



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

**FRANCISCO DAS CHAGAS BARBOSA DE SENA**

***CONTROLE FUZZY APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM  
SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL***

**MOSSORÓ – RN  
2015**

**FRANCISCO DAS CHAGAS BARBOSA DE SENA**

***CONTROLE FUZZY APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM  
SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL***

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

Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura- UFERSA

**MOSSORÓ – RN  
2015**

**FRANCISCO DAS CHAGAS BARBOSA DE SENA**

**CONTROLE FUZZY APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO DE VELOCIDADE VARIÁVEL**

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.

APROVADA EM: 26/Junho/2015.

**BANCA EXAMINADORA**



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



Prof. Dr. Adriano Aron Freitas de Moura (Membro interno - UFERSA)



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



Prof. Dr. Elmer Rolando Llanos Villarreal (Membro interno - UFERSA)

Mossoró, 26 de Junho de 2015.

**Catálogo de Publicação na Fonte. UFERSA**  
**BIBLIOTECA CENTRAL ORLANDO TEIXEIRA - CAMPUS MOSSORÓ**

Sena, Francisco das Chagas Barbosa de.

Controle Fuzzy aplicado à otimização de um sistema eólico de velocidade variável / Francisco das Chagas Barbosa de Sena. - Mossoró, 2015.

76f: il.

1. Lógica Fuzzy. 2. Ângulo de Pitch. 3. Geração eólica. 4. Turbina eólica. I. Título

RN/UFERSA/BCOT/392  
S474c

CDD 511.3223

## DEDICATÓRIA

In memoriam de meu pai Francisco das Chagas de Sena, um grande ser humano, íntegro e correto. Desde cedo me educou, acreditou em meu potencial e mostrou-me que o conhecimento é algo importante, e privilégio de poucos.

A minha mãe Maria do Socorro Barbosa Rodrigues, uma grande mulher, exemplo de superação, de coragem e de amor, que sempre buscou o melhor para os seus filhos.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela coragem e determinação que me foi dada ao longo desses anos e por ter permitido que eu alcançasse esse momento tão importante em minha vida e na vida de familiares e amigos, fazendo com que tudo pudesse ocorrer da melhor forma possível. Obrigado Senhor por todas as bençãos e minha vida!

Aos meus pais Francisco das Chagas de Sena (*in memoriam*) e Maria do Socorro Barbosa Rodrigues, pelo cuidado, apoio, amor e por terem sempre acreditado e me incentivado em todos os momentos.

A minha amada esposa Audeiza pelo amor, conselhos, paciência e dedicação. Ao longo desses anos você foi de fundamental importância.

Aos meus irmãos Cláudio, Euda, Francisca, Graça e Eudes, que mesmo distantes fisicamente, sempre foram meus companheiros. Todos vocês contribuíram diretamente para que eu trilhasse um caminho correto e me ajudaram a ter conforto e tranquilidade em desenvolver um bom trabalho, aqui registro meus agradecimentos aos senhores.

Aos professores e amigos José Patrocínio e Adriano Aron, agradeço a confiança e disponibilidade dos senhores para comigo e pelo importante auxílio, necessário para o desenvolvimento do presente trabalho.

Às instituições UFERSA e UFRN pelas estruturas disponibilizadas para realização das atividades do mestrado e a CAPES pelo suporte financeiro.

Sei que muitas pessoas deixaram de ser citadas, mas deixo registrado os meus sinceros agradecimento a todos, que da minha memória jamais serão esquecidos.

## **EPÍGRAFE**

O temor do Senhor é o princípio da sabedoria,  
e o conhecimento do Santo a prudência.  
(Provérbios 9:10)

## RESUMO

O desenvolvimento de um modelo matemático para um sistema de geração de energia eólica, pode se tornar uma tarefa muito complexa, podendo ser fortemente dependente da variação do vento, além de se caracterizar como um problema não linear. Devido a estas características, a análise pode ser realizada utilizando um sistema de controle baseado em Lógica *Fuzzy* (LF), o que poderia promover melhor performance ao sistema a ser controlado. No presente trabalho, o desempenho de uma turbina eólica de velocidade variável controlado por um controlador proporcional clássico (CPC) e um controlador *fuzzy* (FLC) para promover ajuste ao ângulo *pitch* são analisados. Dessa forma, é possível verificar a eficácia da aplicação LF, sua capacidade de evitar flutuações e melhorar da qualidade da potência gerada, independentemente das condições de vento ao qual o sistema está submetido. O CPC e o FLC foram implementados utilizando *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>* e *Simulink<sup>®</sup>*, *toolboxes* disponíveis no *software* MATLAB<sup>®</sup>. Os resultados mostram que a aplicação em questão pode efetivamente contribuir para a melhoria do desempenho dinâmico da turbina no tocante a redução de oscilações, máximo sobresinal e tempo de acomodação.

*Palavras-Chave:* Lógica *Fuzzy*, Ângulo de *Pitch*, Turbina eólica, Geração eólica.

## ABSTRACT

The development of a mathematical model for a system of wind power generation is complex, can be strongly affected by the wind variation and it's a non-linear problem. Due to these characteristics the analysis can be performed using a control system based on fuzzy logic, which improves a better adjust of the system to be controlled. In this paper, the performance of a variable-speed wind turbine controlled by a classic proportional controller (CPC), and a fuzzy logic controller (FLC) to adjust the angle of inclination of the blades is analyzed. In this case, it's possible to verify the effectiveness of the application of fuzzy logic, the ability to avoid fluctuations and improvement of the quality of electric power output, regardless of the original features of the proportional control applied. The CPC and the FLC were implemented using the Fuzzy Logic Toolbox™ and SIMULINK® software packages available in MATLAB®. The results show that the application of fuzzy logic to adjust the parameters of a controller can improve the dynamic performance of the wind turbine with respect to reducing the onset of fatigue loads, weather fluctuations and stabilization of electric power output.

*Keywords*— Fuzzy logic, Pitch angle, Wind turbine, Wind power generation.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b> .....	xv
<b>CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1. MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA .....	19
1.2. OBJETIVOS .....	21
1.3. METODOLOGIA .....	21
1.4. CONTRIBUIÇÕES.....	22
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
<b>CAPÍTULO 2 -SISTEMAS EÓLICOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA</b> .....	24
2.1. SISTEMAS EÓLICOS .....	24
2.2. AEROGERADORES E SEUS COMPONENTES .....	25
2.3. CLASSIFICAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS EÓLICOS.....	27
2.3.1. <b>Sistemas Eólicos de Velocidade Fixa</b> .....	30
2.3.2. <b>Sistemas Eólicos de Velocidade Variável</b> .....	31
2.4. FORÇAS ATUANTES NAS PÁS DA TURBINA EÓLICA .....	34
2.5. LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA .....	35
2.5.1. <b>Controle Stall</b> .....	36
2.5.2. <b>Controle Pitch</b> .....	37
2.6. REGIÃO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA EÓLICO .....	38
2.7. COEFICIENTE DE POTÊNCIA.....	39
<b>CAPÍTULO 3 -LÓGICA FUZZY</b> .....	43
3.1. CONJUNTOS FUZZY E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA .....	45
3.2. NÚMERO FUZZY .....	47
3.3. OPERAÇÕES ENTRE CONJUNTOS FUZZY .....	48
3.4. REGRAS FUZZY .....	49

3.5. INFERÊNCIA .....	51
3.5.1. Métodos de Inferência Fuzzy .....	53
3.6. DESFUZZIFICAÇÃO .....	55
<b>CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>56</b>
4.1. MODELOS EÓLICOS PROPOSTOS PARA SIMULAÇÃO .....	56
4.2. CONSTRUÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY PITCH PROPOSTO.....	57
4.3. ESCOLHA DOS CONJUNTOS FUZZY .....	59
4.4. DETERMINAÇÃO DAS REGRAS .....	61
4.5. FUZZIFICAÇÃO, INFERÊNCIA E DEFUZZIFICAÇÃO .....	62
<b>CAPÍTULO 5 -RESULTADOS E DISCURSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 6 -CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>PUBLICAÇÕES ASSOCIADAS À DISSERTAÇÃO.Erro! Indicador não definido.</b>	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes da curva de potência .....	41
Tabela 2- Conjuntos de regras para o Controlador Pitch Fuzzy .....	62
Tabela 3 – Comparativo entre as potências geradas para casa sistema .....	68
Tabela 4- Comparativo entre os torques eletromagnético para cada controle...	69

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral de um SEGE.....	24
Figura 2 - Principais equipamentos e sistemas uma turbina eólica .....	26
Figura 3 (a) Turbina Eólica de eixo horizontal; (b) Turbina eólica de eixo vertical. ....	27
Figura 4 (a) Turbina <i>down-wind</i> ; (b) Turbina <i>up-wind</i> .....	28
Figura 5- Sistema de velocidade fixa com gerador de indução e rotor em gaiola de esquilo.....	30
Figura 6-Sistema de velocidade variável com gerador síncrono e rotor bobinado .....	32
Figura 7- Sistema com gerador de Indução tipo gaiola de esquilo.....	32
Figura 8- Sistema com gerador de indução duplamente alimentado.....	33
Figura 9- sistema de velocidade variável com gerador de ímãs permanentes.....	34
Figura 10 - Atuação das forças aerodinâmicas sobre a pá de um rotor .....	35
Figura 11 - Efeito Estol .....	36
Figura 12 - Modelo simplificado de controle de ângulo pitch .....	37
Figura 13 - Regiões de operação de uma turbina eólica.....	38
Figura 14 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.....	39
Figura 15-Coeficiente de potência versus razão de velocidade.....	42
Figura 16 - Sistema Fuzzy .....	45
Figura 17 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação fuzzy .....	46
Figura 18 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação binária.....	46
Figura 19 - Função de pertinência do subconjunto fuzzy A e B .....	48
Figura 20 Resultado da união entre o subconjunto fuzzy A e B .....	48
Figura 21 - Resultado da interseção entre o subconjunto <i>fuzzy</i> A e B .....	49
Figura 22 - Resultado da complementação entre o subconjunto fuzzy A e B.....	49
Figura 23 - Processo de inferência fuzzy.....	51
Figura 24 - Esquema de um método de inferência Mamdani.....	53
Figura 25 - Esquema de um método de inferência Takagi-Sugeno.....	53
Figura 26 - Forma geral de regra para o método de inferência Takagi-Sugeno .....	54
Figura 27 - Sistema eólico isolado conectado a uma carga puramente resistiva.....	56
Figura 28 - Modelo em bloco da turbina eólica .....	57
Figura 29 - Modelo em bloco do <i>drive-train</i> da turbina.....	57
Figura 30 - Topologia do sistema eólico com o controle fuzzy proposto .....	58

Figura 31 - Controlador Pitch Fuzzy implementado no Simulink .....	58
Figura 32 - Controlador Pitch Clássico implementado no Simulink.....	59
Figura 33 - Erro do sistema definido em termos de conjunto fuzzy.....	60
Figura 34 - Derivada do erro do sistema definido em termos de conjunto fuzzy.....	60
Figura 35 - Ângulo beta definido em termos de conjunto fuzzy .....	61
Figura 36 - Visualização da superfície de controle .....	62
Figura 37 - Velocidade do vento (por unidade).....	65
Figura 38 - Resposta do controle pitch clássico .....	66
Figura 39 - Resposta do controle pitch fuzzy .....	66
Figura 40 – Comparativo entre as potências geradas .....	67
Figura 41 - Comparativo entre os torques eletromagnéticos.....	69

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área varrida pelas pás
$A_1$	Área transversal do volume de vento de entrada na turbina
$A_2$	Área transversal do volume de vento de saída
AG	Algoritmo Genético
CA	Corrente Alternada
CA	Cento da Área
CC	Corrente Contínua
$C_p$	<i>Coeficiente de Potência</i>
CM	Centro de Máximo
CPC	Classic Proporcional controller
<i>derErro</i>	Derivada do Erro
DFIG	<i>Doubly Fed Inductionn Generator</i>
<i>Erro</i>	Erro entre a velocidade atual do rotor e a referência
FIS	Fuzzy Inference System
FPC	Fuzzy Proporcional Controller
IA	Inteligência Artificial
LF	Lógica Fuzzy
MM	Média dos Máximos
MOM	Método da Média dos Máximos
NL	Muito Grande
NM	Negativo Médio
NS	Negativo Pequeno
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
<i>pitch_angle</i>	Ângulo pitch de saída
PL	Positivo Grande
PM	Positivo Médio
$P_{mec}$	Potência Mecânica
PMSG	Permanent Magnet Síncrono Generator
PS	Pouco Positivo
R	Raio das pás
RN	Redes Neurais
SIN	Sistema Interligado Nacional
SEGE	Sistema Eólico de Geração de Energia
$T_{mec}$	Conjugado Mecânico
U	Universo de discurso
$V_1$	Velocidade do vento de entrada da turbina

$V_2$	Velocidade do vento de saída da turbina
$ZE$	Zero
$\beta$	Ângulo pitch atual ( $^{\circ}$ )
$\beta_d$	Ângulo pitch desejado ( $^{\circ}$ )
$\beta_o$	Ângulo pitch atual ( $^{\circ}$ )
$\lambda$	A razão de velocidade
$\mu$	Grau de pertinência
$\rho$	Densidade do ar
$\omega_{ref}$	Velocidade de referência
$\omega_{rotor}$	Velocidade mecânica do rotor

## Capítulo 1 - Introdução

Nos últimos anos, é possível perceber um constante crescimento na utilização de fontes renováveis de energia para geração de eletricidade, principalmente energia solar e eólica. Entretanto, devido a este tipo de produção ser altamente dependente do tempo, o sistema de controle desempenha um importante papel na eficiência do processo e no preço final do kW gerado.

Os sistemas eólicos de geração de energia são geralmente caracterizados por baixa densidade de energia, comportamento estocástico (YANJING, WENZHAN, 2011) e, quando na presença de fortes turbulências, possuem comportamento não linear (ZHANG *et. al*, 2008). Além disso, podem apresentar comportamentos dinâmicos que não são completamente conhecidos (CALDERARO *et. al*, 2007) dificultando assim aplicações de técnicas convencionais de controle, como por exemplo, controle PI, que são tradicionalmente usados.

A energia eólica é capturada usando uma estrutura chamada de turbina eólica, tal tecnologia tem ao longo dos anos sofrido grande evolução construtiva. Como resultado, a capacidade de produção eólica passou da ordem de kW para MW. As turbinas de eixo horizontal podem ser classificadas em dois modelos: sistemas de velocidade fixa e sistemas de velocidade variável. O segundo é mais utilizado do que o primeiro em virtude de melhorar a qualidade da energia gerada e por possui maior faixa de operação.

De acordo com Baygildina, Hynynen, e Pyrhonen (2012), os principais desafios enfrentados pelo controle quando aplicados em sistemas eólicos convencionais são: obter máxima conversão de potência eólica para uma ampla faixa de velocidade de vento; e evitar oscilações mecânicas prejudiciais. Para tanto, pode-se utilizar sistemas eólicos de velocidade variável com controle *pitch*, responsável por movimentar continuamente as pás da turbina. Tal ação proporciona melhor desempenho para a potência gerada e reduz os esforços mecânicos na estrutura da turbina o que leva a redução de desgastes e despesas com manutenções não programadas. O movimento das pás ocorre através de dispositivos hidráulicos e eletrônicos que movimentam as pás em torno de seu eixo horizontal (TAN, 2000).

Sistemas de controle através de lógica fuzzy tem ao longo dos últimos anos, crescido em popularidade e aplicações entre os engenheiros. Este aumento pode ser

atribuído ao fato de esta técnica permitir através de um método sistemático descrever grandezas que são imprecisas, incertas e difusas através da emulação da forma de raciocínio humano, diferentemente das técnicas tradicionais. Além disso, tais sistemas não requerem o completo conhecimento matemático do sistema a ser controlado e são adequados para aplicações envolvendo situações de não linearidade.

Há mais de uma década diversos produtos industriais e comerciais possuem mecanismos cujos funcionamentos baseiam-se em lógica fuzzy (LF), tais como: máquinas de lavar roupas (Sanyo), geladeiras (Sharp), ar condicionados (Mitsubishi), fornos de micro-ondas (Sanyo), câmeras de vídeo (Canon) etc. Também é possível citar aplicações na indústria automotiva como transmissão automática (Nissan), injeção eletrônica, veículos autoguiados e robôs móveis (NASA, IBM), etc. Além disso, na linha de automação predial pode-se citar o controle de grupo de elevadores (Hitachi, Toshiba), controle de motores (Hitachi), sistema de ventilação de túneis urbanos (Toshiba) etc (COELHO; ALMEIDA; e COELHO, 2003). Como é possível perceber, as aplicações envolvendo lógica *fuzzy* podem ser encontradas nas mais diversas áreas.

Tomando como base alguns artigos direcionados ao tema proposto, tem-se que Macêdo (2012) utilizou a lógica fuzzy para fazer o estudo comparativo entre fazendas eólicas utilizando geradores de indução convencional com controle *pitch* e fazendas eólicas utilizando DFIG, na tentativa de determinar qual configuração seria mais eficiente, em termos de geração, e apresentar o controle fuzzy como uma alternativa a utilização dos controles clássicos PI. Para o desenvolvimento do conjunto fuzzy, Macêdo (2012) utilizou um regime de vento simples, além de um sistema de regras baseado somente na variação da potência, o que resultou em um total de 7 regras.

Continuando as aplicações fuzzy em sistemas eólicos, tem-se que Kadri e Khan (2012) analisaram o desempenho de um controlador neural-fuzzy na tentativa de limitar o torque aerodinâmico do sistema e dessa forma manter a potência de saída dentro de seu limite operacional. Zhang et. al. (2008) aplicaram um controlador fuzzy em um sistema eólico de velocidade genérico; para tanto ele utilizou um conjunto de regras que levava em considerações três parâmetros, são eles: velocidade do vento; variação de potência; e derivada da potência. O sistema fuzzy final gerou um conjunto de 75 diferentemente do modelo desenvolvido que tem como base a velocidade de rotação do eixo do gerador e utiliza um conjunto de 35 regras. É importante destacar que a quantidade e suposição das regras fuzzy são parâmetros importantes que afetam de forma significativa a precisão e o esforço computacional.

Amendola, Souza e Barros (2005) destacam que para evitar trabalhar com controladores não lineares utilizam-se os controladores clássicos PI, cujos ganhos são ajustados por tentativa e erro até propiciarem a resposta desejada. O ajuste por tentativa e erro não é uma tarefa trivial, e necessita do conhecimento do comportamento dinâmico do sistema eólico. Além disso, os ganhos e constantes de tempo devem ser reajustados para diferentes condições de operação (PINTO, 2012). Outro inconveniente em se utilizar um controle clássico, para a situação foco deste trabalho, é que eles não são apropriados para aplicações em sistemas que possuem forte não linearidade (KAWATO, 1988).

