

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos

Dissertação de Mestrado

**Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina  
Eólica Utilizando Lógica *Fuzzy***

Ana Vitória de Almeida Macêdo

Campina Grande – Paraíba – Brasil  
Junho de 2012

Ana Vitória de Almeida Macêdo

# **Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina Eólica Utilizando Lógica *Fuzzy***

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Sistemas Elétricos

Wellington Santos Mota, Ph.D.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Junho de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M151c Macêdo, Ana Vitória de Almeida.  
Controle do Ângulo de Passo de uma Turbina Eólica Utilizando Lógica *Fuzzy* / Ana Vitória de Almeida Macêdo. – Campina Grande, 2012.  
61 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.  
Orientador: Ph.D. Wellington Santos Mota.  
Referências.

1. Lógica *Fuzzy*. 2. Controle do Ângulo de Passo. 3. Controle Proporcional-Integral. 4. Turbinas Eólicas. I. Título.

CDU 621.316 (043)

CONTROLE DO ÂNGULO DE PASSO DE UMA TURBINA EÓLICA  
UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY*

ANA VITÓRIA DE ALMEIDA MACÊDO

Dissertação Aprovada em 28.06.2012



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG  
Orientador



BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG  
Componente da Banca



LUCIANO SALES BARROS, D.Sc., UFRN  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
JUNHO -2012

Esta dissertação é dedicada aos meus pais, Antonia e José Cláudio, às minhas irmãs, Ana Valquíria e Ana Virgínia e ao meu futuro esposo Daniel.

## **Agradecimentos**

Ao professor Wellington Santos Mota pela amizade, disponibilidade e incentivo à realização desta dissertação.

Aos meus pais Antonia e José Cláudio pela incansável dedicação e amor às suas três filhas.

As minhas irmãs Ana Virgínia e Ana Valquíria pela união, paciência e amor a mim dedicados. Assim como meus pais, vocês são parte de tudo que sou de melhor.

Ao meu sobrinho que antes mesmo de nascer já me traz tantas alegrias.

A minha família pelo carinho e apoio.

As amigas Karine e Kássya pela amizade sincera e pelo amor incomensurável.

Ao meu namorado Daniel que mesmo estando longe, soube se fazer presente em cada preocupação e avanço desta dissertação. Tendo sempre a confiança em mim e naquilo que nos une: o amor.

Aos amigos Diego Buriti, Alana, Wellinsílvio, Felipe, Francisco, Ferdinando e os demais que partilham do GSE/LARCA, pelo companheirismo e disponibilidade.

Aos funcionários da UFCG, em especial aos da COPELE e CEEI pela presteza e carinho dedicados aos alunos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente participaram deste trabalho e a Deus que me concedeu oportunidades e que esteve ao meu lado em todos os momentos, me fazendo sentir seu apoio em tudo que precisei.

## Sumário

Lista de Figuras .....	v
Lista de Tabelas .....	vi
Resumo.....	vii
Abstract .....	viii
Capítulo 1	
1. Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Contribuições.....	3
1.4 Metodologia.....	3
1.5 Organização do Trabalho.....	4
Capítulo 2	
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Turbinas eólicas .....	5
2.2 Controle do ângulo de passo.....	6
2.3 Lógica <i>fuzzy</i> .....	7
2.4 Síntese bibliográfica .....	8
Capítulo 3	
3. Fundamentação teórica .....	9
3.1 Equações do modelo aerodinâmico da turbina eólica.....	9
3.2 Controle de Velocidade .....	15
3.3 Controle de Potência.....	15
3.3.1 Controle do ângulo das pás da turbina.....	18
Capítulo 4	
4. Lógica <i>Fuzzy</i> .....	22
4.1 Conjuntos <i>fuzzy</i> e funções de pertinência .....	22
4.2 Operações entre conjuntos <i>fuzzy</i> .....	25
4.3 Sistemas <i>Fuzzy</i> .....	25
Capítulo 5	
5. Método Proposto e Construção do Sistema <i>Fuzzy</i> .....	29
5.1 Escolha dos conjuntos <i>fuzzy</i> .....	30
5.2 Escolha das regras.....	32
5.3 Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação .....	33
Capítulo 6	
6. Avaliação do Método e Resultados.....	35
6.1 Sistema Teste.....	35
6.2 Simulações e Resultados.....	36
Conclusões .....	42

