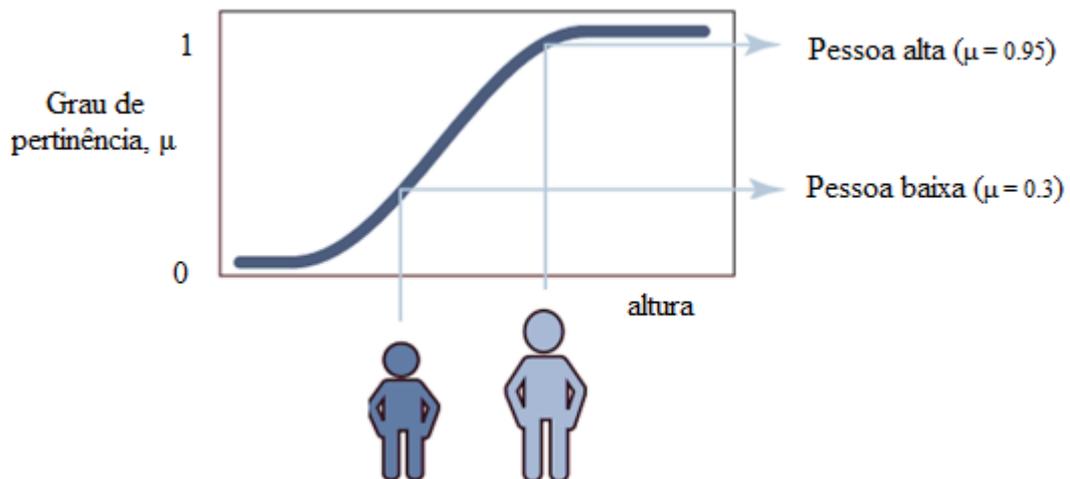


Figura 13 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação *Fuzzy*
Fonte: Adaptado de Mathworks, 2016.

Nas Figuras 13 e 14 o eixo horizontal representa a altura e o vertical representa o grau de pertinência. Em ambos os casos, através da função de pertinência e da altura do indivíduo, sabe-se o grau de pertinência.

A Lógica *Fuzzy* fornece uma descrição mais detalhada da altura dos indivíduos, pois, uma solução pode assumir grau de pertinência entre 0 e 1, como visto na Figura 14. Na lógica tradicional ou clássica, a solução pode assumir o valor 0 ou 1, o que não representa o sistema ilustrado de forma correta, pois, por exemplo, uma pessoa com 1,69m pode ser considerada baixa e uma pessoa com 1,7m ser considerada alta.

De acordo com Sena (2015), “ a função de pertinência pode ser definida como sendo a curva que define como cada espaço de entrada é mapeado para os valores de pertinência, ou seja, ela é responsável por definir o grau de pertinência de cada entrada”. As funções de pertinência podem ser caracterizadas de várias formas como: triangulares, trapezoidais, gaussianas, Cauchy (ou sinusoidais) e sigmóides. (CALDEIRA *et al*, 2007).

Segundo Cox (1994) nos modelos de engenharia, as representações convencionais são trapezoidais e triangulares. A trapezoidal mapeia as funções do extremo do domínio, enquanto a triangular divide o espaço em uma série de regiões *Fuzzy* menores, mas bem definidas. Desta forma, captura-se a natureza linguística de cada sub-região à medida que se movimenta da esquerda para a direita através do domínio, a compatibilidade com a região *Fuzzy* aumenta até atingir a unidade, depois disso, começa a cair até zero.

De acordo com Ross (2010) existe seis métodos diretos para obter as funções de pertinência, são:

- Intuição
- Inferência
- Ordem de classificação
- Redes Neurais (RN)
- Algoritmos Genéticos (AG)
- Raciocínio indutivo.

Nesta dissertação, os métodos utilizados foram a intuição e a inferência, onde a análise do problema foi feita de forma a obter o melhor desempenho do sistema controlado a partir do conhecimento prévio de como o controle de *pitch* deve atuar.

3.2 OPERAÇÃO COM CONJUNTOS FUZZY

As operações entre conjuntos *Fuzzy* são definidas de maneira similar às operações usadas na teoria dos conjuntos clássicos. Zadeh (1965) definiu as operações utilizadas em conjuntos *Fuzzy* como: união; intersecção; e complemento.

Seja os conjuntos *Fuzzy* compostos por A e B, contidos em um universo U, cujas funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente, as operações de igualdade e subconjunto são válidas (DADIOS, 2012). A Figura 15 representa as operações utilizadas em conjuntos *Fuzzy*, e podem ser conferidas como:

Igualdade: Se para cada $x \in U$, $\mu_A(x) = \mu_B(x)$, então o conjunto A é igual ao conjunto B.

Subconjunto: Se para cada $x \in U$, $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$, então o conjunto B contém o conjunto A.

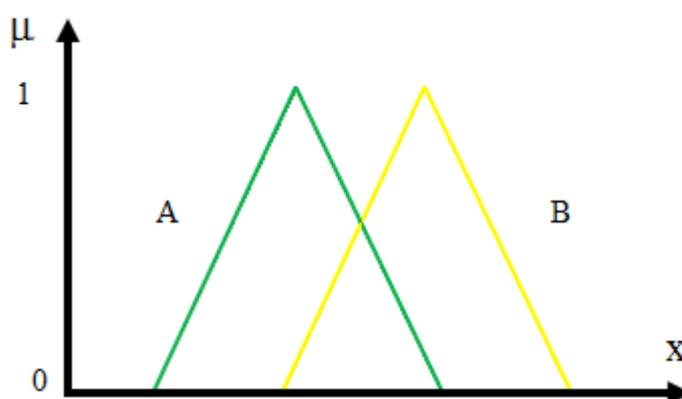


Figura 14 - Função de pertinência dos conjuntos *Fuzzy* A e B

Fonte: Autoria Própria, 2017.

- **União entre conjuntos *Fuzzy***

A união de dois conjuntos *Fuzzy* determina a compatibilidade entre cada conjunto e seu valor de domínio. Desta forma, essa operação produz um valor de associação verdade, onde o máximo desses valores é usado para determinar o grau em que os conjuntos são combinados. A Figura 16 mostra o espaço de representação da união *Fuzzy* aplicado aos conjuntos A e B na qual a função de pertinência é dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad \forall x \in U \quad (18)$$

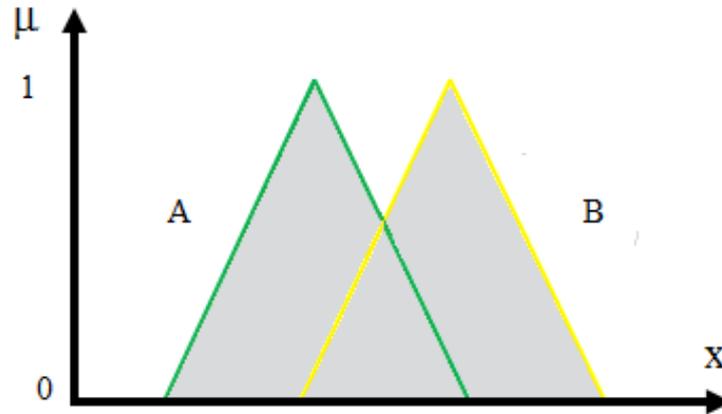


Figura 15 - Resultado da união entre os conjuntos *Fuzzy* A e B
Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

- **Intersecção entre conjuntos *Fuzzy***

A intersecção de dois conjuntos *Fuzzy* A e B, determina a compatibilidade entre cada conjunto e o seu domínio. O mínimo desses valores é usado para determinar o grau em que os conjuntos são interceptados. A Figura 17 mostra o espaço de representação da intersecção *Fuzzy*, onde a função de pertinência é dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \quad \forall x \in U \quad (19)$$

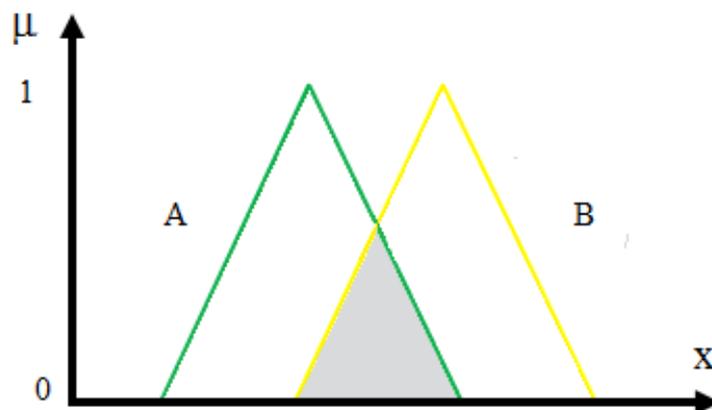


Figura 16 - Resultado da intersecção entre os conjuntos *Fuzzy* A e B
Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

- **Complemento entre conjuntos *Fuzzy***

O complemento ou negação de um conjunto *Fuzzy* registra o quanto um elemento x não pertence a um determinado conjunto. A Figura 18 mostra o espaço de representação do complemento *Fuzzy* e a função de pertinência é dada por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad \forall x \in U \quad (20)$$

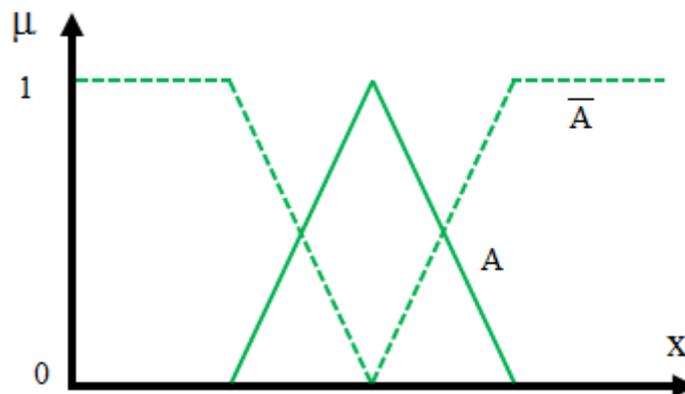


Figura 17 - Resultado do complemento entre os conjuntos *Fuzzy* A e B
Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

3.3 ESTRUTURA DO SISTEMA *FUZZY*

De acordo com Dadios (2012) a estrutura do sistema *Fuzzy* consiste em quatro subsistemas, a saber: Fuzzificação, base de regras, máquina de inferência e Defuzzificação. Inicialmente ocorre a Fuzzificação, onde as entradas são convertidas em valores linguísticos, com o uso de funções de pertinência. Posteriormente, ocorre o mecanismo de inferência, nesta etapa que as regras são criadas, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída. Por fim, o conjunto *Fuzzy* tem a Defuzzificação, para obtenção da variável de saída. A Figura 19 apresenta as principais etapas de controle do sistema *Fuzzy*.