Diante do exposto, o presente trabalho modela e analisa o desempenho de um Controlador Fuzzy aplicado, especificamente, ao controle do ângulo de inclinação de uma turbina eólica de velocidade variável, com gerador síncrono de ímãs permanentes, conectado a um sistema de geração isolado. Objetivando assim desenvolver um sistema de controle capaz de aumentar a confiabilidade da geração eólica, contornar o problema do não conhecimento completo do sistema, evitar sobrecargas elétricas e mecânicas e melhorar a qualidade da potência gerada.

## 1.1. Motivação e Relevância

A combinação de ferramentas computacionais com softwares matemáticos conduz as técnicas de Inteligência Artificial (IA) que vem sendo utilizadas com sucesso, em áreas como engenharia, medicina, biologia, computação, astronomia e etc.

De acordo com Meng et. al. (1999), as técnicas de IA tem se tornado mundialmente populares, podendo-se citar: Redes Neurais (RN), Lógica Fuzzy (LF), e Algoritmo Genético (AG) como as mais potencialmente usadas. Isso ocorre em virtude da capacidade dessas técnicas, de analisarem numericamente sistemas complexos como, por exemplo, problemas de engenharia envolvendo controle de plantas de sistemas industriais. Além disso, o desenvolvimento do presente trabalho está respaldado em três justificativas principais, são elas:

## **Tendência Internacional**

Nota-se em meio à comunidade científica internacional pesquisas direcionadas ao desenvolvimento de técnicas baseadas na aplicação de técnicas inteligentes de otimização (AG, LF, RN e algoritmos híbridos) capazes de melhorar o desempenho e a competitividade das turbinas eólicas.

## **Pesquisa de vanguarda na região**

Apesar de a região Nordeste possuir condições climáticas favoráveis à exploração de energia eólica, ainda não existem no Rio Grande do Norte, centros de pesquisas que atuam diretamente no desenvolvimento de sistemas inteligentes de controle de turbinas eólicas. Além disso, trata-se de uma excelente oportunidade de explorar um campo pouco empreendido, mas muito importante, para evitar crises energéticas e promover desenvolvimento tecnológico e científico para o país.

## **Complexidade de Modelagem**

Apesar da simplicidade do princípio de geração, as turbinas eólicas são bastante sofisticadas em termos de desenvolvimento, considerando que se utiliza de muitos avanços existentes e adapta à geração limpa e renovável de energia elétrica. Os sistemas eólicos de conversão de energia são tecnologias restritas, baseados em engenhosos equipamentos aerodinâmicos e hidráulicos e em sofisticada eletrônica de potência;

Neste contexto, as análises desenvolvidas neste trabalho foram concebidas para entender melhor como sistemas *fuzzy* podem ser aplicados a sistemas eólicos de geração de energia, quais as principais vantagens provenientes desse tipo de aplicação e analisar se os benefícios são realmente importantes do ponto de vista da qualidade da resposta do controle e de geração de potência elétrica.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor e analisar uma arquitetura de controle *Fuzzy* aplicada a otimização do desempenho de um sistema eólico de velocidade variável. Para tanto, foi utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>*, disponível no MATLAB<sup>®</sup>, para o desenvolvimento dos conjuntos *Fuzzy*, e o ambiente SIMULINK<sup>®</sup> para modelar, controlar e fornecer os ajustes apropriados para o modelo do sistema eólico e o modelo do controle *Fuzzy*.

Em adição, para cumprir o objetivo geral, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Descrever e analisar matematicamente o modelo dinâmico e o controle pitch do sistema eólico selecionado;
- Propor um sistema de controle, composto por controlador *Fuzzy*.
- Realizar e analisar o modelo de controle proposto;
- Obter e analisar os resultados computacionais obtidos através de simulação;

## 1.3. Metodologia

Para alcançar os objetivos específicos desse trabalho, algumas atividades foram realizadas durante o tempo de estudo, como:

- Estudo e formulação de uma base teórica para escolha do modelo eólico a ser utilizado no trabalho;
- Modelagem do sistema eólico (ambiente MATLAB/SIMULINK);
- Estudo e formulação de uma base teórica em Lógica *Fuzzy* para escolha do método mais adequado ao problema;
- Desenvolvimento do controle *Fuzzy* (ambiente MATLAB/FIS+SIMULINK);
- Simulação e análise dos resultados.

A execução do trabalho foi realizada de acordo com o seguinte roteiro de atividades:

- Estudo de como desenvolver um modelo dinâmico de um sistema eólico;

- Estudo de como desenvolver um sistema de controle nebuloso (Controle *Fuzzy*);
- O desenvolvimento do sistema de controle será dividido em três etapas realizadas na seguinte ordem: obtenção da lei de controle do controlador *Fuzzy*, validação do modelo do controlador e montagem do sistema de controle;
- Coleta das respostas da planta (ambiente MATLAB/FIS+SIMULINK);
- Análise e interpretação dos resultados obtidos.

## 1.4. Contribuições

Dentro do objetivo principal, a seguir são expostas as principais contribuições desta dissertação:

- Forneceu uma topologia nova de controle baseado no erro e na derivada do erro da velocidade do rotor de uma turbina eólica de velocidade variável com gerador elétrico do tipo PMSG;
- Forneceu um sistema novo de regras fuzzy para controlar de forma eficiente o sistema eólico;
- Avaliou uma alternativa aos controladores clássicos já consolidados na literatura, por exemplo, o controle PI, utilizando para tanto um controlador *Fuzzy*;
- Implementou e simulou computacionalmente um sistema de regras *fuzzy* e um modelo de estrutura de controle;
- Forneceu dados que ajudam a identificar de forma mais efetiva como as características de um controle clássico podem ser melhoradas mediante a aplicação de uma técnica de otimização específica;

## 1.5. Organização do trabalho

A partir da metodologia adotada os trabalhos desenvolvidos são apresentados neste documento estruturado da seguinte maneira:

No Capítulo 1 é feita uma introdução, contextualização e descrição do problema levantado. Além disso, expõem-se os objetivos gerais e específicos levantados como metas a serem alcançados ao término do mesmo.

O Capítulo 2 aborda conceitos e ações importantes dos principais sistemas eólicos de geração de energia (SEGE), classificação, constituição, principais modos de operação e de controle de potência e descrição matemática. Nesse capítulo buscou-se adquirir conhecimento suficiente a cerca do tema proposto, além disso, procurou identificar o modelo eólico mais adequado para posterior modelagem e simulação.

O Capítulo 3 trata sobre a teoria de controle utilizando Lógica *Fuzzy* (LF), conhecimentos específicos como: fuzzificação; regras de controle; desfuzzificação; e sistema de inferência *Fuzzy*.

Depois de adquirido o conhecimento necessário referente aos sistemas eólicos e conjuntos *Fuzzy* e de ter identificado o modelo eólico mais apropriado, o Capítulo 4 se refere à descrição do processo de modelagem, implementação e simulação do modelo eólico e para o modelo de controle *Fuzzy* operando em conjunto.

O Capítulo 5 expõe a cerca dos resultados e discussões referentes à aplicação do controle desenvolvido. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações as considerações finais, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 - Sistemas Eólicos de Conversão de Energia

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e definições a cerca dos sistemas eólicos de conversão de energia, tais como: características; componentes; topologias; e forma de conversão de potência eólica em potência elétrica.

### 2.1. Sistemas Eólicos

Desde a antiguidade a energia dos ventos já era aproveitada para realização de trabalho, como, por exemplo, em barcos a vela, sistemas de irrigação, moinho etc. Mas foi a partir da dec. 70, com a chamada crise do petróleo, que a utilização de energia dos ventos para geração de energia elétrica ganhou destaque no cenário como uma forma alternativa viável.

Com o passar do tempo os sistemas eólicos para geração de eletricidade (SEGE) têm crescido consideravelmente em termos de tecnologia e capacidade de geração. Além disso, seu impacto no meio ambiente foi sendo gradativamente reduzido e atualmente apresenta, praticamente, desconforto visual em meio a paisagem natural.

A Figura 1 mostra um esquema geral de um sistema eólico de geração de energia eólica (SEGE) onde três tipos de formas de energia são representados: energia eólica; energia mecânica e energia elétrica.

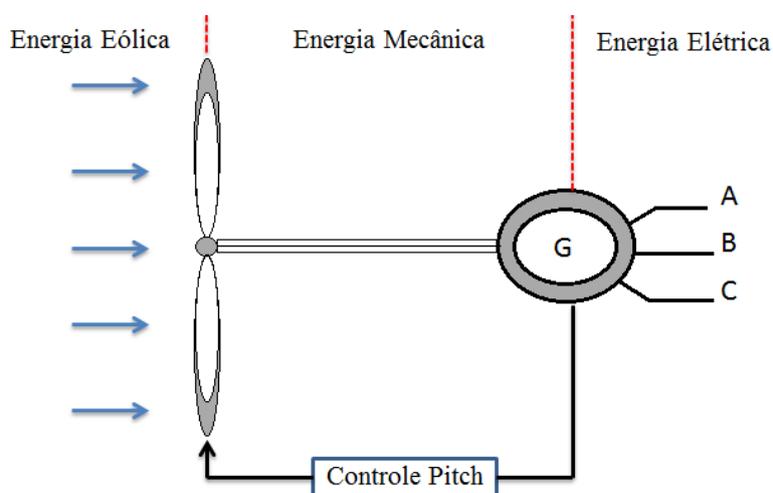


Figura 1 - Esquema geral de um SEGE

Fonte: Autoria Própria, 2015.

De forma resumida, as três formas de energia, anteriormente especificadas, se relacionam da seguinte forma em um sistema SEGE.

1. A energia cinética translacional é captada e convertida em potência mecânica através do sistema de pás do SEGE;
2. Por meio de um eixo de acoplamento, a potência mecânica é transferida até um gerador elétrico;
3. Por fim, a potência mecânica é convertida em potência elétrica através de um gerador elétrico;

As seções que se seguem tratarão a cerca dos principais componentes de uma turbina eólica, bem como, os principais conceitos relativos ao controle aerodinâmico de potência aplicado às pás. Além disso, serão expostas as principais configurações dos sistemas eólicos no que diz respeito a tipo de gerador elétrico utilizado.

## 2.2. Aerogeradores e seus Componentes

Uma turbina eólica ou aerogerador é composta por uma série de modernos equipamentos mecânicos, elétricos e hidráulicos. Mas em geral, podem-se citar os seguintes equipamentos como constituintes básicos para uma turbina eólica: torre, rotor, conversores de potência, equipamentos de medição, equipamentos elétricos e nacele. A Figura 2 demonstra alguns elementos constituintes de um aerogerador, destacando que esses equipamentos podem variar em tamanho e formato dependendo do fabricante e de sua potência.

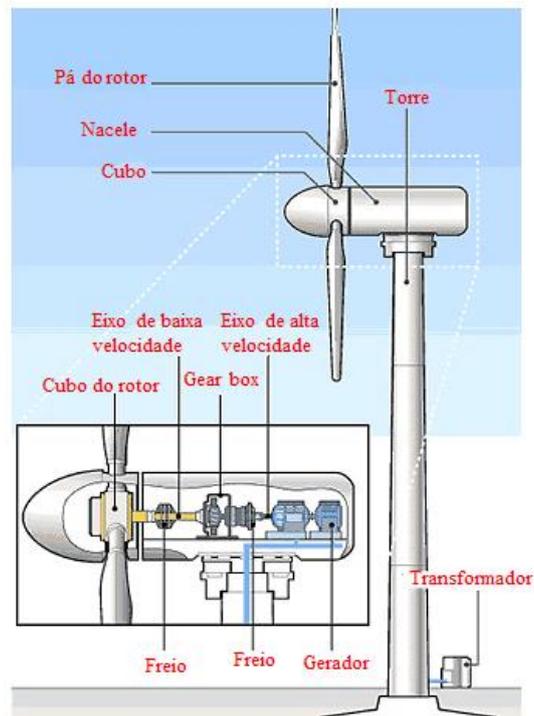


Figura 2 - Principais equipamentos e sistemas uma turbina eólica  
**Fonte:** Adaptado de Layton, 2015.

A seguir são descritos as características dos componentes anteriormente mencionados.

**Pá do rotor** – elemento responsável por capturar e converter a energia cinética do vento em energia rotacional, a ser transmitida ao gerador através de um eixo de conexão, podendo haver ou não caixa de engrenagens (*gear-box*) entre esse percurso.

**Gear-box** – também conhecido como caixa de engrenagem, é responsável por compatibilizar a baixa rotação da turbina ao nível adequado do gerador elétrico.

**Freio** – responsável por promover a frenagem das pás em caso de velocidade excessiva. A frenagem também pode ser promovida através do sistema de controle que pode modificar a aerodinâmica das pás, normalmente através do ângulo de inclinação das pás (*ângulo pitch*).

**Sistema de controle** – importante sistema responsável por aumentar a eficiência de geração do sistema e aumentar a vida útil do mesmo, que em geral modificam a direção da nacelle e/ou ângulo de inclinação das pás.

**Gerador elétrico** – elemento responsável por converter a energia cinética de rotação no eixo da turbina em energia elétrica.

**Equipamentos elétricos** – dividem-se em elementos de proteção, controle e transferência da energia elétrica produzida pelo gerador elétrico.

**Nacele** – Estrutura que abriga os equipamento de frenagem, caixa de engrenagens, gerador elétricos etc.

**Torre** – elemento de sustentação da turbina eólica, responsável por suportar todos os equipamentos anteriores e dotar a turbina de altura adequada para maior conversão de energia eólica em elétrica.

### 2.3. Classificação e Configuração dos Sistemas Eólicos

Normalmente, as turbinas eólicas são clássicas de três formas: quanto à posição do seu eixo; quanto à disposição das pás; quanto à incidência do vento; sistemas de velocidade fixa; e sistema de velocidade variável.

#### a) Posição do eixo

As turbinas de eixo horizontal (Ver Figura 3a) vêm ao longo dos anos despontando como a tecnologia eólica dominante, isso porque se comparado com os sistemas de eixo vertical (Ver Figura 3b) possuem melhor rendimento, não necessitam de motor adicional para a partida, além de possuírem construção mais simples e estável. Entretanto, as turbinas de eixo vertical possuem vantagens como não necessitam de controle para o seu posicionamento e ajuste do ângulo das pás e não necessitam de suspensão do gerador elétrico, por apresentar base disposta no chão (BONELLI, 2010).

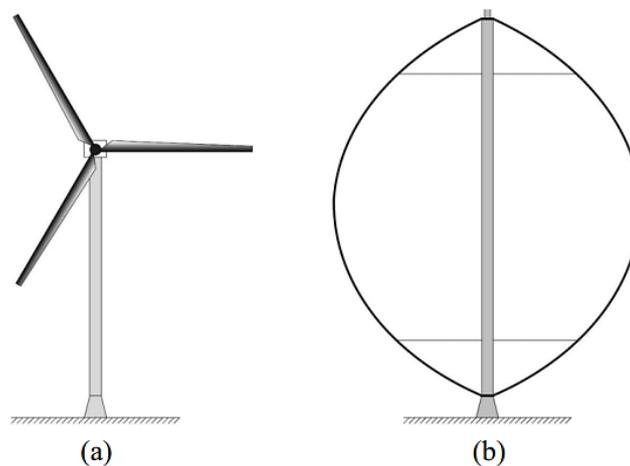


Figura 3 (a) Turbina Eólica de eixo horizontal; (b) Turbina eólica de eixo vertical.  
Fonte: Bonelli, 2010.

### b) Disposição das pás em relação à incidência do vento

A Figura 4 mostra respectivamente uma turbina *down-wind* e outra *up-wind*, essa classificação ocorre de acordo como o fluxo de ar incidente na turbina. Uma turbina é classificada como *down-wind* se o fluxo de ar atinge a torre e, posteriormente, as pás (Ver Figura 4a). Caso o fluxo de ar incide diretamente nas pás, a turbina é classificada como *up-wind* (Ver Figura 4a).

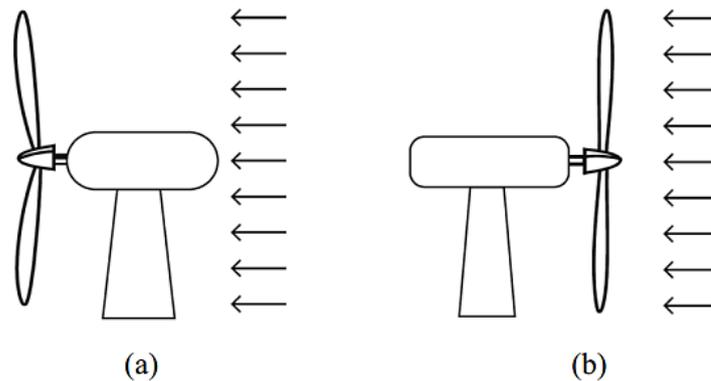


Figura 4 (a) Turbina *down-wind*; (b) Turbina *up-wind*  
Fonte: Bonelli, 2010.

As turbinas *down-wind* apesar de possibilitar o auto-direcionamento em relação ao vento, sem maiores implicações de controle, têm sido abolidas, isso porque a estrutura da torres dessas turbinas causavam grandes perturbações no vento (BONELLI, 2010).

### c) Número de pás

As turbinas eólicas com duas ou três pás são normalmente utilizadas para a geração de energia elétrica. Turbinas com muitas pás, em torno de vinte, por exemplo, costumam ser usadas para o bombeamento de água, pois, mesmo possuindo um rendimento menor quando comparadas com as de poucas pás, possuem conjugados maiores e desempenhos satisfatórios em baixas velocidades (BONELLI, 2010).

### d) Sistemas de velocidade fixa e variável

Além das classificações anteriores, os sistemas eólicos também podem ser classificados em sistemas de velocidade fixa ou velocidade variável. Cada sistema

apresenta características bem particulares com relação ao tipo de gerador elétrico utilizado e a forma de conexão com a rede elétrica.

Com relação aos tipos de geradores utilizados, segundo Voltolini (2007 apud HANSEN, 2001) nota-se ao longo dos últimos 15 anos que alguns fabricantes têm substituído os sistemas tradicionais com gerador de indução tipo gaiolas por geradores síncronos, enquanto que outros optam por utilizar geradores de indução duplamente alimentados de rotor bobinado, também conhecido como DFIG (do inglês *Doubly Fed Induction Generator*).