Referências Bibliográficas .....	44
APÊNDICE A – Desenvolvimento do projeto do controlador <i>fuzzy</i> através do programa MATLAB®	50
ANEXO A – Dados do sistema teste .....	60

## Lista de Figuras

Figura 3.1 – Princípio geral de funcionamento de uma turbina eólica .....	9
Figura 3.2 – Curvas do coeficiente de potência em função da relação de velocidade para turbinas eólicas com os coeficientes apresentados na Tabela 3.1 .....	11
Figura 3.3 – Regiões de operação de uma turbina eólica .....	12
Figura 3.4 – Coeficiente de potência para diferentes configurações de turbinas .....	13
Figura 3.5 – Efeito da mudança da quantidade de pás da turbinas .....	13
Figura 3.6 – Movimentação da pá de acordo com cada tipo de controle .....	16
Figura 3.7 – Excursão do ângulo no controle de <i>pitch</i> e no estol ativo .....	17
Figura 3.8 – Modelo genérico do controle do ângulo das pás .....	19
Figura 4.1 – Exemplo de variável linguística e funções de pertinência .....	24
Figura 4.2 – Estrutura básica de um sistema <i>fuzzy</i> .....	26
Figura 4.3 – Exemplo do método de defuzzificação C-o-A .....	28
Figura 5.1 – Diagrama de blocos para o controle do ângulo de passo com o controle PI .....	29
Figura 5.2 – Diagrama de blocos para o controle do ângulo de passo com o controle <i>fuzzy</i> .....	29
Figura 5.3 – Função de pertinência da entrada do controlador: erro de potência .....	31
Figura 5.4 – Função de pertinência da saída do controlador .....	32
Figura 5.5 – Exemplo gráfico das regras e método de inferência e defuzzificação .....	34
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico .....	35
Figura 6.2 – Variação na velocidade do vento .....	36
Figura 6.3 – Variação do ângulo de passo .....	37
Figura 6.4 – Variação do torque mecânico .....	37
Figura 6.5 – Variação da velocidade angular .....	38
Figura 6.6 – Variação da corrente do estator .....	38
Figura 6.7 – Variação do escorregamento .....	39
Figura 6.8 – Variação do módulo da tensão terminal (estator) .....	39
Figura 6.9 – Variação da potência ativa gerada .....	40
Figura 6.10 – Variação da potência reativa gerada .....	40
Figura 6.11 – Variação da potência mecânica .....	41

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Coeficientes das equações das curvas de potência .....	11
Tabela 3.2 – Resumo dos conceitos de turbinas eólicas .....	14
Tabela 5.1 – Base de regras para a variação do ângulo .....	32

## Resumo

Neste trabalho é apresentado o controle do ângulo de passo de uma turbina eólica utilizando um controlador *Fuzzy*. Tal controlador é implementado no *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>* disponível no MATLAB<sup>®</sup>. O controlador foi construído com base nos conhecimentos dos princípios de funcionamento de turbinas eólicas equipadas com controle de ângulo de passo variável. Não necessitando de modelos matemáticos para isso. Apresenta-se como uma alternativa aos controladores do tipo Proporcional-Integral (PI) utilizados atualmente. Além disso, o controle tem o objetivo de diminuir as oscilações na potência gerada pela turbina. O controle foi integrado ao Programa de Simulação Dinâmica desenvolvido pelo INESC, que utiliza controladores PI. São realizadas simulações de variação da velocidade do vento incidente em um parque eólico equipado com geradores assíncronos de gaiola de esquilo. Tais simulações comprovam a eficiência do controle do ângulo de passo utilizando Lógica *Fuzzy*.

Palavras-chave: Lógica *Fuzzy*; controle do ângulo de passo; controle proporcional-integral; turbinas eólicas.

## **Abstract**

In this work, wind turbine pitch angle control using a Fuzzy controller is presented. This controller is implemented in Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup> available in MATLAB<sup>®</sup>. The controller was built based on knowledge on operation principles of wind turbines equipped with variable pitch angle control. Not requiring mathematical models for this. It is presented as an alternative for Proportional-Integral (PI) controllers currently used. Furthermore, the control aims to reduce the fluctuations in turbine power generation. The control was integrated with the Dynamic Simulation Program developed by INESC, which uses PI controllers. Simulations are performed varying the incident wind speed on a wind farm equipped with squirrel cage asynchronous generators. These simulations prove the efficiency of the pitch control using Fuzzy Logic.