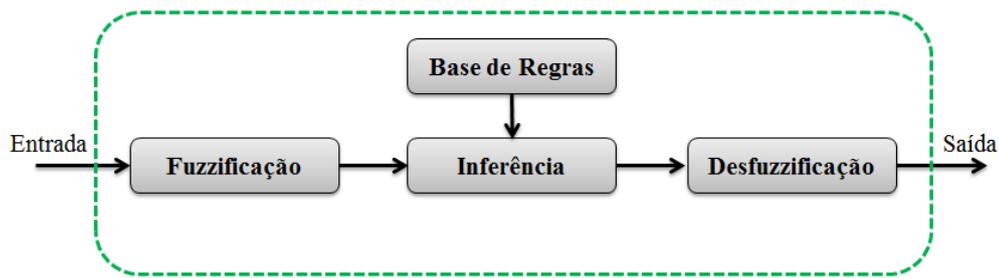


Figura 18 - Estrutura geral de um sistema *Fuzzy*

Fonte: Adaptado de Dadios, 2012.

3.3.1 Fuzzificação

A Fuzzificação é o processo de transformação das variáveis de entrada dos sensores (números reais) para o domínio de variáveis *Fuzzy*. A determinação das variáveis é feita com base na intuição ou inferência, podem ser contínuas ou discretas. E, é um processo de dois passos: Atribuir termos *Fuzzy* e atribuir significado numérico para cada termo. (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010).

- **Atribuição de termos *Fuzzy*:**

Os termos *Fuzzy* são representados por palavras, ao invés de números. As entradas do sistema recebem os termos, que geralmente são representadas por adjetivos, como: baixa, média e alta. Cada entrada recebe um conjunto de termos no universo do discurso. Quanto maior o número de termos, maior será a precisão do sistema, em contrapartida, o esforço computacional será maior. Em geral, o número de termos é limitado a um número ímpar entre 3 e 9. (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010). A Figura 20 apresenta a variável linguística velocidade (em km/h), constituída pelos termos linguísticos: baixa, média e alta.

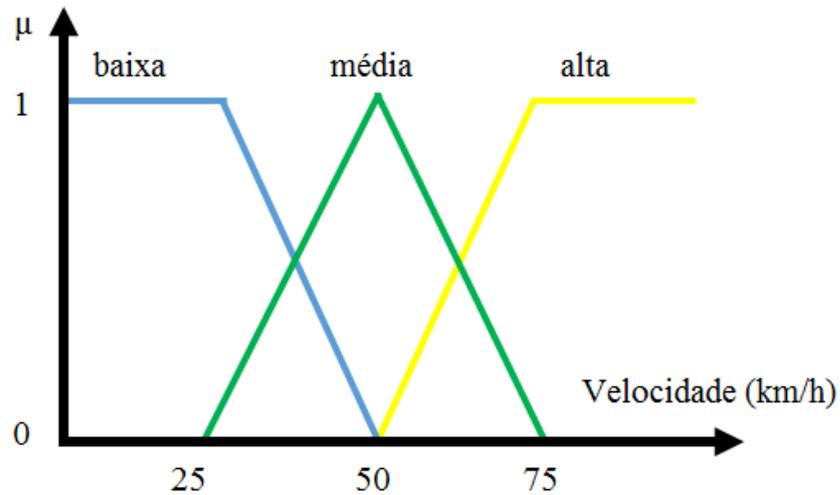


Figura 19 - Função de pertinência e variáveis linguísticas
 Fonte: Autoria Própria, 2017.

- **Atribuição de valores numéricos:**

Em Sistemas *Fuzzy*, o valor da variável de entrada é primeiro Fuzzificado em valores linguísticos, antes do mecanismo de inferência e da base de regra. Cada conjunto *Fuzzy* e a variável linguística associada, possui grau de pertinência entre 0 e 1, em seu universo de discurso. Na Figura 20, a velocidade de até 25 km/h, apresenta um grau de pertinência igual a 1 no conjunto A, à medida que a velocidade aumenta o grau de pertinência neste conjunto decresce; para velocidade de 50 km/h o grau de pertinência é igual a 1 no conjunto B e uma velocidade acima de 75 km/h apresenta grau de pertinência igual a 1 em C.

3.3.2 Base de regras

As regras especificam como entradas e saídas se relacionam. Atualmente a Lógica *Fuzzy* vem sendo utilizada em sistema de controle baseados na combinação da teoria de conjuntos *Fuzzy* e da Lógica *Fuzzy*, na qual utiliza-se regras em vez de equações. As regras estão na forma de instruções IF-THEN (se – então). Onde IF é conhecida como o antecedente e THEN é o consequente (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010). As regras possuem estruturas do tipo:

SE premissa (antecedente), ENTÃO conclusão (consequente).

Segundo Macêdo (2012) a definição dos antecedentes e consequentes é feita através de funções de pertinência. Os antecedentes mapeiam a região *Fuzzy* no espaço das variáveis de entrada. Já os consequentes descrevem o espaço das variáveis de saída, qual seja a sua conclusão/ação.

3.3.3 Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Após a obtenção das regras, o passo seguinte é a inferência *Fuzzy*. De acordo com Almeida (2009) a Inferência é responsável pela determinação do grau de validade dos consequentes das regras e combina os resultados no conjunto *Fuzzy* que vai para a Defuzzificação e posterior para a saída.

Segundo Sumathi e Paneerselvam (2010) os métodos de inferência mais utilizados são os seguintes: Mamdani; Takagi-Sugeno e; Tsukamoto.

- **Método de Mamdani**

O modelo Mamdani é o método mais utilizado devido à sua estrutura min-max simples. Foi proposto com tentativa de controlar uma combinação de motores a vapor e caldeira. A Figura 21 apresenta um exemplo onde um sistema de inferência baseado no modelo de Mamdani com duas regras foi aplicado, onde:

- A_{11} e A_{12} - Referem-se ao primeiro e segundo antecedentes da primeira regra, respectivamente;
- B_1 refere-se ao consequente da primeira regra;
- A_{21} e A_{22} referem-se ao primeiro e segundo antecedentes, respectivamente, da segunda regra; e
- B_2 refere-se ao consequente da segunda regra.

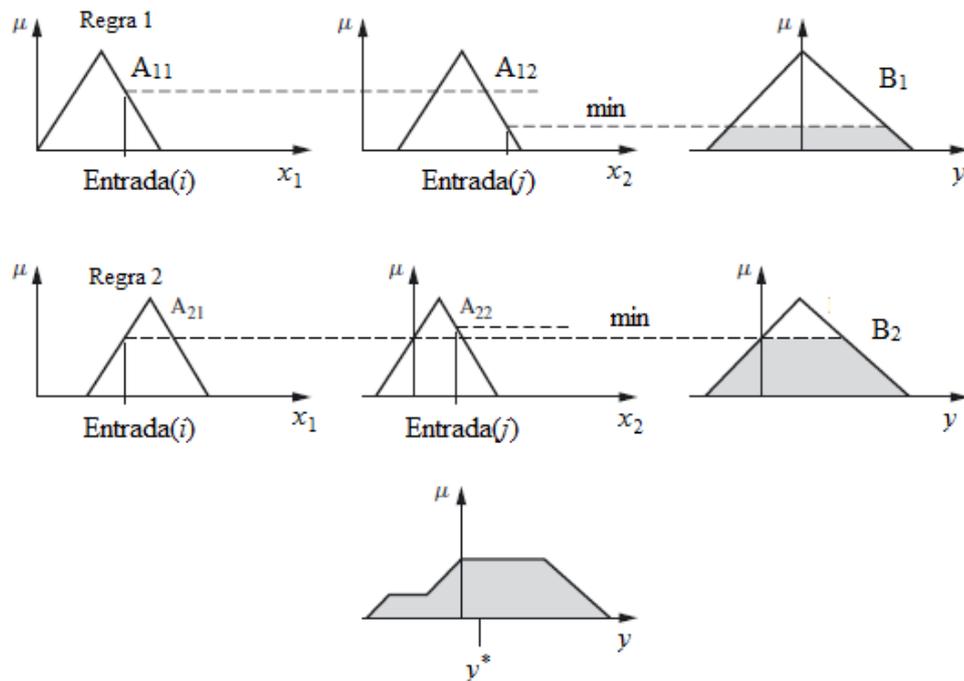


Figura 20 - Esquema Inferência Mamdani de duas regras
 Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

No sistema de Inferência de Mamdani a função mínima surge porque os pares de antecedentes são conectados pelo conectivo lógico “e”. Esse valor mínimo se propaga para o consequente e trunca a função de associação para o consequente, em cada regra, para operações disjuntivas, a operação de agregação é max, que compreende a parte individual de cada regra truncada (ROSS, 2010). Esse método utiliza os conjuntos *Fuzzy* como consequentes das regras.