Abaixo são citadas, de acordo com Jesus (2012), algumas das principais vantagens e desvantagens provenientes da utilização de geradores de velocidade fixa e variável que podem ser resumidas da seguinte forma:

Os geradores de velocidade de rotação fixa apresentam:

#### **Vantagens**

- Tecnologia bastante conhecida e testada;
- Redução e facilidade de manutenção;
- Custo relativamente baixo.

#### **Desvantagens**

- Possibilidade de geração de transitórios na conexão com a rede elétrica;
- Variações de potência relativamente elevadas;
- Consumo de potência relativamente alto.

Já com relação aos geradores de velocidade de rotação variável tem-se que:

#### **Vantagens**

- Possui desempenho superior para ventos de baixa velocidade;
- Consumo de potência reativa relativamente baixa;
- Possui possibilidade de regulação de tensão;
- Possui flutuações de potência reduzidas.

#### **Desvantagens**

- Existiam poucos fabricantes no passado (esse cenário tem sido modificado);
- Manutenção detalhada, geralmente fornecida pelo fabricante;
- Injeção de harmônicas de alta frequência;
- Maior custo de aquisição.

A seguir serão expostos alguns dos principais tipos de topologia utilizados em sistemas eólicos de geração de energia elétrica de acordo com sua respectiva classificação.

### 2.3.1. Sistemas Eólicos de Velocidade Fixa

De acordo com Ullah (2006), as turbinas eólicas que trabalham com velocidade fixa têm como vantagem o baixo custo e boa robustez. Porém possuem limitada eficiência aerodinâmica, constante necessidade de manutenção de sua caixa de transmissão e requer a instalação de banco de capacitores para compensar o reativo, já que geradores de indução sempre atraem potência reativa da rede, sendo estas as principais desvantagens dos sistemas eólicos de velocidade fixa.

Na Figura 5 está representado um diagrama em bloco de uma turbina de velocidade fixa com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo. Nessa topologia o estator da máquina está diretamente conectado à rede elétrica não sendo necessário, portanto, o uso de conversores de potência já que a frequência de rotação do sistema é fixada na frequência elétrica da rede. Essa característica traz como vantagem a simplicidade do sistema e, além disso, o não uso de conversores torna o sistema mais barato. Também é possível observar a existência do circuito de partida *soft starter*, utilizado para realizar a conexão do gerador à rede elétrica durante o acionamento do sistema.

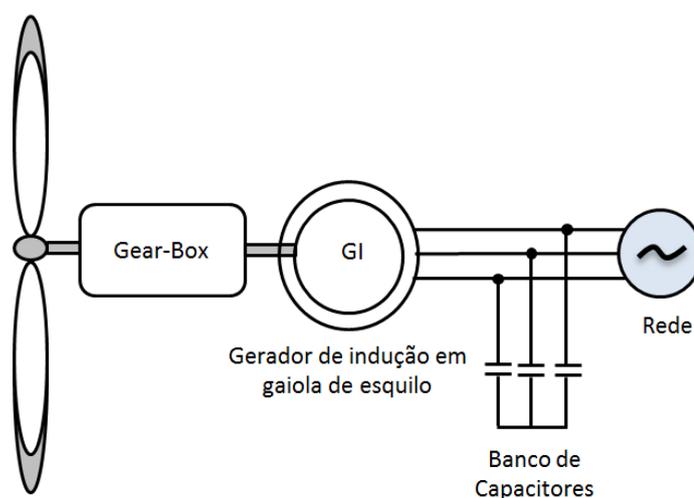


Figura 5- Sistema de velocidade fixa com gerador de indução e rotor em gaiola de esquilo

Fonte: Autoria própria, 2015.

O modelo anterior também pode operar em duas velocidades diferentes. Isso pode ser feito através de dois geradores com diferentes especificações de número de polos ou através de apenas um gerador que possua possibilidade de modificação do número de polos, o que é feito através alteração da forma de fechamento dos enrolamentos (PETERSSON, 2005). A presença da caixa de engrenagem é necessária para realizar o acoplamento da velocidade de rotação da turbina eólica com a velocidade de rotação do gerador elétrico.

### 2.3.2. Sistemas Eólicos de Velocidade Variável

Os sistemas de velocidade variável, em geral, são tidos como mais eficientes se comparados com os de velocidade fixa. Nessa configuração, normalmente, se utiliza geradores síncronos de rotor bobinado ou de ímãs permanentes.

Uma característica interessante dos sistemas eólicos de velocidade variável é o fato de alguns modelos não possuírem caixa de engrenagem. Isso porque, tais modelos possuem gerador com grande quantidade de polos, compensando dessa forma a baixa velocidade no eixo da turbina, isso também implica em menos gastos com manutenção. A principal desvantagem desse sistema é a necessidade de utilizar conversores de mesma potência do gerador o que encarece o projeto final. Todavia, sua utilização pode ser justificada pela possibilidade de utilização de retificadores não controlados (retificadores a diodo) e a falta de caixa de engrenagem (PINTO, 2012).

A Figura 66 mostra um gerador síncrono de rotor bobinado. Nota-se que nessa topologia não há caixa de engrenagem e banco de capacitores, porém deve existir um transformador para adequar o nível de tensão gerada ao nível apropriado da rede. Além disso, o enrolamento de campo é alimentado pela própria rede elétrica através de um conversor ca-cc, permitindo assim a regulação automática da tensão (PINTO, 2012).

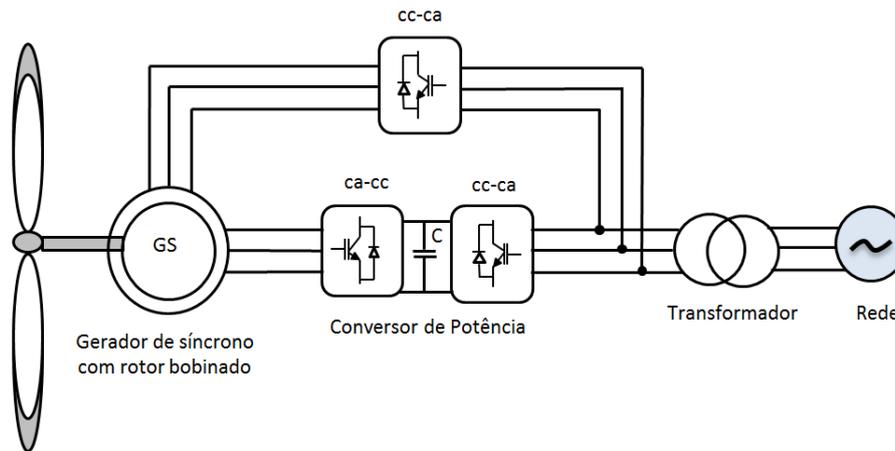


Figura 6-Sistema de velocidade variável com gerador síncrono e rotor bobinado  
**Fonte:** Autoria própria, 2015.

A Figura 7 representa um sistema eólico de velocidade variável com gerador de indução tipo gaiola de esquilo. Nessa configuração, o enrolamento do estator é conectado à rede através de um conversor de potência do tipo ca-cc-ca. Nessa topologia é necessário o uso de caixa de engrenagem para adequar a baixa rotação da turbina à velocidade nominal do gerador elétrico, sendo que isso encarece o custo do projeto final. Além disso, tal sistema proporciona maiores perdas elétricas e mecânicas ao sistema. Todavia, esse modelo é uma opção interessante em virtude desse tipo de gerador ser bastante robusto, seguro e econômico (PINTO, 2012 apud COSTA, 2010).

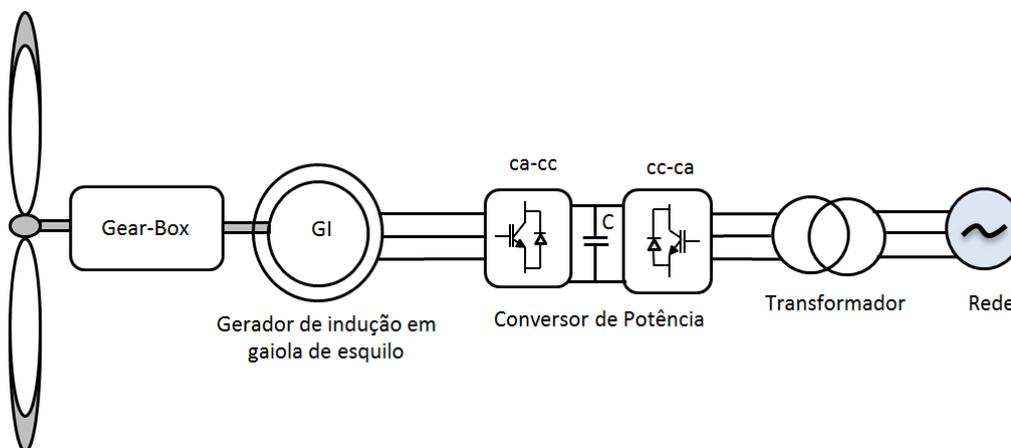


Figura 7- Sistema com gerador de Indução tipo gaiola de esquilo  
**Fonte:** Autoria própria, 2015.

A Figura 8 ilustra representa o gerador eólico duplamente alimentado abreviado por DFIG (do inglês, *Doubly Fed Induction Generator*). Nesse sistema o estator do gerador está diretamente conectado a rede através de um gerador de três enrolamentos enquanto que o rotor é conectado a rede através de um conversor bidirecional de potência, conhecido como conversor *back-to-back*. Petersson (2005) afirma que esse

sistema tem, recentemente, se tornado muito popular devido, principalmente, ao fato do conversor ter seu tamanho consideravelmente reduzido em virtude do fluxo de potência que o atravessa, podendo variar entre 20-30% da potência nominal do gerador. O tamanho final reduzido do conversor barateia o custo final do projeto, diferentemente dos modelos anterior que, em geral, possui a mesma potência do gerador elétrico.

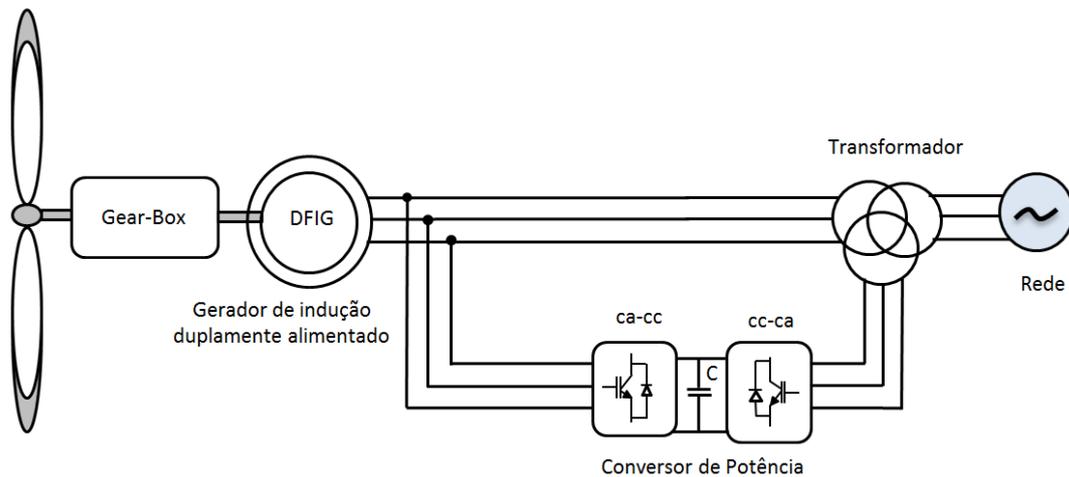


Figura 8- Sistema com gerador de indução duplamente alimentado  
**Fonte:** Autoria própria, 2015.

Além do que foi anteriormente exposto, tem-se que a tecnologia DFIG permite o controle independente da potência ativa e reativa, sendo essa uma importante vantagem. Porém, essa tecnologia tem como inconveniente o uso de escovas, componentes que apresentam pouca confiabilidade e grande frequência de manutenção. Além disso, o fato do estator ser diretamente conectado rede elétrica torna a máquina suscetível a distúrbios provenientes do sistema elétrico.

Por fim, a Figura 9 ilustra o modelo de um sistema eólico com gerador com ímãs permanente também conhecido como PMSG (do inglês *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Tsuchida (2012) afirma que esse tipo de gerador opera com velocidade similar ao DFIG, porém sem a presença da caixa de engrenagem. Para compensar a baixa rotação do sistema o PMSG possui alto número de polos. Nota-se que, diferentemente gerador síncrono com rotor bobinado, o PMSG dispensa o sistema de realimentação e o enrolamento do estator não está diretamente conectado a rede elétrica, dessa maneira, é possível evitar a exposição a distúrbios provenientes do sistema elétrico.

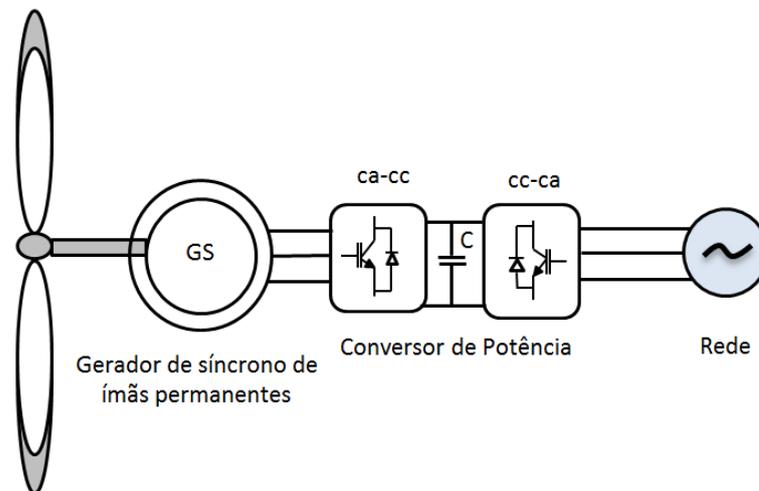


Figura 9- sistema de velocidade variável com gerador de ímãs permanentes  
**Fonte:** Autoria própria, 2015.

De acordo com Pinto (2012) o desempenho dos sistemas eólicos com PMSG depende do conhecimento dos parâmetros do gerador, sendo que tais parâmetros podem variar com temperatura e frequência de operação. A existência dos ímãs pode impactar em maiores custos, isso porque após a sua desmagnetização não é possível controlar o fator de potência do sistema. Segundo Nunes (2003), tais sistema tem como grande vantagem a sua maior eficiência devido à ausência das perdas nos enrolamentos do rotor. Tsuchida (2012) cita outras vantagens do PMSG frente aos geradores citados anteriormente, são elas: não requer o uso de circuito externo de excitação; não possuem perdas nos circuitos de campo; podem operar em baixa velocidade; não necessitam de caixa de engrenagem; e possuem menor custo de manutenção, pois não possuem escovas e caixas multiplicadoras.

Na secção que se segue, serão abordados os fundamentos físicos que permitem a conversão da energia cinética translacional do vento em potência elétrica. Além disso, serão expostos alguns dos principais meios de limitação de potência utilizados em uma turbina eólica.

## 2.4. Forças Atuantes Nas Pás Da Turbina Eólica

Na Figura 10 são expostos os principais parâmetros e forças atuantes no sistema de pás de uma turbina eólica. Basicamente existem duas forças aerodinâmicas que atuam sobre as pás do rotor de uma turbina eólica que são capazes de originar um conjugado mecânico, responsável por converter a energia cinética translacional do vento

em energia cinética rotacional sobre o eixo da turbina. A primeira força, denominada de força de sustentação, atua perpendicularmente ao sentido do vento. A segunda, denominada de força de arrasto, atua paralelamente ao fluxo do vento como representado na Figura 10.

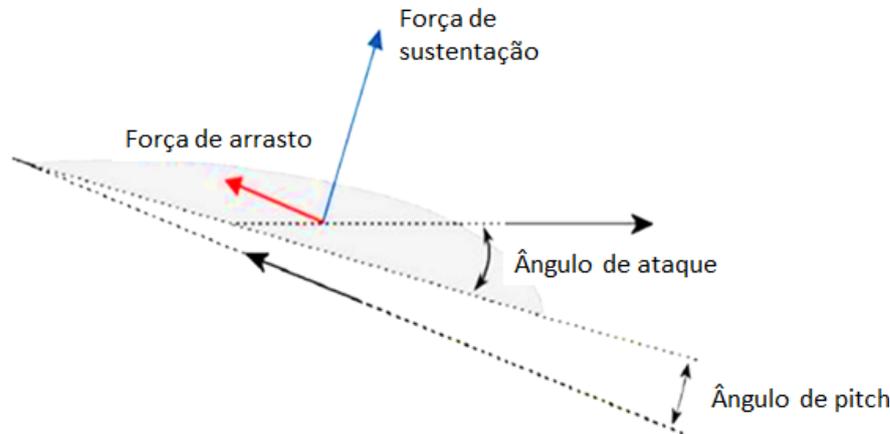


Figura 10 - Atuação das forças aerodinâmicas sobre a pá de um rotor

Fonte: Adaptado de Tsuchida, 2012.

A força de sustentação surge como consequência direta das próprias características aerodinâmicas das pás, que fazem com que a massa de ar, em deslocamento em sua parte superior, tenha maior velocidade do que o vento em sua parte inferior. Isso implica em um aumento de pressão na parte inferior, originando assim uma força de baixo para cima, perpendicular a superfície das pás. Por sua vez, a força de arrasto surge devido à passagem do fluido através da superfície das pás, atuando em direção paralela a direção das mesmas.

Em situações em que a velocidade nominal do vento assume valores elevados, é necessário utilizar sistemas de controle do torque aerodinâmico das pás para que dessa forma seja possível limitar a potência gerada. A seguir tais controles serão expostos, bem como as suas principais formas de atuação.

## 2.5. Limitação de potência

De modo geral, existem duas formas principais de controlar o torque aerodinâmico atuante sobre as pás de uma turbina eólica e, conseqüentemente, limitar a extração de potência a um valor próximo ao nominal, são elas: controle estol ou “*stall control*” e controle de passo ou “*pitch control*”. De acordo com Nunes (2003), nos anos 80 e 90, a maioria dos aerogeradores usava o controle estol em sua forma simples,

entretanto, com o aumento da potência das máquinas e da utilização de sistemas eólicos de velocidade variável o controle *pitch*, que oferece maior faixa de operação, tem sido a escolha mais recorrente entre os fabricantes.

### 2.5.1. Controle Stall

Forma de controle passivo que responde a intensidade da velocidade do vento. Nesse sistema, a inclinação da pá é mantida fixa com certo ângulo de ataque, logo as mesmas não podem girar em torno de seu eixo longitudinal.