Keywords: Fuzzy Logic; pitch angle control; proportional-integral control; wind turbines.

# Capítulo 1

## 1. Introdução

Como resultado do crescente interesse em fontes alternativas de geração de energia em contraponto às fontes convencionais de geração, a energia eólica vem tomando espaço na matriz energética nacional. Segundo o Banco de Informação de Geração (BIG), nos últimos nove anos, a capacidade de geração do país aumentou de 22 MW para cerca de 1.500 MW em 2012. Este crescimento deve-se à implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). Um dos resultados esperados deste programa é a absorção de novas tecnologias pela indústria brasileira, além da criação de empregos, redução da emissão de CO<sub>2</sub>, além de outros benefícios.

A energia provinda dos ventos é captada por turbinas eólicas que, nos últimos anos, passaram da classe de geração de alguns kW para MW, devido à constante evolução das tecnologias aplicadas à sua construção. Para tanto há turbinas de velocidade fixa e variável. Atualmente as de velocidade variável são as mais utilizadas por otimizarem a captação e conseqüentemente a geração de energia numa ampla faixa de variação da velocidade do vento, que tem característica estocástica.

Em caso de ventos fortes é necessário desperdiçar o excesso deste para que sejam evitados danos que comprometam a integridade física do sistema mecânico de conversão. Todas as turbinas são, portanto, projetadas com algum tipo de controle sobre a potência a ser gerada. Há dois tipos de controle, são eles: controle por *estol* e controle de *pitch*, os quais controlam a movimentação em torno do eixo longitudinal das pás da turbina.

O controle por estol pode atuar de duas formas: ativo ou passivo. No controle por estol passivo, as pás têm um ângulo de passo pré-definido e são fixas. No estol ativo as pás se movimentam longitudinalmente seguindo ângulos de passo pré-determinados, até chegar ao ângulo onde passa a atuar como estol passivo. Em ambos os casos cria-se um efeito acentuado de estol em torno da potência nominal da turbina.

O controle de *pitch* tem a característica de movimentar continuamente as pás buscando o melhor desempenho. O ângulo varia de acordo com a variação da velocidade do vento, não tendo regiões de estol. Este controle proporciona uma boa execução do controle de potência.

## 1.1 Motivação

Em turbinas em que o controle de potência é feito por variação do ângulo de passo, há diversos sinais que podem ser utilizados para ativação do mecanismo. Um dos mais utilizados é a potência do gerador. Em que um controlador eletrônico verifica a potência mecânica gerada, diversas vezes por segundo. Quando a potência de saída se torna muito elevada é enviada uma ordem para o mecanismo de controle do ângulo das pás que as move alterando o ângulo de ataque da pá relativamente à direção do vento. Inversamente, as pás são movidas de volta à ação direta do vento sempre que há uma queda de produção. Para esta movimentação, recorre-se a sofisticados mecanismos hidráulicos e eletrônicos que movimentam as pás ao redor de seus eixos longitudinais.

Muljadi e Butterfield (2001) analisaram a limitação de potência através do controle do ângulo de passo para turbinas eólicas de velocidade variável, e concluíram que este arranjo possibilita a operação segura para velocidades do vento acima do limite técnico do sistema de conversão.

No controle do ângulo de passo que é adotado pelos modelos de turbinas descritos na literatura, o controlador Proporcional-Integral (PI) é geralmente o mais utilizado. O bom desempenho da máquina depende da escolha apropriada dos valores de ganhos deste controlador. Esta escolha não é uma atividade trivial e alguns autores relatam que sua obtenção é feita por tentativa e erro.

Para tanto, buscou-se uma alternativa que fosse independente do modelo matemático da turbina. O controle *fuzzy* foi escolhido devido à sua utilidade quando a dinâmica do sistema não é bem conhecida ou, quando há não linearidades significantes, como no caso do vento que tem a não linearidade como sua principal característica. Este controle pode contribuir para a suavização da potência de saída da turbina e na diminuição da carga aerodinâmica (Zhang, 2008). Além disso, o controle *fuzzy* é facilmente extensível e flexível.