- **Método de Takagi-Sugeno**

O modelo Takagi-Sugeno foi proposto em 1985, por Takagi e Michio Sugeno, com objetivo de desenvolver uma abordagem sistemática para gerar regras difusas. A inferência é semelhante à inferência Mamdani, por usar funções de variáveis de entrada como consequente, variando somente na avaliação das regras, uma vez que cada regra tem uma saída nítida e a produção global é obtida pelo método de média ponderada de Defuzzificação. (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010). A Figura 22 mostra um exemplo de um sistema de inferência baseado na teoria de Takagi-Sugeno com duas entradas x e y e saída z , possui a seguinte relação:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B, \text{ THEN } z \text{ is } z = f(x, y),$$

Onde,

$z = f(x, y)$ - é uma função nítida no consequente.
 x e y - entradas

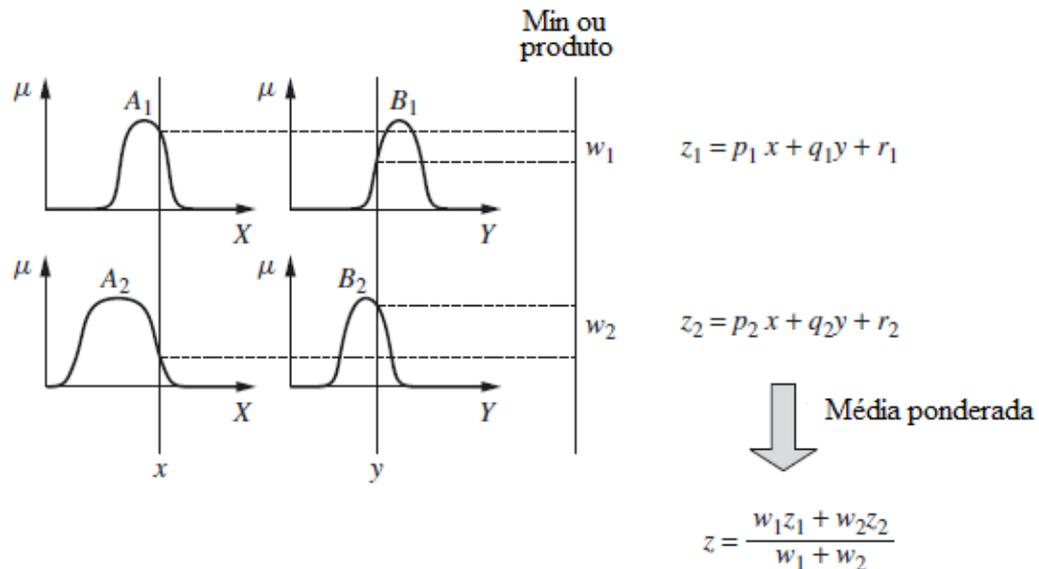


Figura 21 - Esquema Inferência Takagi-Sugeno de duas entradas
Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

De acordo com Ross (2010) a saída total de um sistema de inferência com o modelo Takagi-Sugeno é obtida através de uma média ponderada, devido cada regra possuir uma saída nítida, representada por uma função.

Para Sumathi e Paneerselvam (2010), com a utilização do método de média ponderada de Defuzzificação, o modelo de Takagi-Sugeno reduz o processo se comparado com o de Mamdani. Além disso, o método é computacionalmente eficaz em sistemas de controle, sendo adequado para problemas de adaptação e otimização.

- **Método de Tsukamoto**

O método de Tsukamoto utiliza como consequente uma função de associação monotônica, onde a saída inferida de cada regra é definida como um valor nítido induzido pelo valor de associação proveniente do antecedente da regra. Cada regra infere uma saída nítida, o valor total é calculado pela média ponderada da saída de cada regra, como mostra na Figura 23. O método deve ser empregado em situações específicas, devido à natureza especial das funções de associação de saída requeridas pelo método (ROSS, 2010).

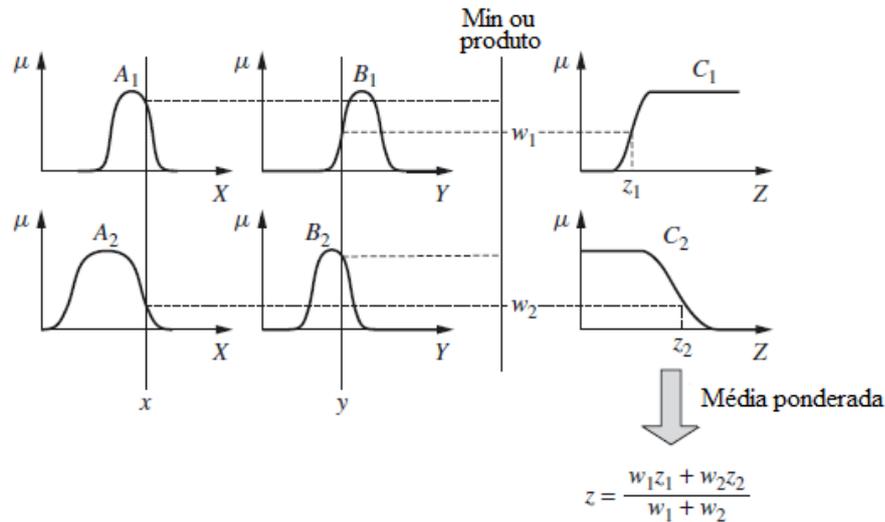


Figura 22 - Esquema Inferência Tsukamoto

Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

3.3.4 Defuzzificação

A Defuzzificação é a etapa final da Lógica *Fuzzy*, responsável pela transformação da variável de saída *Fuzzy* para um valor numérico. Desta forma, a Defuzzificação é uma etapa inversa à Fuzzificação, transformando saída do domínio *Fuzzy* para o domínio discreto. Existem diversos métodos de Defuzzificação, os mais aplicados são: Centro da Área (CAA), Média dos Máximos (MM) e Método das Alturas (MA).

Segundo Cox (1994) o método de Defuzzificação CAA é o mais utilizado, por possuir várias propriedades desejáveis, como: Os valores defuzzificados tendem a se mover suavemente em torno da região *Fuzzy* de saída, para mudanças na topologia do conjunto *Fuzzy* de um modelo para o próximo; fácil de calcular; pode ser aplicado às geometrias de conjunto de saída *Fuzzy*. A Figura 24 exemplifica o método de Defuzzificação de CAA.

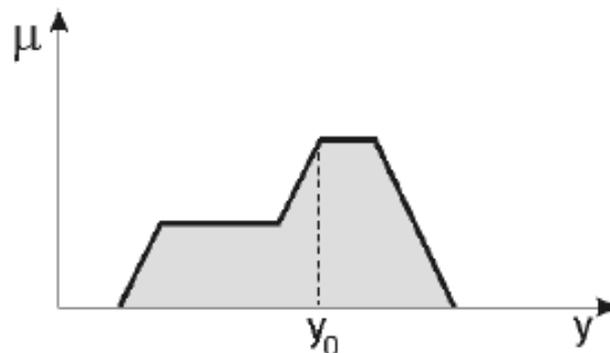


Figura 23 - Exemplo do método de Defuzzificação CAA

Fonte: Ortega, 2001.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram realizadas simulações usando o *software* MATLAB®. Inicialmente, as simulações foram executadas com o Controlador Clássico, através do *simulink*, um *Toolbox* do MATLAB®. Em seguida, o Controlador Clássico foi substituído por um Controlador *Fuzzy*, desenvolvido no *Fuzzy Logic Toolbox*, também pertencente à plataforma do MATLAB®.

Vale destacar que o *Simulink* é um *toolbox* muito utilizado no ramo acadêmico e também por grandes empresas em virtude de sua abrangência, robustez e confiabilidade. Portanto, foi utilizado o ambiente *SIMULINK*® para modelar, controlar e fornecer os ajustes apropriados para o modelo do sistema eólico e o modelo do Controle *Fuzzy*. Entretanto, a utilização do mesmo não é uma tarefa simples em sistemas de grande porte (como o presente nessa dissertação), que é necessário muito tempo e esforço para fazer as conexões e configurações adequadas dos blocos, pois configurações padrões presentes nos mesmos não se aplicam a todos os sistemas estudados, devendo ser ajustadas de acordo com o sistema modelado. Muitas das dificuldades encontradas nas implementações com o *simulink*, podem ser atribuídas a problemas de descontinuidades, ajustes inadequados dos blocos, variações rápidas das respostas, não definição de tempos comuns entre os blocos, etc.

Em adição, todos os blocos presentes na planta de simulação do *simulink*, que conduziu ao desenvolvimento desse trabalho, foram ajustados computacionalmente ao modelo usado, considerando-se a aplicação para o sistema eólico com controlador baseado em Lógica *Fuzzy*.

Nas seções seguintes serão apresentados o sistema eólico, a construção dos controladores, a escolha dos conjuntos *Fuzzy*, a escolha das regras e a estrutura *Fuzzy* utilizada.