Esse tipo de controle é projetado de forma que para ventos superiores ao nominal ocorra redução das forças de sustentação e aumento das forças de arrasto atuantes sobre as pás. Essa situação implicará na formação de uma zona de turbulência que provocará a frenagem no sistema, reduzindo a potência injetada pelo rotor. Para que o efeito estol não aconteça em todas as posições radiais da pá ao mesmo tempo, o que causaria uma redução significativa a potencia do rotor, as pás possuem uma leve torção longitudinal para suavizar o efeito estol.

A Figura 11 mostra o comportamento do perfil de vento à medida que ocorre o fenômeno de stall e a formação da zona de turbulência atuando sobre a estrutura das pás.

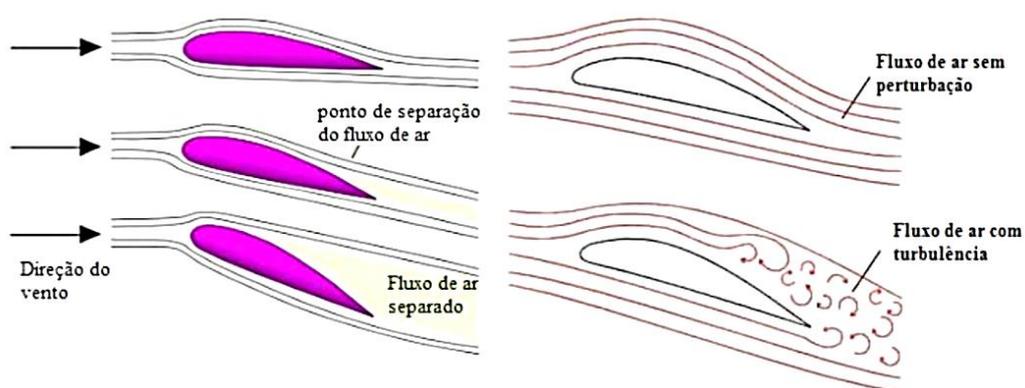


Figura 11 - Efeito Estol

Fonte: Adaptado de Tsuchida, 2012.

Em geral, sistemas eólicos que utilizam essa tecnologia possuem estrutura do cubo do rotor mais simples e necessitam de menos manutenção, por não possuírem muitas partes móveis. Entretanto, para sua implementação é necessário o desenvolvimento de estudos, através de cálculos aerodinâmicos, para determinar o ângulo de ataque ideal.

## 2.5.2. Controle Pitch

Diferentemente do Controle Stall, no controle *pitch* as pás do rotor são móveis e possuem a capacidade de rotacionar em torno do seu eixo longitudinal, limitando a potência de saída através da redução do ângulo de inclinação das pás e, conseqüentemente, do coeficiente de sustentação. O stall passivo é a maneira mais simples de alcançar limitação de potência, no entanto, o controle *pitch* é capaz de obter respostas mais rápidas e fornecem maior controlabilidade sobre o sistema eólico e, adicionalmente, ele é preferível para aplicações em turbinas de médio à grande porte (BIANCHI, BATTISTA, MANTZ, 2007).

A Figura 12 representa um diagrama de blocos para de um sistema de controle de passo de primeira ordem.

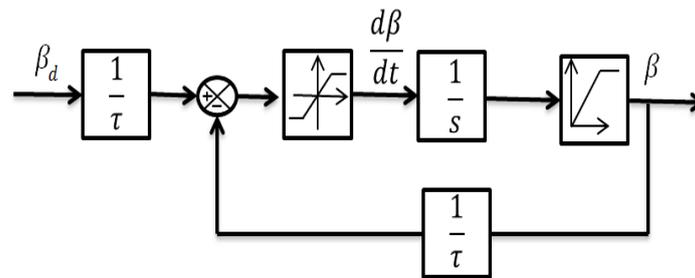


Figura 12 - Modelo simplificado de controle de ângulo pitch  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

Na Figura 12, tem-se que o atuador do controle pitch é um servo não-linear que geralmente gira todas as pás ou partes delas unidas, podendo variar dependendo do tipo de sistema utilizado no parque eólico. A expressão em malha fechada desse modelo pode ser escrita como um sistema dinâmico de primeira ordem. A Equação 1 especifica o comportamento dinâmico para este modelo em particular, operando em sua região linear (BIANCHI, BATTISTA, MANTZ, 2007).

$$\frac{d\beta}{dt} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_d \quad (1)$$

onde:

$\beta$  = Ângulo pitch atual (°)

$\beta_d$  = Ângulo pitch desejado (°)

O comportamento do controle pitch pode ser resumido como a seguir: quando a velocidade do vento é inferior à velocidade nominal, o ângulo de ataque é mantido em seu valor nominal; quando a velocidade do vento é maior do que a velocidade nominal,

o ângulo de ataque é reduzido, conseqüentemente ocorre à redução das forças sustentação da hélice. Quando as pás estão completamente “pitchado” (do inglês *pitched*), o ângulo de ataque fica alinhado com a direção do vento e nenhuma força de sustentação irá atuar sobre as lâminas, de modo que a turbina cessará sua rotação.

Esse tipo de controle tem sido utilizado para proporcionar mudança no ângulo de ataque das pás, tem-se que através do ajuste adequado do controle pitch pode-se otimizar a potência da turbina para ventos abaixo da velocidade nominal do sistema, evitar que a potência mecânica de entrada exceda os limites projetados, reduzindo as chances de existência de sobrecargas aerodinâmicas (para ventos acima do valor nominal do sistema) e minimizar fadigas nos componentes mecânicos da turbina (ZHANG et. al., 2008).

## 2.6. Região de operação de um sistema Eólico

De forma resumida, a operação de uma turbina eólica pode ser dividida em quatro regiões principais, de acordo com a Figura 13. Cada uma dessas regiões possui características particulares no que diz respeito à velocidade do vento e potência mecânica gerada.

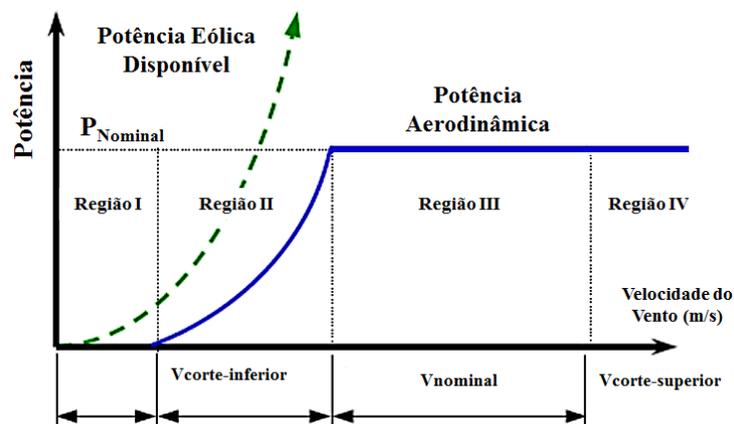


Figura 13 - Regiões de operação de uma turbina eólica

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A região I representa a condição mínima para *start-up*, isto é, menor velocidade do vento para que o sistema inicie a sua operação. Segundo Tsuchida (2012) a velocidade de partida pode variar dependendo do tipo de sistema eólico utilizado, mas em geral assume valores entre 3 e 5 m/s.

A região II, situada entre a velocidade de corte inferior e a velocidade nominal do sistema, corresponde a região onde potência gerada cresce exponencialmente até atingir seu valor nominal. Nesse ponto, o sistema pode operar com velocidade constante ou variável, dependendo do tipo de gerador e sistema de controle usado (TSUCHIDA, 2012).

A região III, situada entre a velocidade de nominal e a velocidade de corte superior, corresponde à região no qual o sistema de limitação de potência deve atuar para evitar níveis prejudiciais de velocidade e carga mecânica na estrutura da turbina. Para isso, podem-se utilizar os modelos anteriormente abordados, controle *stall* e *pitch*.

A região IV, localizada acima da velocidade de corte superior, é caracterizada como sendo a região de operação crítica onde o sistema deve ser desativado para que não venha a entrar em colapso.

## 2.7. Coeficiente de Potência

Para determinação do coeficiente de potência ( $C_p$ ), considera-se a Figura 15 que representa a variação da velocidade do vento através do rotor da turbina. Tem-se que o fluxo de ar que atravessa a turbina, com velocidade inicial  $V_1$ , sofre inevitável redução de velocidade, já que parte de sua energia cinética inicial será usada para movimentar as pás da turbina. Na saída da mesma, o vento, agora mais lento ( $V_2$ ), sofre redução de pressão e aumento de volume<sup>1</sup>, de acordo com o exposto na Figura 14.

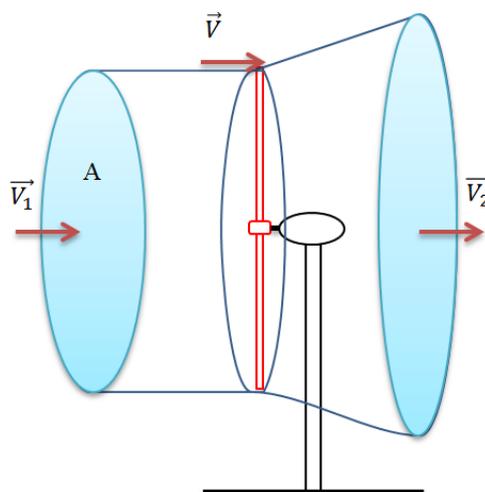


Figura 14 - Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina

Fonte: Autoria Própria, 2015.

<sup>1</sup> Representado pelo contorno da Figura 14.

Aplicando-se o teorema da continuidade, tem-se que:

$$V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

A parcela de potência captada pela turbina é exatamente igual à diferença entre a potência de entrada e a potência de saída, dessa forma tem-se que:

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

Para maximizar a extração de potência é necessário que:

$$V = \frac{2}{3} \cdot V_1 \text{ e } V_2 = \frac{1}{3} V_1 \quad (4)$$

Substituindo a Equação (4) em (2) obtém-se a relação entre as áreas da seguinte forma:

$$A = \frac{3}{2} \cdot A_1 \text{ e } A_2 = 3A_1 \quad (5)$$

Substituindo (4) e (5) em (3) tem-se que:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{8}{9} \cdot A_1 \cdot V_1^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \cdot \left( \frac{16}{27} \cdot A \cdot V^3 \right) \quad (6)$$

Portanto, da equação a acima se tem que o valor máximo de conversão de energia eólica em potência mecânica eixo horizontal com três pás é:

$$C_{max} = \frac{16}{27} \cong 59,26\% \quad (7)$$

O limite anteriormente obtido é conhecido como Limite de Betz. Além disso, tem-se que a potência e o conjugado mecânico do eixo do gerador podem ser expressos da seguinte forma:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (8)$$

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_1^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (9)$$

Como pode ser visto nas das Equações 8 e 9,  $C_p$  é uma função da razão de velocidade na ponta das pás ( $\lambda$ ) e o ângulo de inclinação da mesma ( $\beta$ ), também conhecido como *pitch angle*.

A razão de velocidade é definida como sendo:

$$\lambda = \frac{\omega_{rotor} R}{V_1} \quad (10)$$

onde:

- $P_{mec}$  - potência mecânica (kW)
- $\rho$  - densidade do ar (1.225 Kg/m<sup>3</sup> ao nível do mar)
- $A$  - área varrida pelas pás
- $\beta$  - ângulo de inclinação da lâmina (°)
- $\lambda$  - razão de velocidade
- $R$  - raio das pás (m)
- $V$  - velocidade na ponta da hélice (m/s)
- $V_1$  - velocidade de entrada da turbina (m/s)
- $V_2$  - velocidade de saída da turbina (m/s)
- $\omega$  - Velocidade do rotor da turbina (rad /s)

Apesar da velocidade do vento exercer uma forte influencia no valor da potência disponível no vento, tem-se que  $C_p$  é um fator crítico para quantidade de potência elétrica gerada. A Equação 11 representa uma forma genérica usada para cálculo de  $C_p$  de acordo com Muyeen, Tamura e Murata (2009).

$$C_p(\lambda, \beta) = k_1 \left[ \frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6 \right] e^{\frac{-k_7}{\lambda_i}} \tag{11}$$

onde :

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + k_8} - \frac{k_9}{\beta^3 + 1}} \tag{12}$$

As constantes usadas nas Equações 11 e 12 são mostradas na Tabela 1, também de acordo com Muyeen, Tamura e Murata (2009).

Tabela 1 - Coeficientes da curva de potência

Constante	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$
<b>Valor</b>	0,73	151	0,58	0,002	2,14	13,2	18,4	0,002	0,63

Fonte: Muyeen, Tamura e Murata, 2009.

As características de  $C_p$  para diferentes valores do ângulo pitch são mostrados na Figura 15. Percebe-se que para cada valor do ângulo de inclinação ( $\beta$ ) há um valor máximo de coeficiente de potência ( $C_p$ ) e que o aumento da razão de velocidade (do inglês, *tip speed ration*) leva à rápida diminuição do mesmo.

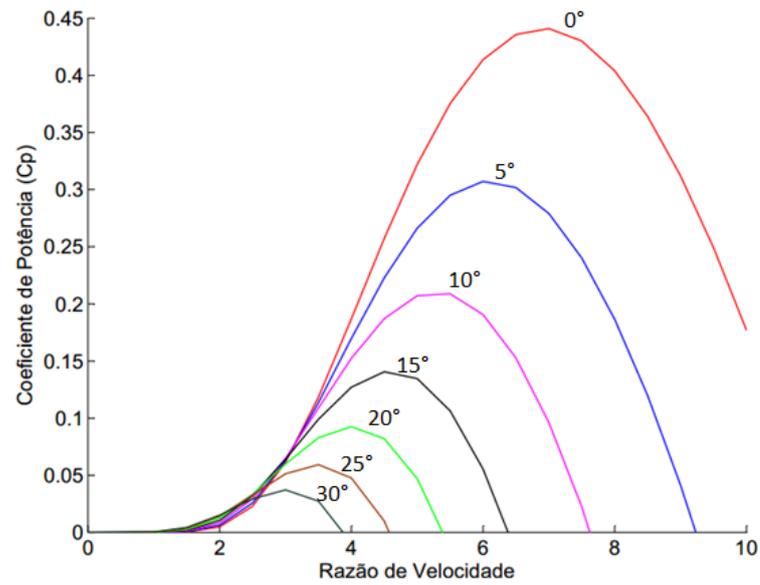


Figura 15-Coeficiente de potência versus razão de velocidade

**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

Os capítulos que se seguem fazem um levantamento a cerca dos sistemas *fuzzy* de forma a tornar possível o desenvolvimento e aplicação de um sistema *fuzzy* para aplicação e otimização do desempenho de uma sistema eólico de velocidade variável.

## Capítulo 3 - Lógica Fuzzy

A teoria de conjuntos *fuzzy* foi inicialmente apresentada em 1965 por Lotfi A. Zadeh, professor do departamento de engenharia elétrica e ciências da computação da Universidade da Califórnia, em Berkeley. Essa teoria surgiu quando o mesmo trabalhava com problemas de classificações de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas. De forma resumida, a lógica *Fuzzy* (LF) é uma lógica de múltiplos valores que estabelece valores intermediários aos valores clássicos, isto é, níveis intermediários entre os estados clássicos de verdadeiro/falso, sim/não, alto/baixo etc (SUMATHI e PANEERSELVAM, 2010).

Segundo Bellucci (2009) as primeiras aplicações bem sucedidas foram feita em 1974, pelo professor Mamdani, do *Queen Mary College*, da Universidade de Londres, quando programou um controle de uma máquina a vapor, baseado em lógica fuzzy, até então nenhuma outra técnica de automatização tinha sido aplica com sucesso nesse tipo de sistema. Outras aplicações podem ser vistas a seguir:

1. Em 1977, Ostergaard realiza o controle de um trocador de calor em um forno de cimento.
2. Em 1979, Kolomov cria o primeiro autômato *fuzzy* finito.
3. Em 1983, Sugeno e Takagi criam uma metodologia de derivação de regras de controle *fuzzy*.
4. Em 1986, Yamakawa cria o primeiro hardware de um controlador *fuzzy*.
5. Em 1987, Yasunobu e Miyamoto usam a teoria *fuzzy* no controle de aceleração, frenagem e parada de trem.

As aplicações em escala mais ampla se iniciaram em meados da dec. de 80, no Japão. Como exemplos do crescente nível de sofisticação das aplicações envolvendo lógica *fuzzy* podem-se citar: lavadoras de prato, aspiradores de pó, câmeras de vídeo, máquinas de lavar roupa, controle de velocidade de trens de metrô, ar condicionado etc. (OLIVEIRA, 2008). Algumas das principais razões para o porquê dessa técnica ter crescido em aplicações e popularidades refere-se ao fato de a mesma poder ser aplicada em problemas não-lineares e não requerer o completo conhecimento matemático a cerca

do problema. Além disso, pode citar outras características tais como (MATHWORKS, 2007):

- É conceitualmente fácil de entender;
- Possui grande flexibilidade de aplicações;
- Possui tolerância a imprecisão das entradas;
- Pode ser aplicado em sistemas não lineares e de complexidade arbitrária;
- Pode ser baseada em conhecimento de especialistas;
- Pode ser combinado com as técnicas tradicionais de controle.

Em linhas gerais, a LF busca através de um método sistemático representar grandezas imprecisas, vagas e difusas (SIMÕES E SHAW, 2007). Esse método de otimização busca emular a forma de raciocínio humana, que é difusa e imprecisa, diferentemente dos sistemas de máquinas, que têm seu desempenho baseado em um raciocínio exato e binário. Dessa forma a LF funciona como um elemento de interface que busca dotar o sistema de máquina com a capacidade de raciocínio humano.

Sabe-se que um operador, mesmo não conhecendo física e matematicamente um sistema específico, ele pode controlar um processo ou sistema industrial com sucesso. Para tanto, ele baseia-se em suas experiências e treinamento. Dessa forma, o operador, usando de seu raciocínio dedutivo e das inferências de relação entre as variáveis de controle, fornece o melhor ajuste ao sistema controlado. É essa forma de pensar e agir que os sistemas fuzzy mais simples buscam emular. Sistemas *fuzzy* mais complexos podem ser desenvolvidos baseados no raciocínio dedutivo, dessa forma o modelo teria capacidade de aprendizagem e generalização, caracterizando-o como um sistema *fuzzy* adaptativo (SIMÕES E SHAW, 2007).

As principais etapas envolvidas no desenvolvimento de um sistema *fuzzy* são expostas de forma resumida na Figura 16. Inicialmente ocorre o processo de fuzzificação do conjunto de entrada, feito com o uso de funções de pertinência. Em seguida ocorre a etapa de inferência, feita através da consulta as regras *fuzzy* e base de dados a cerca da dinâmica do sistema analisado, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída. Por fim, tem-se a etapa de desfuzzificação, que através de um método específico obtém a variável ou conjunto de saída.

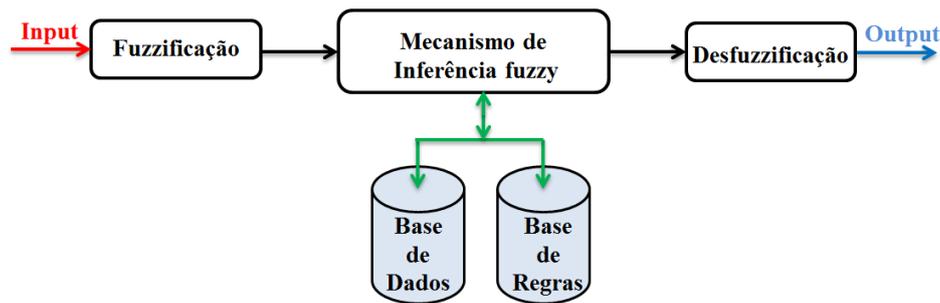


Figura 16 - Sistema Fuzzy  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

As seções que se seguem visam fornecer conhecimentos mais detalhados a cerca dos conceitos e definições *fuzzy*, tais como: fuzzificação; regras de controle; desfuzzificação; e sistema de inferência *Fuzzy*. Essas seções fornecem a base de conhecimento necessária para o entendimento e desenvolvimento de um controlador baseado em LF.

### 3.1. Conjuntos fuzzy e funções de pertinência

O primeiro conceito a ser entendido está associado a definição de conjuntos *fuzzy*. Seja **A** um subconjunto de um conjunto universo **U**, então **A** é considerado um subconjunto *fuzzy* do universo de discurso **U** se ele poder ser descrito como um conjunto de pares ordenados da seguinte forma (AMENDOLA, SOUZA E BARROS, 2005):

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in U \text{ e } \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (13)$$

Onde  $\mu_A(x)$  é definido com a função de grau de pertinência de **x** em **A**. O grau de pertinência é responsável por informar o grau com que **x** pertence a **A**, logo  $\mu_A(x)$  pode assumir os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &= 1, && \text{se } x \text{ pertencer totalmente ao conjunto } A \\ 0 < \mu_A(x) < 1, && \text{se } x \text{ pertencer parcialmente ao conjunto } A \\ \mu_A(x) &= 0, && \text{se } x \text{ não pertencer ao conjunto } A. \end{aligned}$$

Dessa forma um conjunto **A** da teoria dos conjuntos clássica pode ser visto como um conjunto *fuzzy* específico, denominado usualmente de *crisp*, onde a função de pertinência para esse tipo de conjunto assume valores bivalentes (0 ou 1) e não gradual como na LF.

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. Como exemplo tem-se a Figura 17, que representa a função de pertinência que define o quanto uma pessoa é alta ou baixa em um sistema *fuzzy*. O eixo vertical nessa figura representa o grau de pertinência (intervalo variando de 0 a 1) e o eixo horizontal representa a altura de cada pessoa. Tem-se que nesse sistema pessoas com grau de pertinência entre 0,95 e 1 são consideradas altas, além disso, pessoas com grau de pertinência entre 0,30 e 0,95 possuem níveis distintos de “alto”. Dessa forma a LF fornece uma descrição mais detalhada de quão distintas são as alturas dos indivíduos.

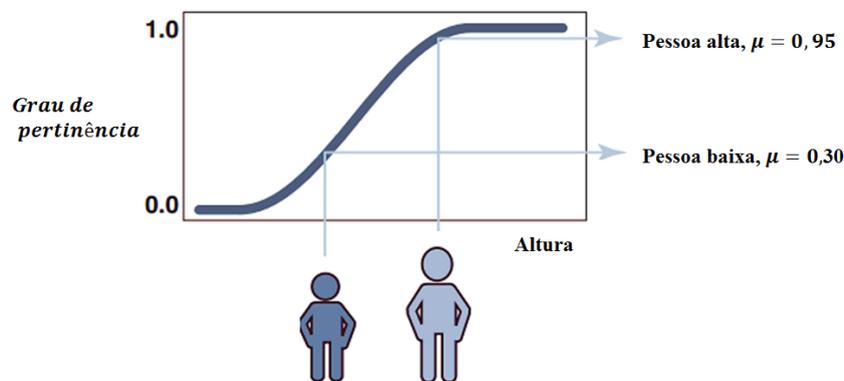


Figura 17 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação fuzzy  
Fonte: Adaptado de Mathworks, 2013.

A Figura 18 representa a mesma situação anterior, entretanto, dessa vez foi utilizada uma função de pertinência baseada na lógica tradicional (*booleana*). Tem-se que pessoas com mais de 2,00 m são consideradas como altas, mas pessoas com 1,85 m não. Dessa forma tem-se um conjunto falho, incapaz de fornecer uma representação fiel da realidade a qual está aplicado.

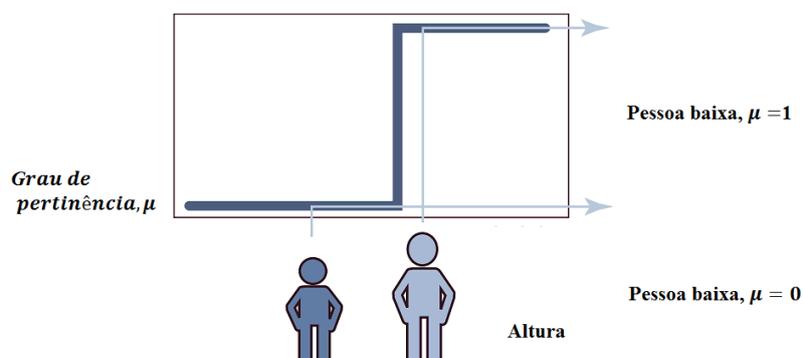


Figura 18 - Função de pertinência da altura de uma pessoa, representação binária  
Fonte: Adaptado de Mathworks, 2013.

As funções de pertinências mais comuns são as triangulares, trapezoidais e gaussianas. De acordo com Macêdo (2012), as representações trapezoidais e triangulares são as mais utilizadas em problemas de engenharia sendo que, normalmente, as funções trapezoidais são postas nas extremidades e as triangulares modelam o interior do universo de discurso. Para obtenção das mesmas pode-se utilizar os seguintes meios:

- Intuição
- Inferência
- Redes neurais
- Algoritmos genéticos
- Raciocínio indutivo

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

### 3.2. Número Fuzzy

De acordo com Simões e Shaw (2007), um número  $X$  pertencente a um conjunto *fuzzy* tem que atender duas condições, são elas:

#### Condição de norma

Essa condição refere-se ao máximo valor de pertinência que um dado número *fuzzy* pode assumir em certo universo de discurso  $U$ . Em termos matemáticos tem-se que:

$$\max \mu_X(u) = 1, \text{ onde } u \in U \quad (14)$$

#### Condição de convexidade

A propriedade de convexidade está definida matematicamente na Equação 15, ela é responsável por garantir a universalidade de certo valor  $u$  pertencente ao universo de discurso  $U$ . Normalmente, controladores *fuzzy* definidos através de observações naturais atendem a condição de convexidade.

$$\mu_X[\lambda u_1 + (1 - \lambda)u_2] \geq \min[\mu_X(u_1), \mu_X(u_2)], \text{ onde } u_1, u_2 \in U \text{ e } \lambda \in [0,1] \quad (15)$$

### 3.3. Operações entre conjuntos fuzzy

A teoria de conjuntos clássicos serve de base para formular as diversas operações elementares que podem ser realizadas com conjuntos *fuzzy*. As operações comumente utilizadas entre conjuntos *fuzzy* são as seguintes: união; intersecção; e complementação.

Para representar as operações anteriormente mencionadas, consideram-se, de acordo com a Figura 19, dois subconjuntos *fuzzy* (**A** e **B**) pertencentes ao universo **U**, cujas respectivas funções de pertinências são dadas por  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ , onde **x** pertence a **U**.

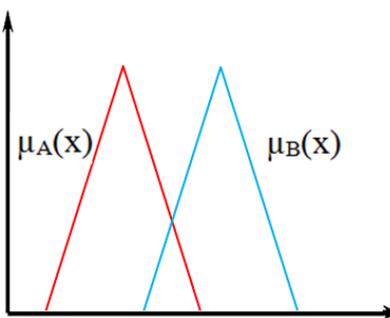


Figura 19 - Função de pertinência do subconjunto fuzzy A e B

Fonte: Autoria Própria, 2015.

Sendo assim, tem-se que a união entre A e B é o subconjunto *fuzzy* na qual função de pertinência é dada por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \text{ onde } x \in U \quad (16)$$

A Figura 20 mostra o resultado da união entre o conjunto A e B.

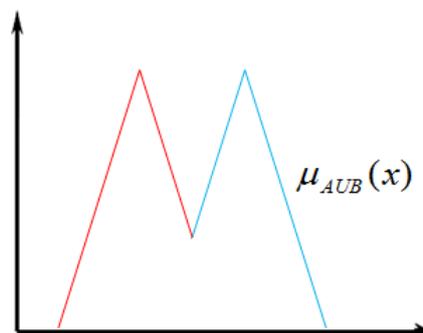


Figura 20 Resultado da união entre o subconjunto fuzzy A e B

Fonte: Autoria Própria, 2015.

Por outro lado, a função de pertinência do subconjunto *fuzzy* gerado pela intersecção entre A e B é dada por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \text{ onde } x \in U \quad (17)$$

A Figura 21 mostra o resultado da interseção entre o conjunto **A** e **B**.

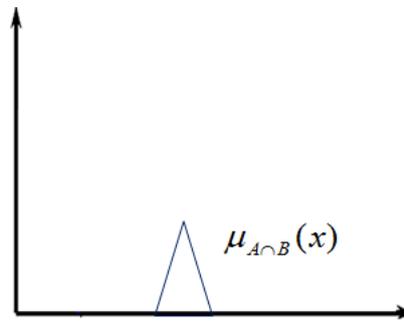


Figura 21 - Resultado da interseção entre o subconjunto *fuzzy* A e B

Fonte: Autoria Própria, 2015.

Por último, tem-se que o complementar de A em relação a U é o conjunto fuzzy cuja função de pertinência é dada por:

$$\mu'_A(x) = 1 - \mu_A(x), \text{ onde } x \in U \quad (18)$$

A Figura 22 mostra o resultado da complementação de **A** em relação a **U**. Diferentemente da operação convencional de conjunto, nos conjuntos *fuzzy* é possível que um dado elemento esteja em um conjunto A e em seu complementar ao mesmo tempo (BELLUCCI, 2009). Tem-se, também, que na operação *fuzzy* de conjunto união de **A** com seu complementar pode ou não ser igual a **U** (BELLUCCI, 2009).

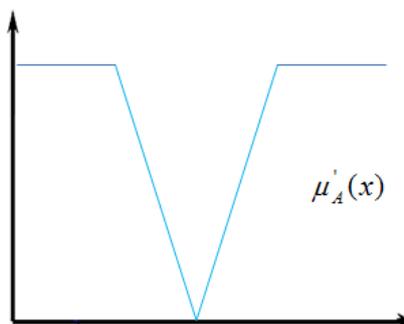


Figura 22 - Resultado da complementação entre o subconjunto fuzzy A e B

Fonte: Autoria Própria, 2015.

### 3.4. Regras Fuzzy

Como dito em seções anteriores, umas das vantagens dos sistemas *fuzzy* é o abandono da descrição matemática do sistema a ser controlado. Para tanto, utiliza-se um

conjunto de regras que objetivam descrever o comportamento do sistema e tomar as ações cabíveis diante das entradas do sistema, para tanto, baseia-se na experiência e conhecimentos de especialistas no assunto. A inferência baseada em regras *fuzzy* pode também ser compreendida como um funcional que mapeia um conjunto de entradas do sistema para um conjunto de saídas (MACÊDO, 2012).

Uma regra *fuzzy* simples do tipo **se-então** assume a seguinte forma:

*Se  $x$  é A então  $y$  é B*

Onde A e B são valores linguísticos definidos por um conjunto *fuzzy* dentro de um universo de discursos **X** e **Y**, respectivamente. A parte **se** da regra é denominada de antecedente ou premissa enquanto que a parte **então** da regra é denominada de consequente ou conclusão. Um exemplo desse tipo de regra é dado a baixo:

*Se João tem 1,95 m (parte antecedente) então João é alto*

*Se João tem 1,70 m (parte antecedente) então João é mediano*

*Se João tem 1,50 m (parte antecedente) então João é baixo*

O conceito de alto passa a ser entendido como um número variando entre 0 e 1 e o antecedente é uma interpretação que retorna um número simples também variando entre 0 e 1. Em geral a entrada para uma regra do tipo **se-então** é o valor atual da variável entrada do sistema *fuzzy* (nesse caso, a altura de João) e a saída é um conjunto *fuzzy* (nesse caso, se João é alto, mediano ou baixo). É importante destacar que, nesse tipo de inferência *fuzzy*, tanto antecedentes quanto interpretações são definidos através de funções de pertinências e que se a premissa é verdadeira então a conclusão também o será.

Após o sistema de regras, o conjunto *fuzzy* de saída passará pelo processo de desfuzzificação, atribuindo um valor preciso para a saída, para o caso de a saída ser um número real. Para interpretar uma regra do tipo **se-então** é necessário tomar as seguintes ações:

I – Evolução dos antecedentes que envolvem o processo de fuzzificação e aplicação de possíveis operadores *fuzzy*.

II – Aplicações dos consequentes para obtenção de um conjunto *fuzzy* de saída.

### 3.5. Inferência

Uma vez obtidas às regras, o passo seguinte é a realização da inferência *fuzzy* que se trata de um processo de formulação do mapeamento de uma dada entrada para certa saída (MATHWORKS, 2007). É através da inferência *fuzzy* que são definidos quais decisões devem ser tomadas, gerando assim as ações de controle.

A Figura 23 representa um processo de inferência *fuzzy* genérico onde o mesmo ocorre da esquerda para a direita, sendo que o problema em questão é representado através de duas entradas, três regras e uma única saída.

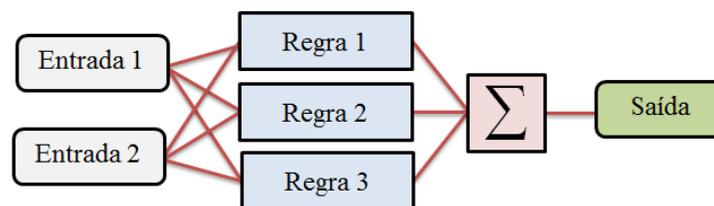


Figura 23 - Processo de inferência fuzzy  
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Um dos principais aspectos da lógica *fuzzy* é a estrutura em paralelo das regras, isto é, todas as regras (consequentes) são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtém-se uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico, quanto um conjunto *fuzzy*, a depender do tipo de consequente utilizado (Mamdani ou Takagi-Sugeno). Pode-se dividir o processo de inferência em cinco partes principais, são elas:

#### **Fuzzificação das variáveis de entrada**

Antes que cada regra possa ser analisada, é necessário que as entradas sejam fuzzificadas de acordo com cada variável linguística. Portanto, o processo de fuzzificação consiste em determinar como as entradas podem ser descritas através de um conjunto *fuzzy*, para tanto se utiliza um conjunto apropriado de funções de inferência *fuzzy*.

#### **Aplicação dos operadores fuzzy (AND ou OR) no antecedente**

Após o processo de fuzzificação e obtenção do grau de pertinência com que cada antecedente satisfaz cada regra tem-se aplicação dos operadores *fuzzy*. Se o antecedente de uma dada regra tem mais do que uma parte, o operador *fuzzy* é aplicado para obter

um número que represente o resultado antecedente para essa regra. Ao final, esse número é então aplicado à função de saída (MATHWORKS, 2007).

### **Implicação do antecedente com o consequente**

Antes de aplicar o método de implicação deve-se determinar o peso das regras. Toda regra possui um peso (um número variando entre 0 e 1), que é aplicado ao número dado pelo antecedente.

Após a especificação apropriada das regras, o método de implicação é implementado. A entrada para o processo de implicação é um número simples obtido pelo antecedente e a saída é um conjunto *fuzzy* (MATHWORKS, 2007).

### **Agregação de todas as saídas**

Devido às decisões em um sistema de inferência<sup>2</sup> *fuzzy* (do inglês *Fuzzy Inference System* - FIS) ser baseados no teste de todas as regras, estas devem de alguma maneira ser combinadas a fim de se tomar uma decisão com relação à saída do FIS, para esse fim utiliza-se o processo de agregação. A agregação é o processo pelo qual o conjunto *fuzzy*, que representa a saída de cada regra, é combinado em um único conjunto *fuzzy*. Esse processo ocorre apenas uma vez para cada variável de saída sendo que a entrada do processo de agregação é uma lista de funções de saída truncadas, retornadas pela implicação de cada regra, já a saída é um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída (MATHWORKS, 2007).

É importante destacar que devido o método de agregação ser comutativo tem-se que a ordem com que as regras são executadas não desempenha papel decisivo para melhorar ou piorar o desempenho do sistema *fuzzy*. Existem três métodos internos que podem ser utilizados no MATLAB, são eles:

- Max - combina os máximos de cada função de pertinência
- Probor - OR probabilístico
- Sum – soma simples de cada conjunto de saída da regra

---

<sup>2</sup> Processo que determina que decisões devem ser tomadas a respeito do processo. Essas decisões são tomadas com base no teste de todas as regras de inferência.

### 3.5.1. Métodos de Inferência Fuzzy

As duas metodologias principais de inferência *fuzzy* são Mamdani e Takagi-Sugeno, sendo que o primeiro é a metodologia mais comum devido a sua estrutura min-max.

A Figura 24 mostra um exemplo de um sistema de inferência baseado na teoria de Mamdani. Percebe-se que o processo de obtenção do grau de pertinência consiste no valor mínimo entre a entrada  $x$  e  $y$  e que a agregação resulta na soma das áreas resultantes. Para obtenção da saída pode-se utilizar, por exemplo, o centroide da área resultante.