4.1 SISTEMA EÓLICO UTILIZADO

A Figura 25 ilustra o sistema eólico presente em Sena (2015) e em destaque (retângulo tracejado) pode-se visualizar a conexão da topologia do sistema de potência que foi idealizado e adicionado ao modelo já existente. Para efeito de conexão à rede, a topologia foi constituída, da esquerda para a direita, por um conversor de potência, transformador e uma linha de transmissão (representada através de seu modelo pi equivalente). É importante

destacar que, em Sena (2015), o sistema alimentava apenas uma carga resistiva, realidade bem diferente da estudada no presente trabalho.

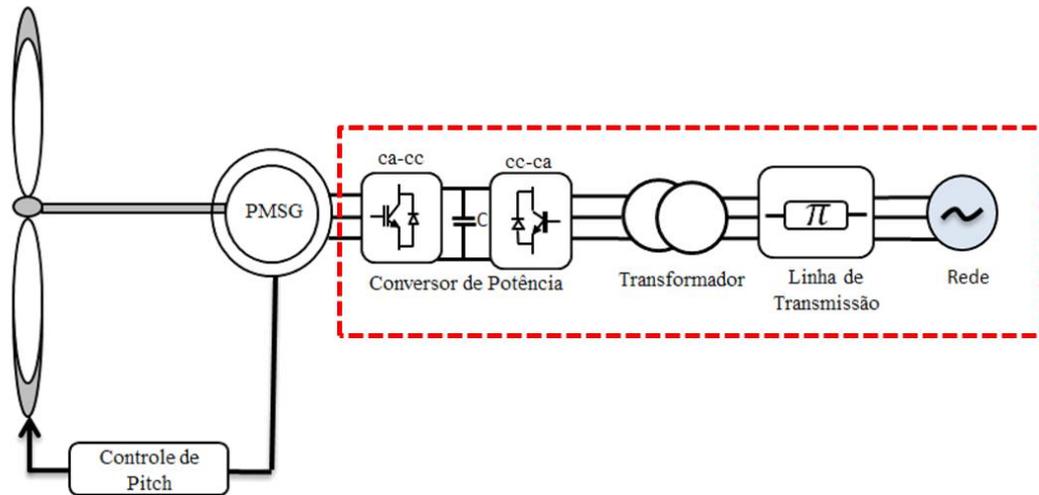


Figura 24 – Diagrama de blocos de um sistema eólico conectado à rede elétrica
Fonte: Autoria própria, 2017.

Tomando como base o modelo da Figura 25, desenvolveu-se no *SIMULINK*[®] o sistema apresentado na Figura 26, onde em destaque (retângulo tracejado) visualiza-se o modelo do sistema de potência desenvolvido no presente trabalho como forma de avaliar o desempenho do Controlador *Fuzzy*, bem como de sua referência, o Controlador Proporcional Clássico. O sistema simulado utiliza uma turbina eólica com gerador trifásico do tipo PMSG, com tensões trifásicas simétricas e equilibradas e potência nominal igual a 6,3 kVA, conectado à rede elétrica.

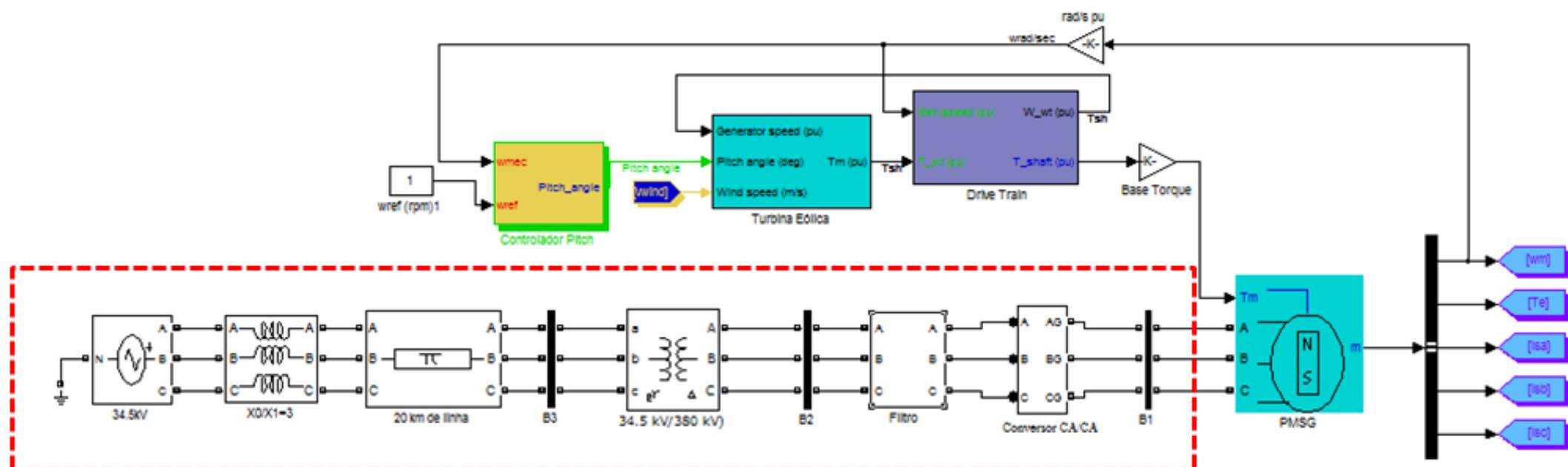


Figura 25 - Sistema eólico conectado à rede elétrica
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Tem-se que o transformador de potência da Figura 26 possui ligação estrela/triângulo, elevando a tensão de 380 V (na saída do Conversor) para 34,5 kV, a fim de ser transmitida, por meio de uma linha de transmissão de 20 km, até a rede elétrica.

A Figura 27 ilustra um conversor CA/CA que foi utilizado no sistema da Figura 25, que consiste de um retificador a diodos que alimenta um inversor de frequência com IGBT, através de um link CC (Corrente Contínua), sendo responsável pelo controle da forma de onda da tensão, independente da potência ativa e reativa que a máquina troca com a rede elétrica. O conversor conectado à rede é acionado de modo a controlar a tensão do barramento CC e o fator de potência de saída do gerador, e o conversor ligado à máquina é acionado de modo a assegurar o controle do fluxo e do conjugado eletromagnético da mesma.

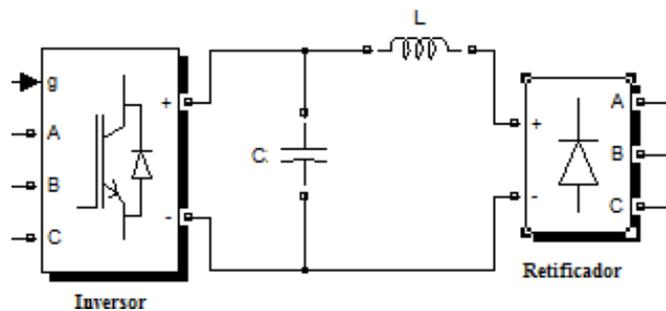


Figura 26 – Conversor CA/CA
Fonte – Autoria própria, 2017.

A seguir, serão fornecidos detalhes acerca da construção dos controladores que foram analisados no presente trabalho.

4.2 CONSTRUÇÃO DOS CONTROLADORES

Em sistemas de controle de ângulo de passo, o sinal é processado para que os mecanismos de controle atuem, mantendo o sistema sempre em sua região ótima de operação. A Figura 28 ilustra o Controlador *Pitch Fuzzy* implementado no *Simulink*. O controlador determina o melhor ângulo de *pitch*, através da comparação entre o erro (*Erro*) da velocidade referência do rotor (W_{ref}) e a velocidade atual (W_{mec}). Esse controlador é baseado na derivada da variação do erro ($\frac{d(Erro)}{dt}$). Desse modo pode-se prever as tendências da curva de resposta do sistema controlado.

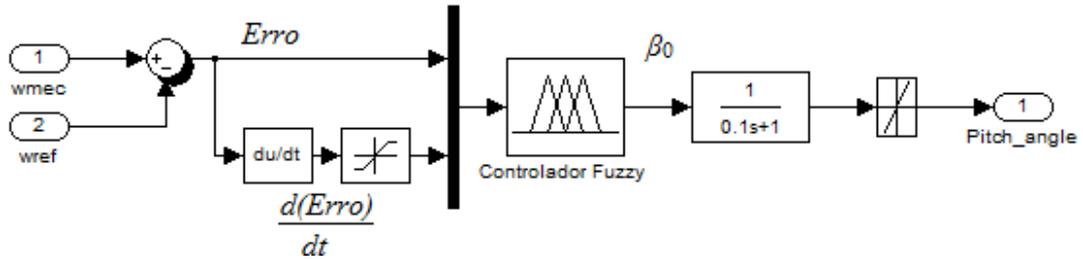


Figura 27 - Controlador *Pitch Fuzzy* implementado no Simulink
 Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

A Figura 29 ilustra o Controlador *Pitch Clássico* (CPC) implementado no *simulink*, com as mesmas variáveis de controle que o Controlador *Pitch Fuzzy* (W_{mec} e W_{ref}).

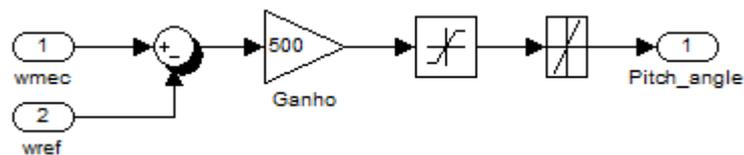


Figura 28 - Controlador *Pitch Clássico* implementado no *Simulink*
 Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

A seguir, aborda-se os principais detalhes do sistema *Fuzzy* utilizado no presente trabalho.