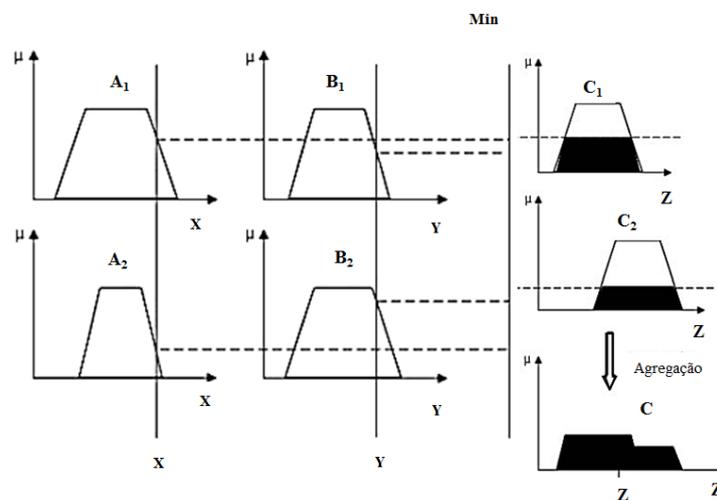


Figura 24 - Esquema de um método de inferência Mamdani  
**Fonte:** Adaptado de Sumathi e Paneerselvam, 2010.

A Figura 25 mostra um exemplo de um sistema de inferência baseado na teoria de Takagi-Sugeno.

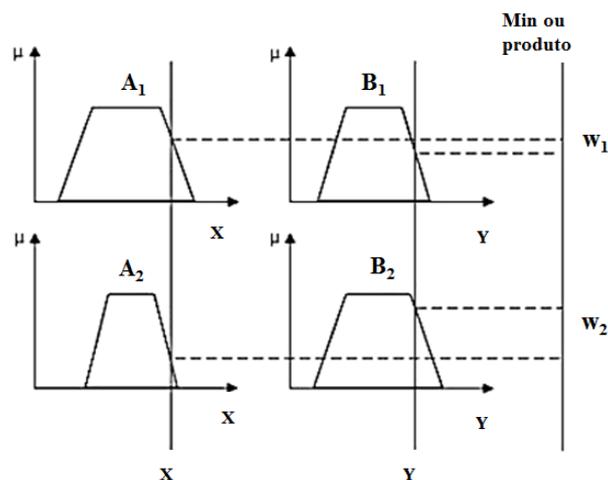


Figura 25 - Esquema de um método de inferência Takagi-Sugeno  
**Fonte:** Adaptado de Sumathi e Paneerselvam, 2010.

Tem-se que diferentemente do método inicialmente abordado, no método de inferência Takagi-Sugeno, a saída do sistema *fuzzy*, representada pela Equação 18, é dada pela média pondera das funções lineares para cada respectiva saída do sistema ( $z_1$  e  $z_2$ ).

$$z = \frac{z_1 w_1 + z_2 w_2}{w_1 + w_2} \quad (18)$$

onde

$$z_1 = \alpha_1 x + \beta_1 y + \lambda_1 \text{ e } z_2 = \alpha_2 x + \beta_2 y + \lambda_2 \quad (19)$$

Para esse método de inferência, a forma geral de uma regra é obtida como mostra a Figura 26 onde **se** *Antecedente<sub>1</sub>* e *Antecedente<sub>2</sub>* forem verdadeiros **então** o *consequente* será igual a um valor dado por  $f(x,y)$ .

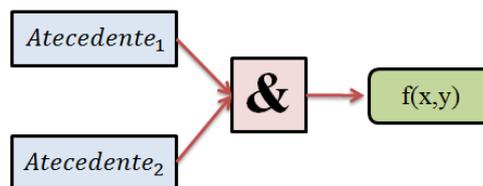


Figura 26 - Forma geral de regra para o método de inferência Takagi-Sugeno

**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

É importante destacar que a função  $f(x,y)$  pode ser uma função linear ou não-linear. Entretanto, na maioria das vezes são utilizadas funções lineares enquanto que funções não lineares são utilizadas para técnicas adaptativas.

Ambos os métodos anteriormente abordados comportam-se de forma semelhante desde as etapas de fuzzificação das entradas à aplicação dos operadores *fuzzy*. Como foi exposta, a principal diferença entre esses dois métodos é referente ao grau de pertinência. Para o método baseado na teoria de Takagi-Sugeno tem-se que para obtenção do grau de pertinência da saída do controlador é necessário usar uma função  $f(x,y)$ .

A seguir são expostas algumas das principais vantagens provenientes dos dois métodos de inferência abordados anteriormente.

#### **Vantagens do método de Takagi-Sugeno:**

- Computacionalmente eficiente;
- Trabalha bem com técnicas lineares (ex.: controle PID);

- Trabalha bem com técnicas adaptativas e de otimização;

**Vantagens do método de Mamdani:**

- É intuitivo;
- Largamente utilizado;
- Bem adequado ao raciocínio humano.

### 3.6. Desfuzzificação

A entrada do processo de desfuzzificação é um conjunto *fuzzy* proveniente do processo de agregação e a saída é um número real. Portanto, a desfuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto.

As características e o comportamento do processo controlado são determinantes na escolha do método de desfuzzificação mais apropriado ao problema. Os métodos de desfuzzificação mais aplicados são: centro da área (CA), esse método leva em conta o centro da região; centro de máximo (CM), esse método leva em conta somente regiões de maior possibilidade, e Média dos Máximos (MM), esse método utiliza a média dos elementos de maior pertinência.

As seguir serão expostos os materiais e métodos utilizados para obtenção dos resultados a cerca do controlador fuzzy desenvolvido.

## Capítulo 4 - Materiais e Métodos

As seções que se seguem expõem toda a parte de implementação, modelagem e simulação dos modelos eólicos e do controle *fuzzy* desenvolvido.

### 4.1. Modelo Eólico Proposto para Simulação

Objetivando testar o modelo de controlador *fuzzy* desenvolvido em diferentes situações e sistemas, tem-se que o mesmo foi simulado considerando um sistema isolado, utilizando uma turbina eólica com gerador do tipo PMSG.

A escolha dos modelos de turbinas foi feita com base nas características e aplicações dos modelos selecionados, como foi exposto no Capítulo 2. Entende-se que geração descentralizada conectada a rede irá crescer consideravelmente ao longo das próximas décadas, sendo assim, a geração pontual poderá ser responsável por uma parcela considerável de injeção de potência no Sistema Interligado Nacional - SIN, dessa maneira um controle mais eficiente poderia contribuir diretamente para melhorar a qualidade de energia que poderia ser injetada no sistema de potência.

A Figura 27 mostra a parte principal do sistema isolado que foi utilizado para a primeira simulação. Para tanto, foi utilizado um gerador trifásico com tensões senoidais defasadas de 120° entre si, mais especificamente, um gerador com PMSG com polos salientes e potência nominal igual a 6 kW, onde o mesmo foi conectado a uma carga trifásica de 25 Ohms.

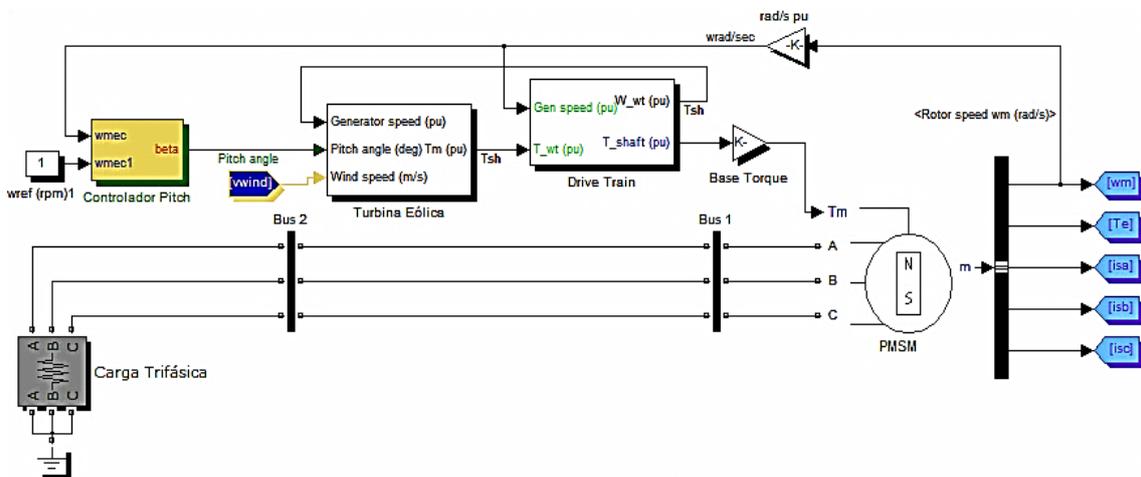


Figura 27 - Sistema eólico isolado conectado a uma carga puramente resistiva  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

A Figura 28 demonstra de forma mais detalhada o modelo em bloco utilizado para representação da turbina eólica.

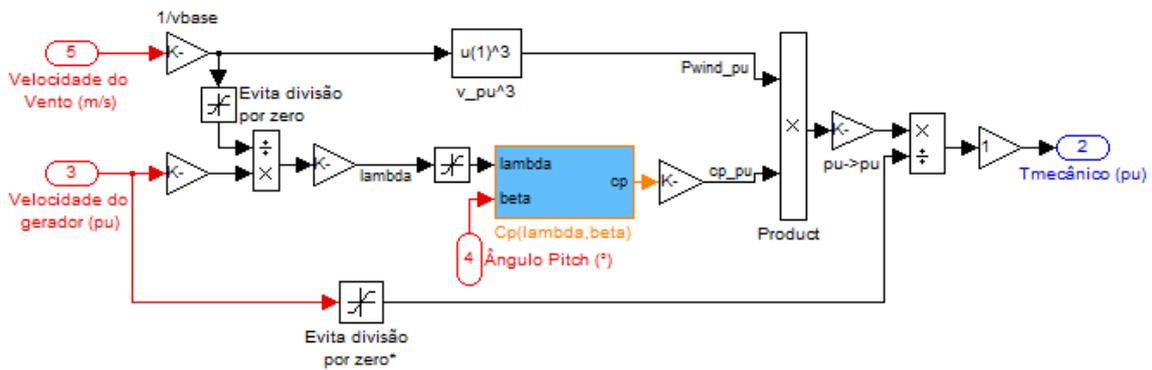


Figura 28 - Modelo em bloco da turbina eólica  
 Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Figura 29 demonstra mais detalhadamente a modelagem em blocos para o sistema de transmissão, referentes a um grupo de componentes que fornecem energia para o eixo do gerador PMSG, comumente conhecido por *drive-train*.

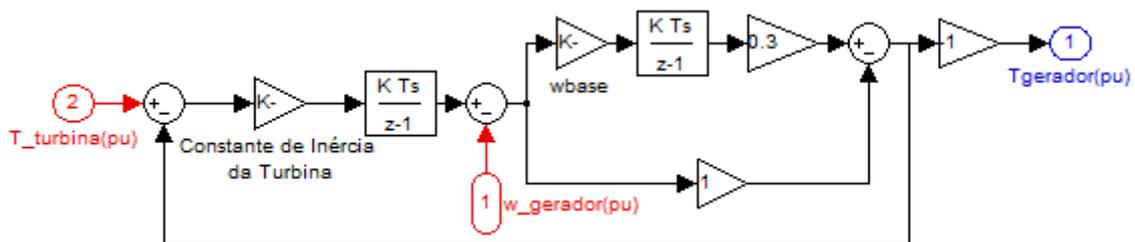


Figura 29 - Modelo em bloco do *drive-train* da turbina  
 Fonte: Autoria Própria, 2015.

As próximas seções abordarão as considerações e especificações pertinentes ao desenvolvimento do controlador *fuzzy* proposto.

## 4.2. Construção do Controlador Fuzzy Pitch Proposto

Na Figura 30 é apresentado o diagrama de blocos para o controle proposto. Como é possível verificar, tem-se que o controlador proposto compara o erro entre a velocidade atual do rotor e a velocidade de referência para determinar qual ângulo *pitch* dota o sistema sem grandes variações de potência. Além disso, baseado na derivada da variação do erro, o controle é capaz de prever as tendências da curva de resposta do sistema controlado, tais como tendências de crescimento, redução e estabilização.

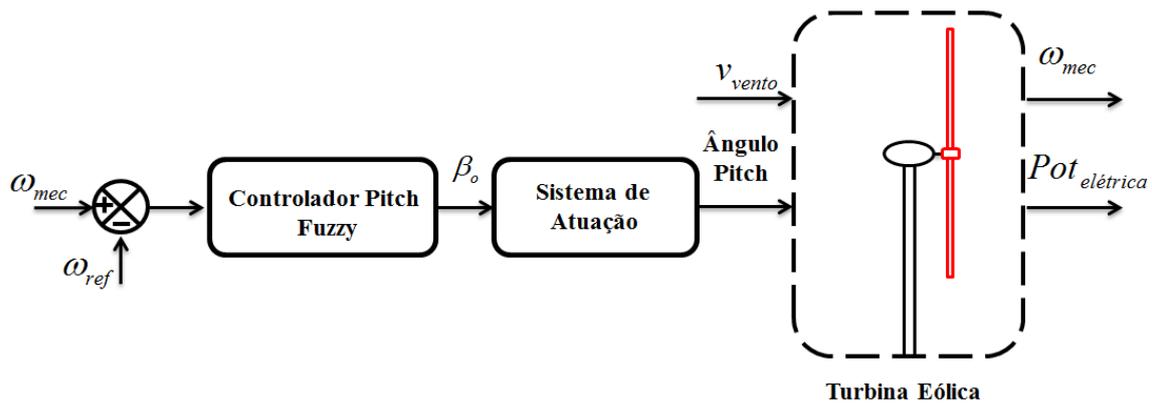


Figura 30 - Topologia do sistema eólico com o controle fuzzy proposto  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

A Figura 31 mostra com maiores detalhes a topologia desenvolvida para o *Controlador Pitch Fuzzy* implementado através do Simulink.

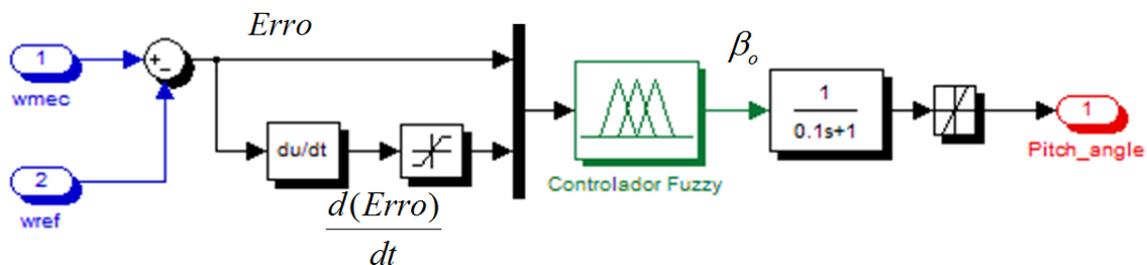


Figura 31 - Controlador Pitch Fuzzy implementado no Simulink  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

onde:

$w_{mec}$  - velocidade mecânica do rotor (pu)

$w_{ref}$  - velocidade de referência (pu)

$Erro$  - erro do sistema

$\frac{d(Erro)}{dt}$  - derivada do erro

$\beta_o$  - ângulo pitch de referência (°)

Na Figura 32 é possível ver o diagrama em blocos implementados, utilizando o *Simulink*, para o controle de ângulo de pitch clássico. Tem-se que os mesmos parâmetros de controle ( $w_{mec}$  e  $w_{ref}$ ) também foram utilizados como variáveis de controle. Além disso, os dois controles apresentam características semelhantes, isso porque ambos são controles proporcionais, isto é, não adicionam nem polos nem zero ao sistema. Sendo assim é possível manter uma comparação fiel entre os dois modelos, facilitando,

também, identificar as características adicionais se provenientes da adição de um controle inteligente a um controle tradicional.

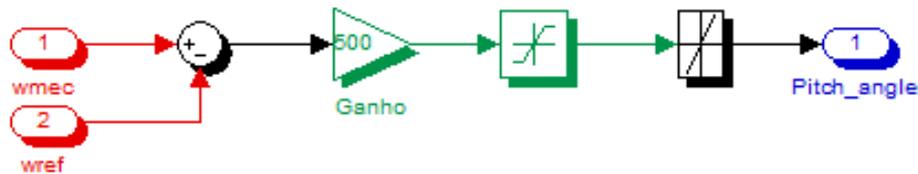


Figura 32 - Controlador Pitch Clássico implementado no Simulink

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A seguir, serão expostas as configurações e ajustes para o sistema fuzzy propriamente dito.

### 4.3. Escolha dos Conjuntos Fuzzy

Como dito no Capítulo 3, os sistemas *fuzzy* tem como uma de suas principais características o fato de poderem ser baseados em conhecimento de especialistas, sendo assim, a escolha dos conjuntos *fuzzy* para representar o erro e a sua derivada terá como base os conhecimentos em sinais e sistemas e os resultados provenientes das simulações.

Como citado no Capítulo 4, existem diversas funções de pertinência que podem ser utilizadas em um sistema *fuzzy*. Para desenvolvimento do presente trabalho, foram utilizadas funções de pertinência triangulares e trapezoidais para representar cada entrada e saída do controle *fuzzy* a fim de proporcionar maior sensibilidade ao sistema modelado, especialmente quando os valores se aproximam dos valores de zero.

Resultados experimentais mostram que um número prático de funções de pertinência está entre 2 e 7. O aumento das funções de pertinência implica no aumento da precisão do sistema fuzzy, entretanto, isso também resulta em maior esforço computacional. Tem-se também, que acima de 7 funções de pertinências não existem melhorias consideráveis na precisão. A superposição entre as funções de pertinência também afeta a precisão do sistema, sendo que a faixa de valores aceitáveis varia de 25% a 75% (SIMÕES E SHAW, 2007). Portanto, com base nas simulações executadas, optou-se por utilizar 5 funções para representar o Erro do sistemas e 7 para a derivada do erro e por uma superposição de aproximadamente 50%.

Para denominar as funções de pertinência foram utilizados os seguintes termos: Muito Grande (NL), Negativo Médio (NM), Negativo Pequeno (NS), Zero (ZE), Pouco Positivo (PS), Positivo Médio (PM), e Positivo Grande (PL).

A Figura 33 mostra o primeiro conjunto de variáveis linguísticas para a variável de entrada *Erro*, que representa o erro entre a velocidade atual do rotor e a sua referência. Para essa entrada foi utilizado um intervalo variando de -1 a 1.