4.3 ESCOLHA DOS CONJUNTOS *FUZZY*

Conforme visto no capítulo 3, existem diversos tipos de funções de pertinência. No presente trabalho foram utilizadas funções trapezoidais e triangulares. As funções triangulares foram utilizadas no interior, enquanto que as funções trapezoidais nas extremidades.

Para denominar as funções de pertinência utilizou-se as seguintes variáveis linguísticas:

- Negativo Grande (NL);
- Negativo Médio (NM);
- Negativo Pequeno (NS);
- Zero (ZE);
- Pouco Positivo (PS);
- Positivo Médio (PM); e
- Positivo Grande (PL).

Na Figura 30 é apresentado o conjunto de funções de pertinência para a variável de entrada *Erro*, que representa o erro entre a velocidade atual do rotor e o valor de referência. Para essa entrada foram utilizadas 5 funções de pertinência com intervalo variando de -1 a 1.

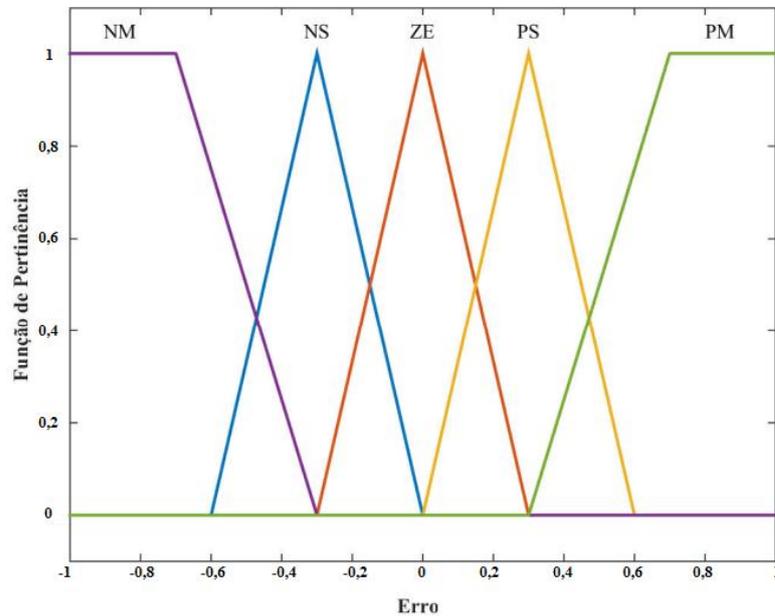


Figura 29 – Função de pertinência da entrada do controlador: Erro de velocidade do rotor
Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

A Figura 31 ilustra o conjunto de variáveis linguísticas para a variável de entrada *diffErro* (derivada do erro). Para essa entrada, foram utilizadas 7 funções de pertinências e um intervalo de -0,1 a 0,1.

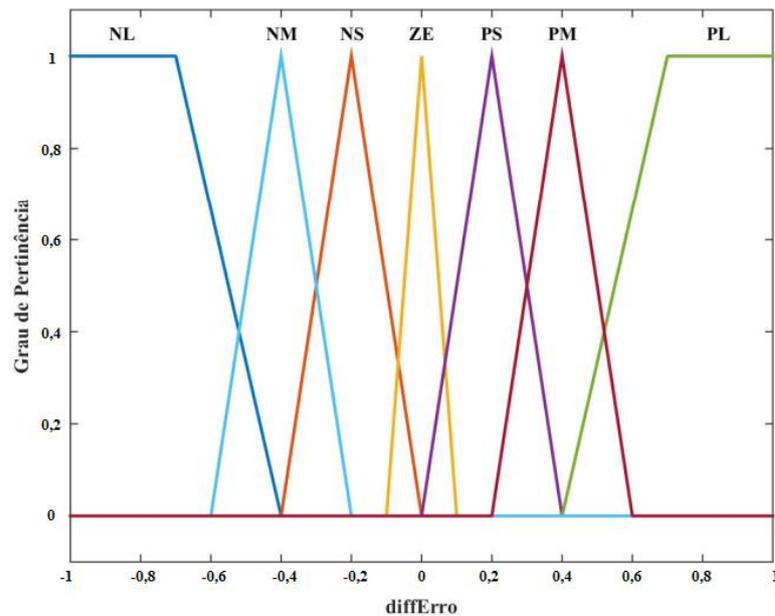


Figura 30 – Função de pertinência da entrada do controlador: Derivada do erro da velocidade do rotor
Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

A Figura 32 ilustra o conjunto de variáveis linguísticas para a variável de saída *pitchAngle*. Foram utilizadas 7 funções de pertinência e intervalo variando de -10° a 10° .

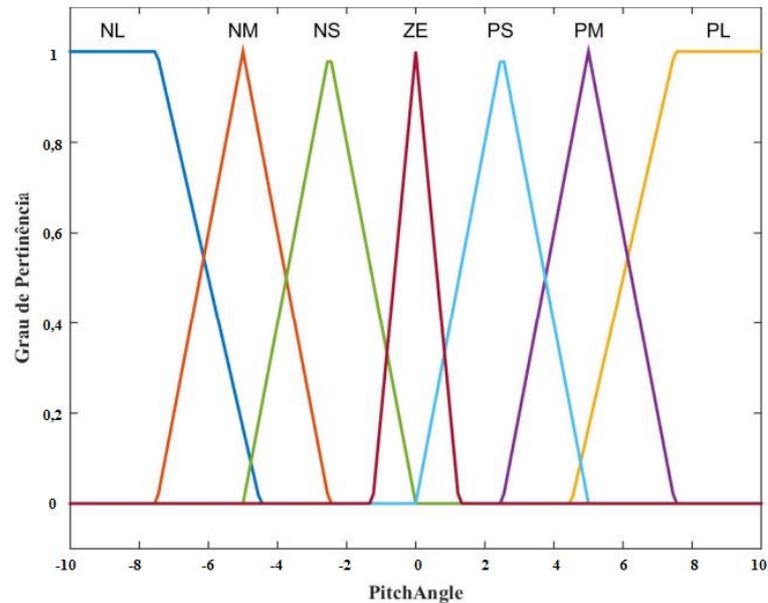


Figura 31 - Função de pertinência da saída do controlador: ângulo de *Pitch*
Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

Uma vez estabelecidas as funções de pertinência das variáveis de entrada e saída, é necessário determinar as regras do sistema *Fuzzy*. Como visto no capítulo 3, as regras definem a relação entre as entradas e saídas do sistema. Para criar tais regras é necessário um raciocínio coerente do analista. A Tabela 4 apresenta a base de regras para o sistema construído, descritas através de funções de pertinência ao invés de números. Sendo assim, não há necessidade de descrição do modelo matemático do sistema para representar as entradas e saídas.

Tabela 4 - Base de regras para o Controlador *Pitch Fuzzy*

<i>Derivada do Erro</i>	<i>Erro</i>				
	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
NL	NL	NL	NM	NM	NS
NM	NL	NL	NM	NS	ZE
NS	NL	NM	NS	ZE	PS
ZE	NM	NS	ZE	PS	PM
PS	NS	ZE	PS	PM	PL
PM	PM	PS	PM	PL	PL
PL	PS	PM	PL	PM	PL

Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

O conjunto de funções de pertinência e de regras anteriormente expostos são aqueles originalmente propostos por Sena (2015). É importante destacar que ao longo do presente trabalho, foram realizados diversos testes comparativos com diferentes tipos de funções de pertinências e conjuntos de regras *Fuzzy*, entretanto, verificou-se que as desenvolvidas por Sena (2015) possuíam melhor desempenho quando expostas as condições de simulações, por esse motivo as mesmas foram adotadas.

Como visto no capítulo 3, a Fuzzificação é o processo de transformação das variáveis de entrada para o domínio das variáveis *Fuzzy*, através de funções de pertinência, para o mapeamento das regras. A Figura 33 mostra como se relacionam as 35 regras expostas na Tabela 4.

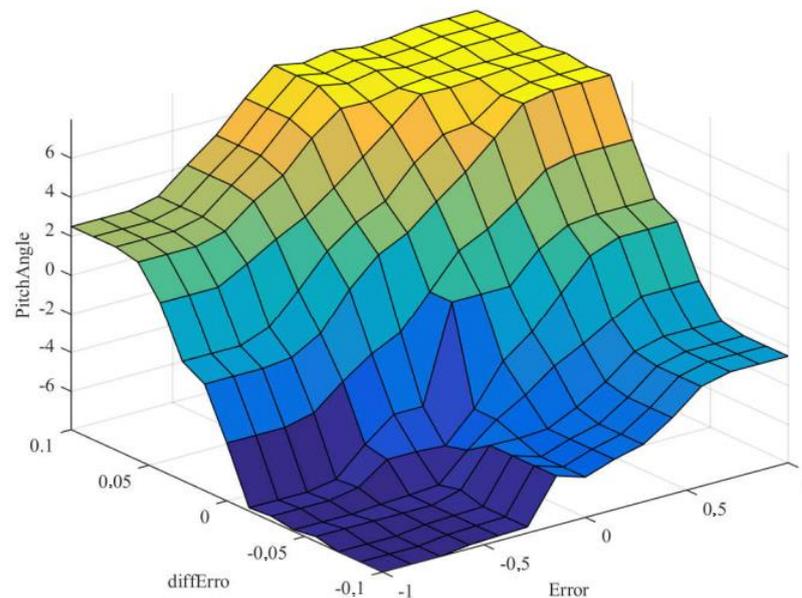


Figura 32 - Visualização da superfície de controle
Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

Na inferência, as decisões a respeito do processo são tomadas com base no teste das regras. Utilizou-se o método baseado na teoria de Mamdani, com a operação de agregação max, pois esse tipo de estratégia oferece melhor continuidade e uma saída mais suave.

O método de Defuzzificação utilizado foi o Centro da Área (CAA), visto na seção 3, que gera um número real como resultado, para ser utilizado no controle do ângulo de *pitch*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sistemas eólicos interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, dispensando o uso de baterias. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados. Para que a energia gerada seja entregue à rede elétrica com as corretas características elétricas, é necessário usar controladores eficientes. Como visto na seção 2.6.3, o controle de ângulo de *pitch* tem eficácia no controle de potência de sistemas eólicos de geração de eletricidade, sendo utilizado nesse trabalho.

De acordo com as características construtivas, a turbina utilizada nesse trabalho possui velocidade nominal de vento de 12 m/s, equivalente a 1 pu (por unidade), sendo a mesma exposta a ventos de baixa e alta intensidade. Como a velocidade do vento muda ao longo do tempo, a velocidade de rotação do sistema eólico deve ser controlada de modo que o gerador elétrico opere em condições nominais, evitando valores excessivos de velocidade, o que pode promover o desgaste precoce dos componentes da turbina eólica. A Figura 34 ilustra a curva de comportamento do regime de vento utilizado em função do tempo, onde os valores especificados estão expostos em pu. Esse regime de vento foi fielmente reproduzido de acordo com o presente em Sena (2015), desse modo, torna-se possível verificar se a modificação da carga isolada para um sistema conectado, em funcionamento normal, sem condições de falta, requer ou não uma alteração das regras propostas na referida dissertação.

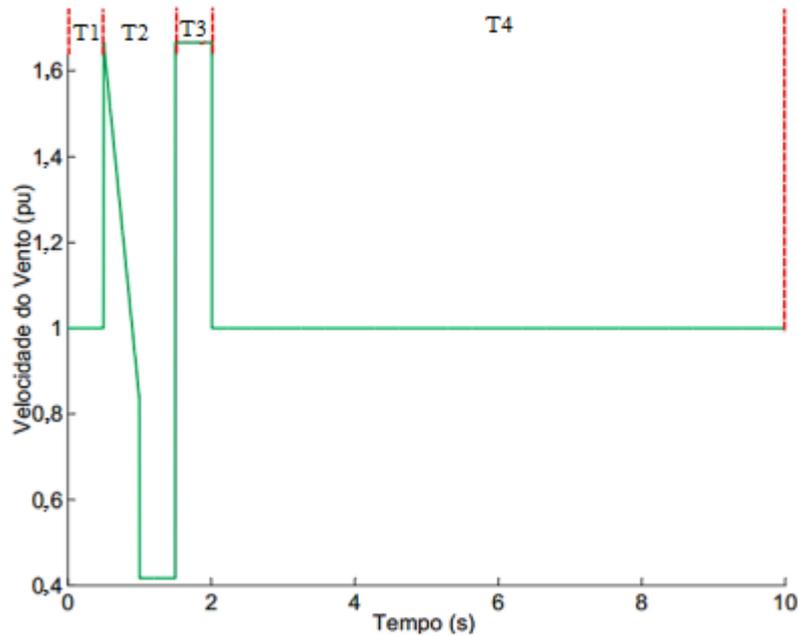


Figura 33 - Velocidade do vento em função do tempo
Fonte: Adaptado de Sena, 2015.

De acordo com a Figura 34, no intervalo de tempo entre 0 e 0,5 s (T1) o vento permanece constante com velocidade de 12 m/s e sobe instantaneamente, atingindo valores 66% acima de seu valor nominal. Entre 0,5 e 1,0 s a velocidade do vento baixa bruscamente para 42% de sua velocidade nominal, permanecendo constante até 1,5 s, onde chega a atingir novamente 66% acima de seu valor nominal, até o intervalo de tempo de 2,0 s (T4), onde ocorre a estabilização do vento em seu valor nominal. Vale salientar que todos os controladores serão submetidos ao perfil de vento apresentado anteriormente.

Quando o sistema é submetido ao regime de vento apresentado anteriormente, o controle atua e, essa resposta pode ser observada na Figura 35. Em T1, praticamente não há resposta do controlador, pois a velocidade do vento está no valor nominal. Entre T2 e T3, ocorre o acréscimo do ângulo de *pitch*, devido à variação da velocidade do vento, aumentando a frenagem aerodinâmica no sistema e conseqüente redução na velocidade do rotor. A tendência de aumento do ângulo *pitch* é mantida em T4, mostrando que o controle clássico possui um tempo de resposta alto. Na segunda parte de T4, ocorre uma redução do ângulo, devido à velocidade do vento está no valor nominal de operação, acarretando aumento na velocidade da turbina.

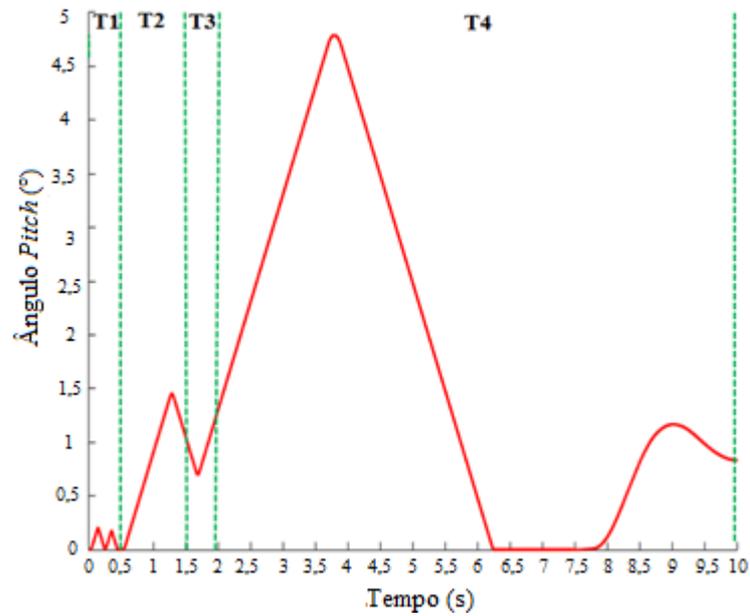


Figura 34 - Resposta do Controle *Pitch* Clássico
 Fonte: Autoria Própria, 2017.

A Figura 36 ilustra a resposta do controle *pitch*. Entre T1 e T3 o controlador atua, objetivando manter a potência do sistema próximo ao valor nominal. Em T4 o ângulo de *pitch* final é mantido próximo de $0,6^\circ$.

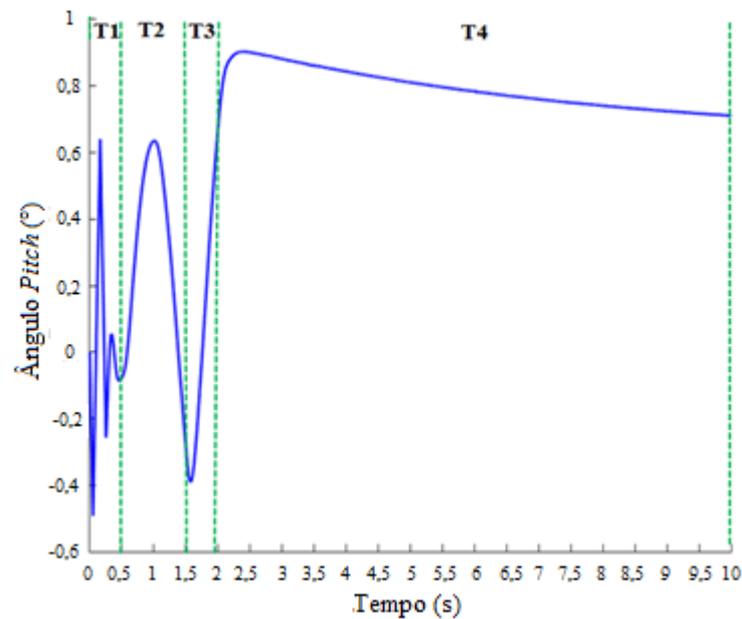


Figura 35 - Resposta do Controle *Pitch* Fuzzy
 Fonte: Autoria Própria, 2017.

Pode-se observar que este controlador possui tempo de resposta mais baixo que o proporcional clássico. Percebe-se também, um ajuste mais fino no ângulo de *pitch*, variando

entre -0,4 e 0,9, proporcionando um melhor aproveitamento dos ventos disponíveis nas pás do aerogerador, como mostrado nas Figuras 37, 38 e 39.

A Figura 37 mostra a potência final da unidade geradora, com a utilização dos dois sistemas de controle aqui apresentado.