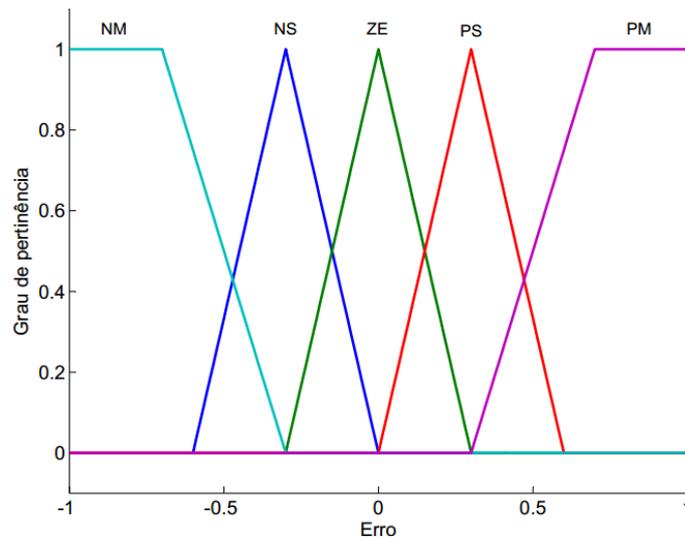


Figura 33 - Erro do sistema definido em termos de conjunto fuzzy

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Figura 34 mostra o segundo conjunto de variáveis linguísticas para a variável de entrada *derErro*, que representa a derivada do erro do sistema em um certo instante  $t$ . Para essa entrada foi utilizado um intervalo variando de -0.1 a 0.1.

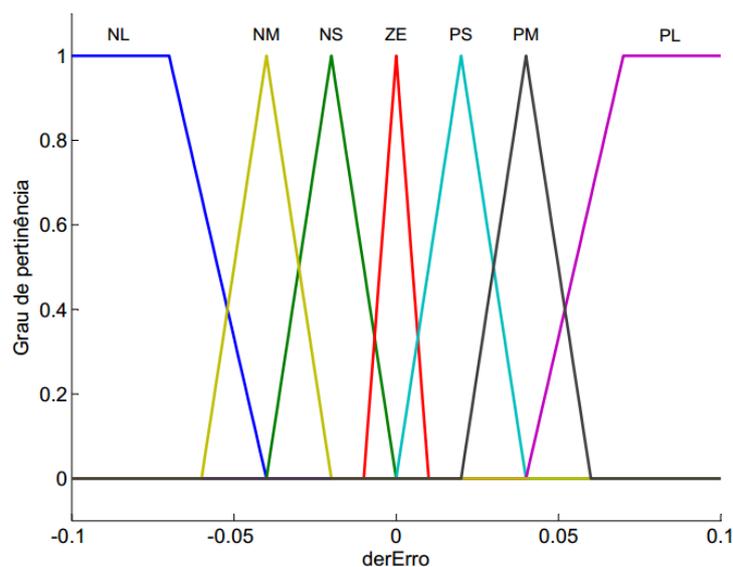


Figura 34 - Derivada do erro do sistema definido em termos de conjunto fuzzy

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Figura 35 mostra o conjunto de variáveis linguísticas para a variável *pitch\_angle* (que representa o ângulo mais adequado para as atuais condições de *Erro* e *derErro*). Para essa saída foi utilizado um intervalo variando de  $-10^\circ$  a  $10^\circ$ .

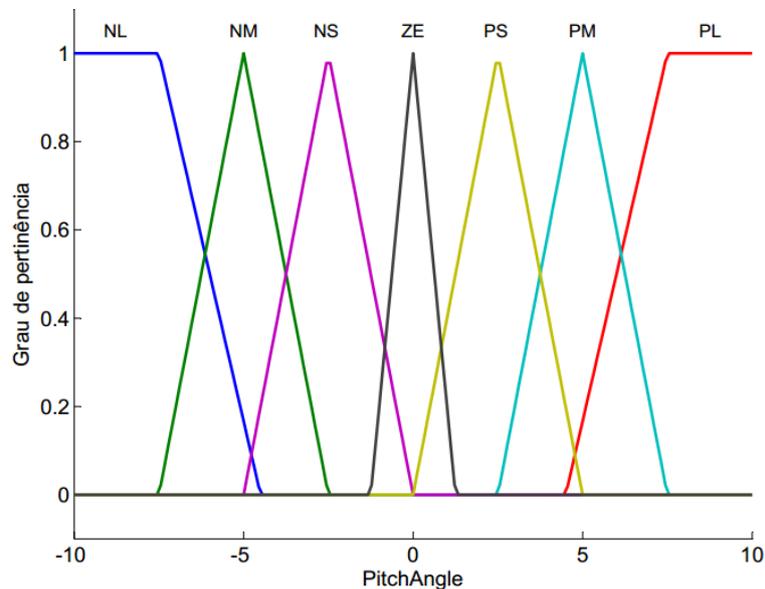


Figura 35 - Ângulo beta definido em termos de conjunto fuzzy  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

Nota-se que foram utilizadas funções triangulares para o interior enquanto que as funções trapezoidais representam os extremos. Isso porque, entende-se que a região central deve ter ajuste mais fino, isto é, deve ter maior sensibilidade aos parâmetros enquanto que nas regiões extremas o ajuste grosseiro é aceitável e, portanto, os parâmetros não devem ser sensíveis a mudanças que ocorram nos valores extremos do intervalo das entradas e saídas.

#### 4.4. Determinação das Regras

Como exposto no Capítulo 3, as regras especificam como entras e saídas se relacionam. A Tabela 2 mostra o sistema de regras que foram utilizadas para o controlador proposto, enfatizando que tais escolhas foram feitas com base em um conhecimento prévio e nos resultados obtidos com as simulações realizadas. É importante destacar que nenhuma expressão numérica foi utilizada, isto é, somente expressões linguísticas descrevem entradas e saídas do controlador fuzzy. Sendo essa uma característica muito importante, pois elimina a necessidade de linearidade entre entra e saída do controlador e a determinação de uma equação matemática dos sistema eólico.

Tabela 2- Conjuntos de regras para o Controlador Pitch Fuzzy

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

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A próxima seção tratará sobre os métodos selecionados para as etapas de fuzzificação, inferência e desfuzzificação.

### 4.5. Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação

A Figura 36 mostra a superfície de controle obtida como resultado das 35 regras expostas na Tabela 2. Para construção dessa figura foi utilizado o método de inferência do centro de gravidade, que retorna ao centro da área sob a curva. Além disso, utilizou-se o método de inferência baseado na teoria de Mamdani para personalizar as funções de pertinência, uma vez que esse método é mais intuitivo, mais adequado à emulação do raciocínio humano, tem grande aceitação e tem sido a metodologia mais usada ao longo dos anos.

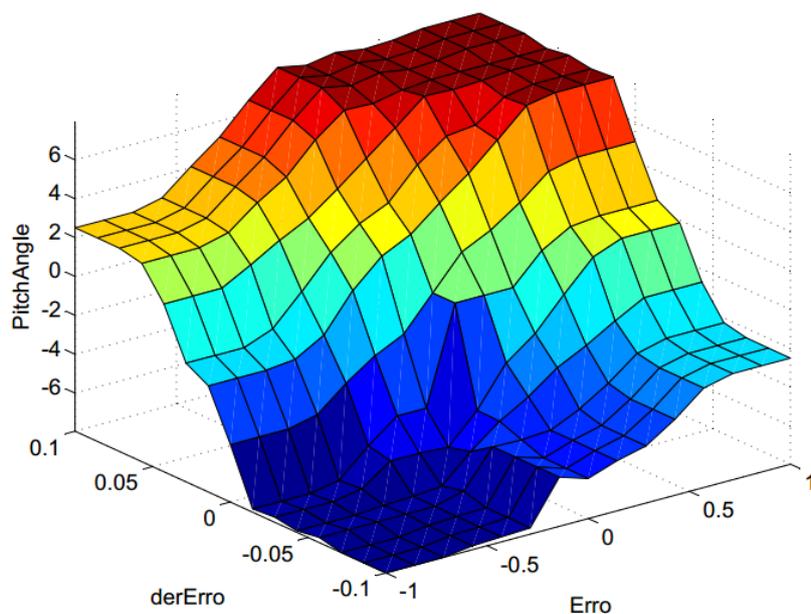


Figura 36 - Visualização da superfície de controle  
 Fonte: Autoria Própria, 2015.

A principal dificuldade da estratégia de Takagi-Sugeno, para o problema levantado pelo presente trabalho, é que, segundo Sumathi e Paneerselvam, (2010), essa estratégia foi desenvolvida como um modelo eficiente para aplicações em sistemas cuja relação entre entradas e saídas é bem definida e tal situação não pode ser garantida na presença de ventos de grande turbulência, o que confere ao sistema eólico forte não linearidade. Dessa forma, tem-se que esse método é mais adequado para sistemas lineares não sendo, portanto, apropriada a sua aplicação no presente trabalho.

Verificou-se que o modelo de inferência tipo *max* forneceu melhor continuidade e saída mais suave a desfuzzificação pelo centroide da área, que apresentou melhores resultado da saída em relação aos outros métodos disponíveis no *toolbox* de lógica *fuzzy* do Matlab. Os requisitos que foram avaliados para determinação do melhor conjunto de parâmetros para o controle *fuzzy* proposto foram: tempo de processamento, e qualidade da resposta, onde se verificou a acomodação e quantidade de oscilação presente no sinal de potência resultante.

No próximo capítulo os resultados obtidos de cada simulação serão expostos e analisados.

## Capítulo 5 - Resultados e Discursões

Os sistemas eólicos de geração descentralizados é uma tendência crescente que busca garantir a universalização do atendimento de energia elétrica e reduzir os riscos de desabastecimento. Entretanto, tais sistemas necessitam de controles com desempenho eficiente, independentes do regime do vento, para que possam ser conectados ao SIN. Além disso, com base no Capítulo 2, verificou-se que os sistemas eólicos de eixo horizontal e velocidade variável com controle de *pitch* são mais adequados a geração eólica de eletricidade, portanto, tal modelo foi selecionado para desenvolvimento e implementação da estratégia de controle proposto através da aplicação de lógica *fuzzy*, para otimizar o ângulo de *pitch*.

Entretanto, para que seja possível fazer as análises de desempenho, identificar os ganhos adicionais e ponderar se os mesmo justificam ou não a aplicação da técnica em questão, é necessário escolher um controle de características próximas ao *fuzzy* desenvolvido. Dessa forma, selecionou-se o controle proporcional clássico, isso porque assim como o *fuzzy* puro, o mesmo não adiciona polos nem zero ao sistema em malha fechada. Além disso, como o a turbina eólica pode apresentar comportamentos dinâmicos que não são completamente conhecidos, torna impraticável a utilização de um controle PID, sendo que na maioria das vezes a forma mais como de sintonia de seus parâmetros é através do método de tentativa e erro.

Para realização das modelagens e simulações do desempenho do controle proporcional clássico e do controle *fuzzy*, utilizou-se o software *SIMULINK*<sup>®</sup>, um programa de simulação dinâmica no qual é possível modelar, supervisionar e promover os ajustes cabíveis ao sistema. Para desenvolvimento do sistema *fuzzy* foi utilizado o *Fuzzy Logic Toolbox*<sup>™</sup>, ambos disponíveis no *MATLAB*<sup>®</sup>.

A Figura 37 demonstra a curva de comportamento do regime de vento utilizado para checar a habilidade de cada controle manter a qualidade e eficiência do sistema dentro de limites aceitáveis. Além disso, ela foi usada para checar o desempenho dos modelos analisados em retornar ao *set-point*, quando submetidos a ventos de diferentes intensidades acima e abaixo de seu valor nominal.

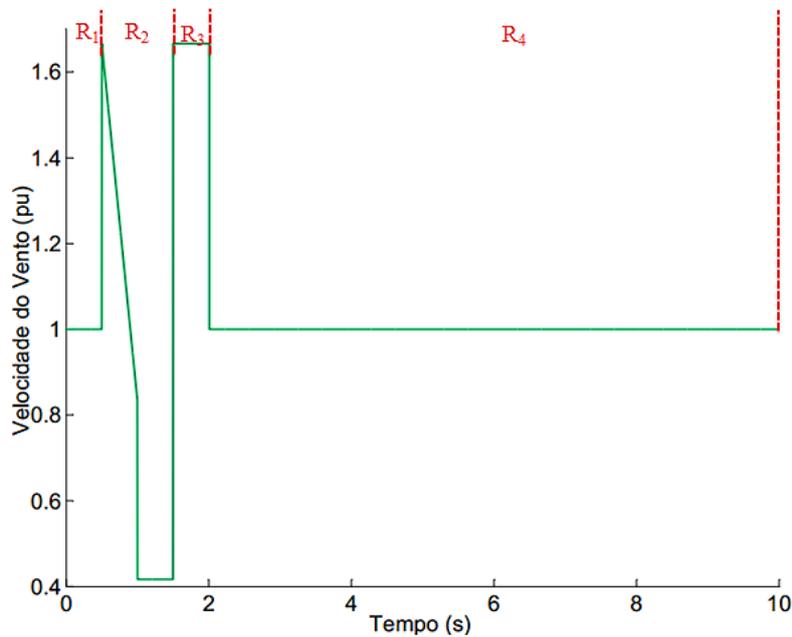


Figura 37 - Velocidade do vento (por unidade)

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Figura 37 possui quatro regiões bem distintas ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ ), com perfis de vento com diferentes formas e intensidades, o que exige mais do sistema de controle. Nesse sistema, o vento atinge valores 66% acima (nas regiões  $R_1$  e  $R_3$ ) e 58% abaixo ( $R_2$ ) de seu valor nominal. Já a região final do sinal ( $R_4$ ) representa a estabilização do vento em seu valor nominal (12 m/s). Ambos controladores são submetidos ao vento nas mesmas condições de inicialização, saindo da condição de repouso até atingir seu valor nominal.

A Figura 38 mostra a resposta do controle pitch clássico quanto submetido ao regime de vento descrito na Figura 37. Inicialmente o controle responde reduzindo o ângulo de *pitch* de forma linear, reduzindo a frenagem aerodinâmica no sistema e fazendo com que a velocidade do rotor tenda a acelerar, pois o sistema parte do repouso. A tendência de decrescimento do ângulo pitch é mantida até quase o início da região 3, mostrando que o controle clássico possui um tempo de resposta consideravelmente alto e não responde rapidamente as mudanças de intensidade do vento que ocorre na região 2. Na região 3, o vento possui um nível muito elevado de vento, com isso o ângulo pitch é aumentado na tentativa de aumentar a frenagem aerodinâmica, desacelerando a turbina. Por fim, quando o vento permanece em seu valor nominal o controle reduz o ângulo pitch e o mantém em valores próximo a  $5^\circ$ .

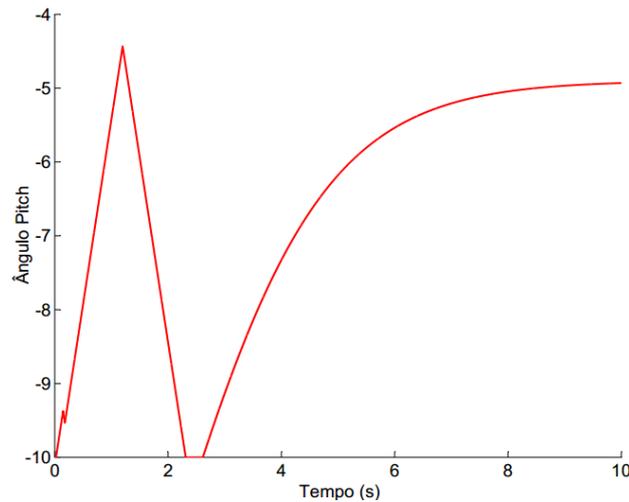


Figura 38 - Resposta do controle pitch clássico  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

A Figura 39 mostra a resposta do controle pitch onde foi implementada a topologia de controle proposta, aplicando a técnica de inteligência artificial conhecida como Lógica *Fuzzy*. O controle responde a  $R_1$  com o aumento do ângulo, para compensar o *startup* do sistema, retornando ao zero ( $0^\circ$ ). Em  $R_2$  a resposta do controle é mais elevada, pois a intensidade do vento atinge valores bem acima a e abaixo de seu valor nominal. Na região  $R_3$ , na qual o vento volta a níveis elevado de velocidade, mas com perfil diferente, o controle aumenta o valor de *pitch* para reduzir a intensidade da velocidade do sistema, semelhantemente a parte final da região 2. Por fim, o ângulo de *pitch* final é mantido próximo de seu valor de máximo desempenho ( $0^\circ$ ), com suave tendência de acomodação em valores abaixo de  $0,4^\circ$ , fazendo com que a potência gerada pelo o sistema fique mais próximo de seu valor nominal.

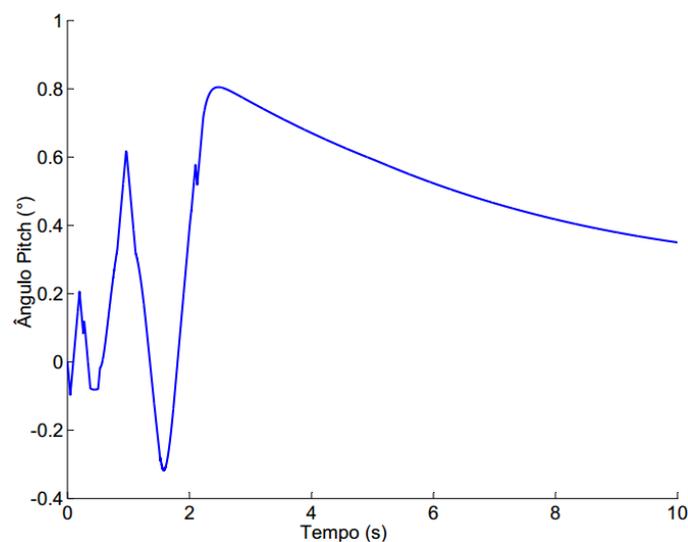


Figura 39 - Resposta do controle pitch fuzzy  
**Fonte:** Autoria Própria, 2015.

Percebe-se que em certos aspectos, a Figura 38 tem similaridades com a Figura 39, entretanto, tem-se que na tentativa de compensar a alta e baixa velocidade do sistema, o controle *fuzzy* respondeu de forma mais rápida do que o modelo clássico. Além disso, nota-se que o mesmo promoveu ajustes mais finos de ângulos, onde a resposta do controle variou, aproximadamente, entre -0,3 e 0,8, conferindo ao sistema melhor aproveitamento da potência disponível na massa de ar em movimento, tal observação pode ser comprovada pela análise da Figura 40 e 41.

A Figura 40 mostra a potência final gerada mediante a utilização dos dois sistemas de controle, quando aplicados a um sistema de geração eólico isolado.