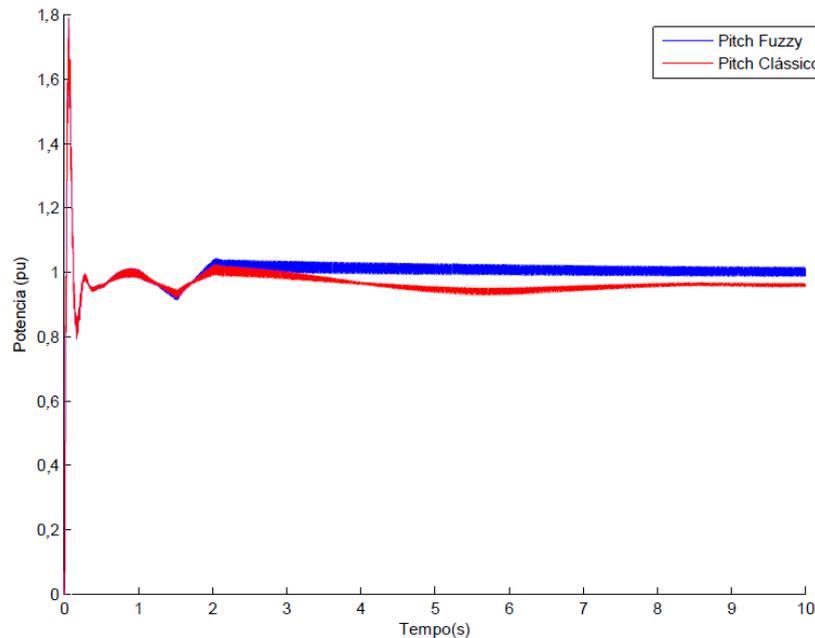


Figura 36 - Comparativo entre as potências geradas

Fonte: Autoria Própria, 2017.

A Tabela 5 apresenta os valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação, com critério de acomodação de $\pm 5\%$, para o sinal de potência gerada para os dois tipos de controles. Percebe-se que ambos controladores têm sobressinal praticamente iguais. Constatase também, que o Controlador *Fuzzy* obteve um tempo de acomodação de 6 s menor que o clássico.

Tabela 5 - Comparativo entre as potências geradas

Controle	Máximo Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Clássico	78,79	7,66
<i>Fuzzy</i>	78,80	1,66

Fonte: Autoria Própria, 2017.

Combinando os resultados da Figura 37 com os da Tabela 5, fica evidente que o Controlador *Fuzzy* obteve melhores resultados do que o Controlador Clássico, com menor oscilação do sinal, menor tempo de acomodação, menor erro em regime permanente e maior quantidade de potência gerada, com valor próximo ao nominal.

A Figura 38 mostra o comparativo entre os conjugados mecânico, responsável por converter a energia cinética translacional do vento em energia cinética de rotação no eixo do gerador.

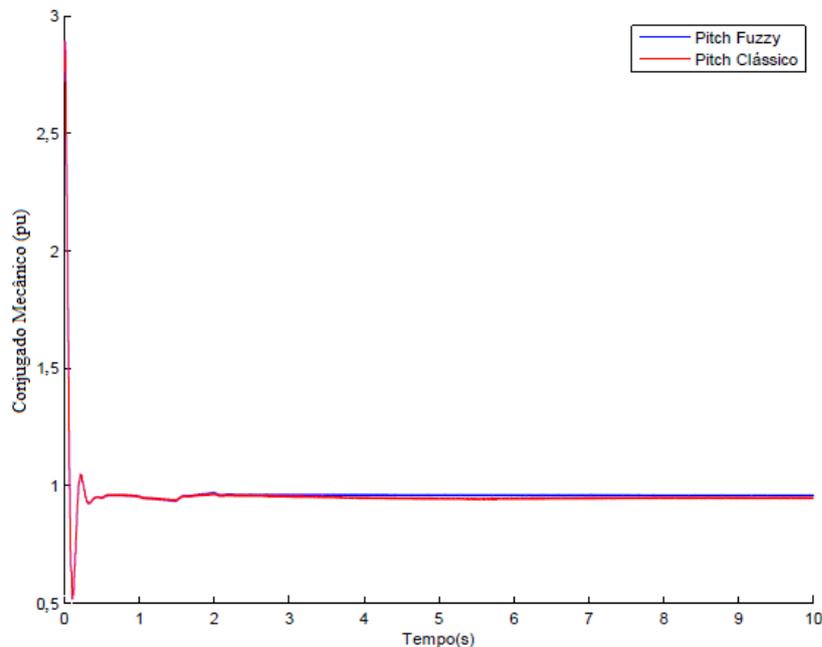


Figura 37 - Comparativo entre os conjugados mecânicos
Fonte: Autoria Própria, 2017.

A Tabela 6 apresenta os valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação, para o sinal do conjugado mecânico dos dois controladores. Nota-se que o Controlador *Fuzzy* e o clássico apresentaram sobressinal de 189,15%. Quanto ao tempo de acomodação, o Controlador *Fuzzy* foi bem mais eficiente que o Clássico, pois apresentou tempo de acomodação de 1,55 s. Para o critério de acomodação adotado, não foi possível medir o tempo acomodação para o controle clássico. Comparando esses resultados com os da Figura 38, conclui-se que apesar de os controladores possuírem respostas similares, o Controlador *Fuzzy* apresentou melhor performance por possuir menor tempo de acomodação e resposta final próximo ao valor nominal da turbina eólica.

Tabela 6 - Comparativo entre os conjugados mecânicos

Controle	Máximo Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Clássico	189,15	Não medido
<i>Fuzzy</i>	189,15	1,55

Fonte: Autoria Própria, 2017.

A Figura 39 mostra o comparativo entre as velocidades mecânicas do rotor.

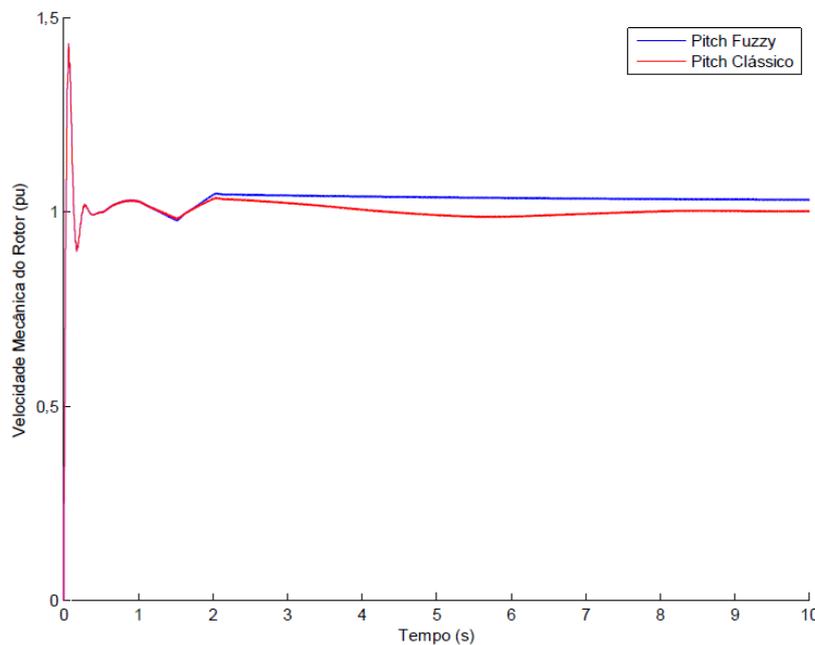


Figura 38 - Comparativo entre as velocidades mecânicas do rotor

Fonte: Autoria Própria, 2017.

Combinando as informações contidas na Figura 39 com a Tabela 7, que apresenta os valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação, para a velocidade mecânica do rotor dos dois controladores, percebe-se que possuem sobressinal e tempo de acomodação praticamente iguais. O Controlador *Fuzzy* apresentou melhor desempenho devido à menor variação do sinal, onde mais uma vez comprova sua eficiência ao compará-lo com o clássico.

Tabela 7 - Comparativo entre as velocidades mecânicas do rotor

Controle	Máximo Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Clássico	43,31	0,22
<i>Fuzzy</i>	43,32	0,22

Fonte: Autoria Própria, 2017.

Diante do comportamento dos controladores, apresentados nas Figuras 35 e 36, que foi constatado que o Controlador *Fuzzy* possui resposta mais rápida à variação do vento que o clássico e possui ajuste mais fino, consequentemente reduzindo a frenagem aerodinâmica no sistema e fazendo com que a velocidade do rotor tenda a acelerar, como mostra a simulação.

É importante destacar que o controle proporcional não atua especificamente no transitório do sistema controlado, em virtude disso verifica-se um sobressinal máximo no início dos gráficos (Figura 37, 38 e 39). Para contornar essa dificuldade poderia ser utilizado um controlador Proporcional-Derivativo (PD). A parcela derivativa (Kd) desse controle irá adicionar amortecimento ao sistema, estabilizando-o, e permitindo o uso de valores de Kp mais elevados, o que contribui para reduzir o erro em regime permanente.

A Figura 40 mostra as três tensões de linha na saída do conversor CA/CA. Uma das grandes preocupações, para este sistema, é que a potência entregue à rede elétrica apresente as condições de operação desejáveis.

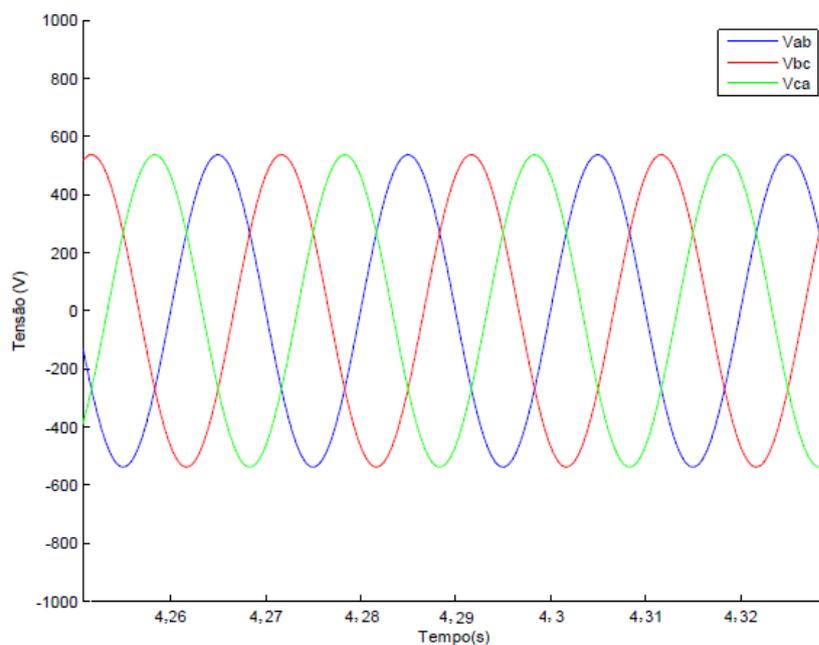


Figura 39 – Tensões de Linha na saída do conversor

Fonte: Autoria Própria, 2017.