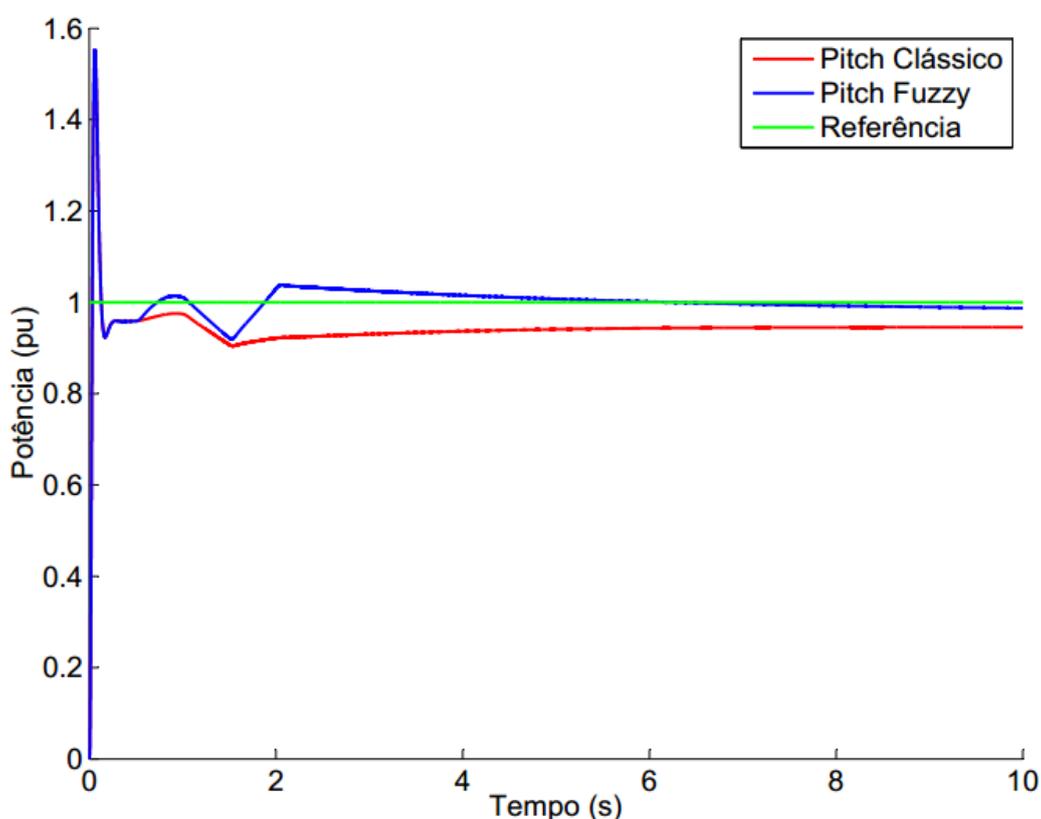


Figura 40 – Comparativo entre as potências geradas  
Fonte: Autoria Própria, 2015.

Combinando as informações contidas na Figura 40 e na Tabela 3, onde estão expostos os valores de máximo sobressinal e tempo de acomodação<sup>3</sup> para o sinal de potência para os dois tipos de controles. Fica claro que o controle *fuzzy* obteve melhores resultados do que o controle clássico. Isso porque proporcionou uma influência considerável, possibilitando menores níveis de sobressinal, oscilação, tempo de acomodação e erro em regime permanente do que o modelo clássico. É interessante

<sup>3</sup>Foi considerado o critério de 2% para o tempo de acomodação, isto é, quando o sinal atingir e manter uma variação entre 0,98 - 1,02%, tem-se que o mesmo estará em regime.

destacar que o controle proporcional clássico manteve um erro em regime em torno de 6% para o sinal de potência, bem superior ao critério de acomodação adotado que foi de 2%. Dessa forma, não foi possível medir o tempo de acomodação para o controle clássico.

Tabela 3 – Comparativo entre as potências geradas para cada controle

Controle	Máximo Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Clássico	55,2570	Não medido
Fuzzy	55,2491	3,5001

Fonte: Autoria própria, 2015.

Além de influenciar de forma considerável a estabilização do sistema, o controle *fuzzy* proporcionou uma redução de 0.0143% no máximo sobressinal, quando comparado com o controle clássico.

Para obtenção desses resultados foi utilizado o seguinte *script* em um arquivo do Matlab:

```
function [Mp, ts]=resp(y,t)
[ymax, tp]=max(y(:,1));
Mp=abs((ymax-1)/1)*100; % Máximo Sobressinal
s=length(y);
while y(s)>1*0.98&&y(s)<1*1.02;
s=s-1;
end
ts=t(s-1); %Tempo de Acomodação
return
```

A Figura 41, apesar de ter similaridades com a Figura 39, representa os conjugados eletromagnéticos para ambos os controladores. Nota-se que o controlador *fuzzy* foi bem mais eficiente se comparado com o controlador clássico, pois apresentou menor variação no sinal e teve erro em regime praticamente nulo. O controle clássico continuou com um erro em regime como na situação anterior, porém, desta vez, o mesmo foi inferior a 2%.

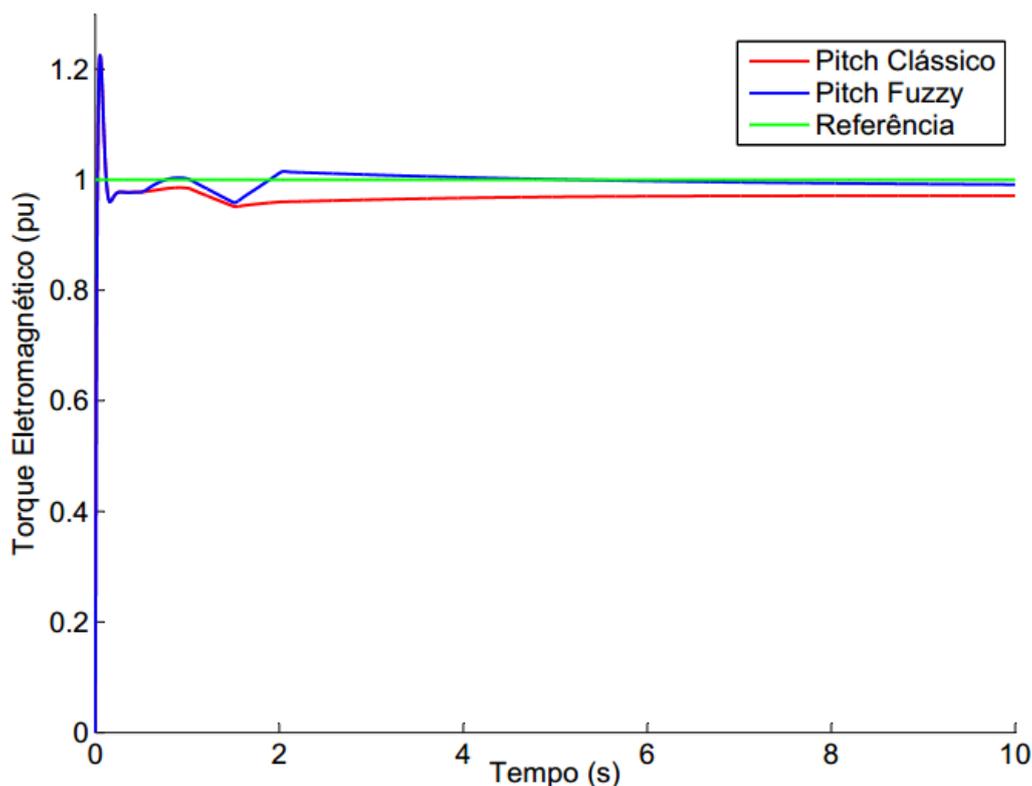


Figura 41 - Comparativo entre os torques eletromagnéticos

Fonte: Autoria Própria, 2015.

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para o máximo sobressinal e tempo de acomodação referente ao conjugado eletromagnético de cada sistema. Os dados aí representados validam as afirmações anteriormente feitas, pois o controle *fuzzy* apresentou tempo de acomodação significativamente inferior, diferença de aproximadamente 7 segundos, e sobressinal levemente menor, 0,0120% de redução se comparado com o sistema clássico.

Tabela 4- Comparativo entre os torques eletromagnético para cada controle

Controle	Máximo Sobressinal (%)	Tempo de Acomodação (s)
Clássico	22,5035	8,3332
Fuzzy	22,5008	1,2553

Fonte: Autoria própria, 2015.

Como base na interpretação dos dados, tem-se que o controlador fuzzy foi capaz de exercer mudanças significativas no erro em regime permanente, no tempo de acomodação do sistema e promover pequena redução do máximo sobressinal. Com isso, a técnica fuzzy foi capaz de melhorar as características do sistema clássico e conferir ao

---

mesmo características adicionais importantes ao controle eficiente de uma turbina eólica.

## Capítulo 6 - Conclusão

Nesse trabalho um controle inteligente foi desenvolvido através da técnica de Lógica *Fuzzy* para aplicação em sistemas eólicos de velocidade variável. Para tanto, utilizou-se em conjunto os seguintes *toolbox*: SIMULINK<sup>®</sup> e *Fuzzy Logic Toolbox*<sup>™</sup>, ambos disponíveis no *software* MATLAB<sup>®</sup>. Vale destacar que o presente trabalho busca analisar e descobrir vantagens adicionais provenientes da aplicação de sistemas inteligentes em sistemas dinâmicos não modelados ou de difícil modelagem, além de pretende ponderar se tais vantagens são realmente significativas.

Ambos os controladores desenvolvidos foram responsáveis por controlar a variação do ângulo de inclinação de uma turbina eólica, a fim de melhorar a qualidade da energia eléctrica gerada. Sendo essa uma importante meta, uma vez que podem afetar o custo da energia de várias maneiras, por exemplo, exigindo investimentos adicionais em linha de energia ou limitar o fluxo de energia para a rede eléctrica.

O controle desenvolvido é posto como forma de remodelar o controle proporcional clássico e como alternativa eficiente para aplicação em sistemas eólicos de velocidade variáveis, em substituição aos controles clássicos tipo Proporcional (P) e/ou Proporcional-Integral (PI), uma vez que tais controles não possuem bom desempenho em sistemas que contenham forte não linearidade, além de terem parâmetros de ganho de difícil sintonia, sendo que muitas das vezes o método de tentativa e erro o mais utilizado para determinar o melhor ajuste do controlador.

Ficou claro através da análise da Figura 38 e 39 que mostram, respectivamente, a respostas do controle clássico e do controle Fuzzy, que diferentemente do controle clássico, o controle fuzzy teve respostas mais rápidas e conseguiu melhor gerenciamento do sistema eólico sobre condições desfavoráveis de regime de vento. Além disso, através dos dados expostos na Figura 40, 41 e nas Tabelas 3 e 4, verificou-se que o controle *pitch fuzzy* teve melhor desempenho quando o sistema foi submetido a regimes de ventos de grande e baixa velocidade, sendo capaz de melhorar a eficiência e qualidade da energia gerada. Além disso, tem-se que o controle desenvolvido atribuiu características importantes ao sistema controlado, tais como: redução significativa do erro em regime; redução significativa do tempo de acomodação; e pequena redução do máximo sobressinal. Isso permite afirmar que o sistema de regras do controle fuzzy faz

com que o sistema de controle se ajuste ao tipo de dificuldade que sujem (devido a natureza estocástica do vento), melhorando e adicionando novas características ao sistema de controle original.

Com base nos resultados anteriormente expostos, é possível obter outros resultados interessantes, por exemplo, para um controle P clássico, a redução do erro em regime permanente leva a aumentar as chances de o sistema atingir uma situação de instabilidade e não possui grande influência no tempo de acomodação do sistema. Entretanto, o controle fuzzy conseguiu reduzir simultaneamente o erro em regime do sistema, o máximo sobressinal (de forma não tão expressiva) e o tempo de estabilização (de forma expressiva).

Com isso, pode-se afirmar que a aplicação da lógica *fuzzy* ao problema em questão pode ser uma solução promissora, adequada para supervisão de sistemas autônomos, uma vez que o uso do conhecimento especialista elimina a necessidade de complexas modelagens matemáticas e permite maior adequação e flexibilidade do sistema de controle.

A opção do controle *fuzzy* operando com a variação do erro também foi analisada durante o desenvolvimento da topologia atual de controle, todavia, o mesmo mostrou-se inferior ao sistema atual com maiores valores de tempo de acomodação e máximo sobressinal. Em virtude disso essa estrutura foi desconsiderada.

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação e análise do controle atual em um sistema de geração eólica conectada a rede, analisando o seu comportamento em situações normais (de regime de vento e funcionamento) bem como em situações críticas de ocorrência de faltas no sistema. Também se sugere a aplicação e análise em outras turbinas eólicas, como por exemplo, turbina com gerador do tipo DFIG.

## Referências

- AMENDOLA, M.; SOUZA, A.L; BARROS, L.C. **Manual do Uso da Teoria dos Conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5.** FEAGRI & IMECC/ UNICAMP, 2005.
- BAYGILDINA, E.; HYNYNEN, K. M.; PYRHONEN, O., "**Wind turbine adaptive controller modeling,**" **Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA)**, 2012 IEEE , vol., no., pp.1,6, 16-18 July 2012.
- BELLUCCI, Danilo Peixoto. **Sistemas Baseados em Regras Fuzzy e Aplicações.** 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação Universidade Federal do Abc, Universidade Federal do Abc, Santo André, 2009. Cap. 4.
- BIANCHI , Fernando D.; BATTISTA, Hernán de, e MANTZ Ricardo J, **Wind Turbine Control Systems, Principles, Modelling, and Gain Scheduling Design**, 1st ed.,, Ed. London, In
- BONELLI, Arthur Fernando. **Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica.** 2010. 84 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Engenharia Elétrica Programa de Pós-graduação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Cap. 5.
- CALDERARO, V.; GALDI, V.; PICCOLO, A.; SIANO, P., "**Design and implementation of a fuzzy controller for wind generators performance optimisation,**" **Power Electronics and Applications**, 2007 European Conference on , vol., no., pp.1,10, 2-5 Set. 2007.
- COELHO, L. D. ; ALMEIDA, O. M.; COELHO, A. A. R. **Projeto e Estudo de Caso da Implementação de um Sistema de Controle Nebuloso.** SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, Natal, v. 14, n. 1, p. 20-29, 2003.
- JESUS, Élvio Gilberto Andrade de. **Simulação de um sistema aerogerador com controlo óptimo predictivo.** 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Telecomunicações e Redes, Universidade da Madeira, Portugal, 2012. Cap. 7.

- KADRI, M.B.; KHAN, S., "Fuzzy adaptive pitch controller of a wind turbine," *Multitopic Conference (INMIC), 2012 15th International* , vol., no., pp.105,110, 13-15 Dez. 2012.
- KAWATO, M., UNO, Y., ISOBE, M., e SUZUKI, R., "Hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8(2), pp. 8-15, 1988
- LAYTON, Julia. **A moderna tecnologia de geração eólica. 2014.** Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>>. Acesso em: 19 jul. 2014.
- MACÊDO, Ana Vitória de Almeida. **Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina Eólica Utilizando Lógica Fuzzy.** 2012. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande,, Campina Grande – Paraíba, 2012. Cap. 6.
- MATHWORKS (Estados Unidos) (Ed.). **Fuzzy Logic Toolbox™: User's Guide.** Desconhecido: Mathworks, 2007. 333 p.
- MENG, Q.C.; Feng, T.J.; Chen, Z.; Zhou, C. J.; Bo, J. H., "Genetic algorithms encoding study and a sufficient convergence condition of GAs", *Systems, Man, and Cybernetics*, 1999. *IEEE International Conference on* , vol.1, no., pp.649,652 vol.1, 1999.
- MUYEEN, S.N., TAMURA, T., and MURATA, T. **Stability Argumentation of a Grid-connected Wind farm**, 1st ed., Ed. London, US: Springer, 2009.
- NUNES, Marcus Vinicius Alves. **Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas.** 2003. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Cap. 7.
- OLIVEIRA, Ives Soares de. **Controle Fuzzy PI de Temperatura num Modelo de Edificação em Escala Reduzida.** 2008. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Engenharia de Controle e Automação – CECAU, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, 2008. Cap. 6.
- PETERSSON, Andreas. **Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines.** 2005. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Degree Of Doctor Of Philosophy, Departamento de Department Of Energy And Environment, Chalmers University Of Technology, Goteborg, 2005. Cap. 9.', '186.249.121.95',

- PINTO, Vandilberto Pereira. **Controladores robustos LQG/LTR com ação integral aplicados ao controle de geradores eólicos interligados ao sistema de distribuição de energia elétrica baseados em máquina de indução duplamente alimentada.** 2012. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Cap. 7.
- SIMÕES, M.G. e SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy.** 2 ed. São Paulo: Blucher. 2007
- SUMATHI, S.; PANEERSELVAM, Surekha. **Computational intelligence and paradigms: theory & applications using MATLAB.** Boca Raton, Fl: Taylor And Francis Group, Llc, 2010. 821 p.
- TAN, W. W., "A self-learning fuzzy controller for embedded applications," *Automatica*, vol. 36, pp. 1189-1198, 2000.
- TSUCHIDA, Alexandre Luiz. **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. Cap. 7.
- ULLAH, Nayeem Rahmat. **Grid Reinforcing Wind Generation.** 2006. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Licentiate Of Engineering, Departamento de Department Of Energy And Environment, Chalmers University Of Technology, Goteborg, 2006. Cap. 10.
- VOLTOLINI, Hélio. **Modelagem e controle de geradores de indução duplamente alimentados com aplicação em sistemas eólicos.** 2007. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Cap. 10.
- YANJING, Meng; WENZHAN, Gong, "The Study of Strategy for Synchronous Wind Power Generation with Brushless Excitation System Pitch Control," *Intelligent Systems and Applications (ISA)*, 2011 3rd International Workshop on , vol., no., pp.1,4, 28-29 May 2011
- ZHANG, Jianzhong; CHENG, Ming; CHEN, Zhe; FU, Xiaofan, "Pitch angle control for variable speed wind turbines," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on , vol., no., pp.2691,2696, 6-9 April 2008.

## Publicações associadas à dissertação

<sup>4</sup>SENA, F. C. B et al. **Fuzzy Pitch Controller Applied to PMSG Wind Turbine**. In: XXI Congresso da Associação Chilena de Controle Automático ACCA 2014, 21. 2014. **Anais** (Completo). Santiago do Chile: ACCA, 2014. V. 21, p. 87 - 92.

---

<sup>4</sup> Trabalho indicado para possível publicação nas Revistas IEEE Latin America Transaction (Lat Am Trans IEEE) ou Iberoamericana de Automática e Informática Industrial (RIAI)