De acordo com os resultados anteriormente abordados, verificou-se que o sistema de regras propostos em Sena (2015), onde o sistema eólico foi conectado a uma carga isolada puramente resistiva, apresentou comportamento similar ao mesmo sistema eólico, agora conectado à rede. Tais resultados, portanto, confirmam que não é necessário realizar a

modificação do sistema de regras quando a geração eólica passa de isolada para conectada à rede, isso porque as regras foram desenvolvidas levando em consideração o comportamento do sistema eólico, seja em condições normais de vento ou em condições desfavoráveis.

É importante destacar que não foram realizados estudos quanto à ocorrência de falhas na linha de transmissão ou outro componente do sistema proposto. Além disso, o presente trabalho não tem como um de seus objetivos o estudo da viabilidade técnico-econômica da aplicação do controlador proposto em sistemas reais.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho, utilizou-se sistema de Inteligência Artificial (IA), através do uso de um Controlador *Fuzzy* para aplicação em sistemas eólicos de velocidade variável, para simular seu desempenho quando conectado à rede elétrica. O projeto dos controladores e as simulações do sistema eólico foram realizados através do uso do *software* MATLAB[®], mais especificamente, através dos *toolbox's* SIMULINK[®] e *Fuzzy Logic Toolbox*. Além disso, o desempenho do controlador proposto foi comparado com o de um Controlador Proporcional Clássico funcionando nas mesmas condições de regime de vento e carga. Ambos os controladores foram responsáveis por controlar a variação do ângulo de inclinação de uma turbina eólica.

A construção do Controlador *Fuzzy* foi realizada de forma experimental, através da elaboração da base de regras e ajustes das funções de pertinências. O sistema é composto por duas entradas e uma saída, conforme apresentado na Figura 28. A simplicidade e robustez desse controlador permitiu verificar a eficácia do controle inteligente em comparação ao Controlador Clássico.

De acordo com as Figuras 35 e 36, que representam a variação do *pitch* para cada tipo de controlador, verificou-se que o Controlador *Fuzzy* possui tempo de resposta menor que o Proporcional Clássico, o que resultou, conseqüentemente, em melhoria na quantidade e qualidade da energia gerada.

De acordo com as Figuras 37, 38 e 39, que mostram, respectivamente, o comparativo entre as potências geradas, entre os conjugados mecânicos e entre as velocidades mecânicas do rotor, pode-se afirmar que o Controlador *Fuzzy* se mostrou mais eficiente que o Controlador Clássico, quanto aos sinais analisados, apresentando uma redução no tempo de acomodação, uma menor oscilação do sinal e um maior aproveitamento dos ventos disponíveis, proporcionando uma maior quantidade de potência gerada.

Os Controladores Clássicos necessitam de um modelo matemático preciso do sistema a ser controlado e a obtenção deste modelo pode ser complexa, devido a não linearidade do vento. Muitas vezes esses modelos distanciam o sistema modelado do sistema real, causando erro nos controladores. Já a Lógica *Fuzzy* tem a possibilidade de modelar e manipular esses sistemas, sem o modelo matemático. Diante do que foi apresentado, pode-se afirmar que a Lógica *Fuzzy* é uma solução viável no controle de potência e na qualidade da energia gerada

em sistemas eólicos conectados à rede elétrica para diferentes condições de regime do evento. Resultados preliminares mostram que o sistema aqui aplicado, pode contribuir na redução de harmônicos gerados pelo comportamento não linear do vento em turbinas eólicas. Esse efeito pode ser atribuído a um tempo de acomodação muito baixo e conseqüente redução no erro em regime permanente, observados a partir da inclusão do Controlador *Fuzzy* ao sistema de geração.

Para trabalhos futuros sugere-se que o sistema aqui estudado, seja exposto as condições de falhas como, por exemplos, curtos-circuitos para avaliar o comportamento do Controlador *Fuzzy*. Além disso, sugere-se a aplicação do controle utilizado com o gerador do tipo DFIG bem como a implementação de outras turbinas eólicas conectadas à rede elétrica, desta forma, será possível obter resultados práticos, que devem ser comparados com os resultados experimentais que foram abordados na presente dissertação.

REFERÊNCIAS

ABAD, G., LOPEZ, J., RODRIGUEZ, A. M., MARROYO, L., IWANSKI, G. ***Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation***. IEEE Press *Power Systems Engineering Series*. IEEE Press, Sep 2011.

ACKERMANN, T. ***Wind Power in Power Systems***. Stockholm: Wiley, 2005. 691 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (BRASIL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2.ed. Brasília: ANEEL, 2005. 152 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (BRASIL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 233 p.

ALMEIDA, A. M. F. **Otimização Multiobjetivo e Lógica Fuzzy Aplicados ao Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição**. 2009. 126 p. Tese (Doutorado) – UFCG, Campina Grande. 2009.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília, 2001.

ARTERO, A. O. **Inteligência Artificial: Teórica e Prática**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2009. 230 p.

Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEÓLICA). **Boletim Anual de Geração eólica 2014**. 2015. 15 p.

BONELLI, A. F. **Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica**. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

CALDEIRA, A. M., JUNIOR, H. A., MACHADO, M. A. S., SOUZA R. C., TANSCHKEIT, R. **Inteligência Computacional Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab®**. São Paulo: Thomson, 2007. 370 p.

CARVALHO, B. C. **Desenvolvimento de Modelo computacional de Sistemas Eólicos Utilizando Geradores Síncronos para Estudos de Desempenho no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**. 213 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2006.

CAVALCANTI, J. H. F.; MELO, H.; SOUTO, C. R.; CAVALCANTI, M. T. **Lógica fuzzy aplicada às engenharias**. João Pessoa, 2012. 150 p.

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). **Energia Eólica - princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro, Centro de Referência para Energias Solar e Eólica (Revisão 2008).

COX, E. *The Fuzzy Systems Handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. Academic Press, 1994. 623p.

DADIOS, E.P., *Fuzzy Logic – Controls, Concepts, Theories and Applications*. InTech, 2012, 428p.

DELGADO, M. R. B. S. **Projeto Automático de Sistemas Nebulosos: Uma Abordagem Co-Evolutiva**. 186 p. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2002.

DUTRA, R (org.). Energia eólica: princípios e tecnologias. Centro de referência para energia solar e eólica Sergio de Salvo Brito (CRESESB), 2008. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica_e-book.pdf

FERREIRA, J. **Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados em Turbinas Eólicas**. 69 p. Dissertação (mestrado). Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2009.

GUERRA, J. B. S. O. A.; YOUSSEF, A. Y.; REBOLLAR, P. B. M.; RODRIGUES, P. R. **O Legado do JELARE e as Energias Renováveis**. 1. ed. Palhoça, Santa Catarina: Editora UNISUL, 2012. 330p.

HAU, E. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economies, second edition*. Springer. 2006. 783 p.

JÚLIO, E. F. X. **Controlador fuzzy aplicado a um sistema de controle de posição acionado por motores de indução trifásicos**. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

MACÊDO, A. V. A. **Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina Eólica Utilizando Lógica Fuzzy**. 2012. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MARTINELLO, D.; **sistema de emulação de aerogeradores para aplicação em geração distribuída de energia elétrica**. 117 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**, John Wiley & Sons, 2004. 654 p.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox™**: User's Guide. Desconhecido: Mathworks, 2016. 388 p.

MUYEEN, S.N., TAMURA, T., MURATA, T. **Stability Argumentation of a Grid-connected Wind farm**, 1st ed., Ed. London, US: Springer, 2009.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a problemas de biomedicina**. 2001. 152 f. Tese (Doutorado) – USP, São Paulo. 2001.

RODRIGUES, P. R. (org.). Energias Renováveis: Energia Eólica. **Consórcio de Universidades Européias e Latino-Americanas em Energias Renováveis (JELARE)**, 2011. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica_e-book.pdf

ROSS, T. J., **Fuzzy Logic with Engineering Application**, 3rd ed. USA: John Wiley & Sons, 2010. 585p.

SENA, F. C. B. **Controle Fuzzy aplicado à otimização de um sistema eólico de velocidade variável**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SUMATHI, S.; PANEERSELVAM, S.; **Computational intelligence and paradigms: theory & applications using MATLAB**. Boca Raton, Fl: Taylor And Francis Group, Llc, 2010. 821p.

TSUCHIDA, A. L. **Aspectos metodológicos acerca da modelagem de turbinas eólicas**. 2012. 127 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica Com ênfase em Sistema de Energia e Automação, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

WU, B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power Conversion and Control of wind energy Systems**. Canada: IEEE Press Editorial Board, 2011. 453 p.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. *Information and Control*, v. 8, 1965. p. 338–353.