## 1.2 Objetivos

Constam como principais objetivos desta dissertação:

- Avaliar o estado da arte sobre as turbinas eólicas e os métodos de controle da potência a ser gerada por ela;
- Implementar o controle do ângulo de passo baseado em Lógica *Fuzzy* como alternativa ao controle PI utilizado atualmente;

- Construir uma estrutura que possa ser aplicada a qualquer turbina que utilize ângulo de passo variável para o controle da potência gerada;
- Avaliar a influência da quantidade de regras utilizadas no controle *fuzzy* na potência gerada.
- Com o controle proposto obter melhora na extração de potência do vento, visando, principalmente, a suavização das oscilações.

### 1.3 Contribuições

Constam como principais contribuições desta dissertação:

- Utilizar o conceito de Lógica *Fuzzy* no melhoramento da solução de problemas associados ao controle de turbinas eólicas;
- Avaliar uma alternativa aos controladores já consolidados na literatura, como é o caso do Proporcional-Integral, utilizando controladores *Fuzzy*, buscando flexibilidade e extensibilidade, que são suas principais características;
- Com a implementação do controle proposto, verificar a suavização dos sinais associados à turbina eólica, em comparação com os sinais obtidos com o controle PI.

### 1.4 Metodologia

Para realizar as simulações com o controle proposto foi utilizado o programa de Simulação Dinâmica de Sistemas de Potência desenvolvido pelo INESC Porto (Lopes e Almeida, 2004b), como ferramenta para simulações de estabilidade transitória. Tal programa foi desenvolvido no MATLAB<sup>®</sup>. Alternativamente ao bloco PI utilizado no controle do ângulo de passo, foi implementado o controle *fuzzy*.

Foi feita uma revisão bibliográfica sobre o controle do ângulo de passo utilizado e constatou-se que as malhas PI são as mais utilizadas, porém de difícil implementação e modificação. O controle proposto tem construção bem mais simples, é flexível e facilmente extensível.

O controle *fuzzy* foi desenvolvido utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox*<sup>™</sup> disponível no MATLAB<sup>®</sup>, o controle foi incorporado ao Programa de Simulação Dinâmica para os devidos ajustes e simulações em um sistema de potência. A construção de um sistema *fuzzy* utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox*<sup>™</sup> passou pelas seguintes etapas:

- Definição das variáveis linguísticas;

- Definição das funções de pertinência;
- Definição das regras;
- Conversão das variáveis linguísticas de saída das regras em valores numéricos.

O ajuste das regras e variáveis foi feito de acordo com os resultados das simulações, pois os valores iniciais são estimados de acordo com algumas características da turbina, como a potência gerada.

Para que o comportamento do sistema fosse mais bem observado optou-se por utilizar o gerador convencional (Gaiola de esquilo) nas simulações, pois este dispõe de poucos controles, não havendo assim, influência no controle proposto.

## 1.5 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os temas relacionados à dissertação.

No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica referente às turbinas eólicas definindo as equações do modelo aerodinâmico e como a energia eólica é convertida em energia elétrica. São apresentadas as diferentes regiões de operação da turbina e como é feita a escolha adequada da quantidade de pás. Neste capítulo também são apresentados os métodos de controle de potência por estol ou *pitch* (objeto de estudo deste trabalho).

No Capítulo 4 é feita uma abordagem teórica sobre a Lógica *Fuzzy*, como funciona e qual a estrutura básica de um sistema *fuzzy*.

No Capítulo 5 é apresentado o método proposto e a construção do sistema *fuzzy* a ser utilizado nas simulações é feita passo a passo.

No Capítulo 6 é feita a avaliação do sistema implementado no capítulo 5. O controle *fuzzy* é então comparado ao controle PI através de simulações de variação na velocidade do vento incidente em um parque eólico.

Por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

A expansão da geração eólica tem motivado a realização de estudos em diversos aspectos, desde os relacionados à interligação dos parques eólicos aos sistemas elétricos já existentes, passando pela escolha do melhor tipo de aerogerador a ser utilizado, assim como os diversos tipos de controladores encontrados em uma turbina eólica. Assim destacam-se os trabalhos citados a seguir e suas principais contribuições ao tema desta dissertação.

#### 2.1 Turbinas eólicas

Alguns modelos computacionais de turbinas eólicas foram propostos a partir do ano 1983. Tais modelos, para estudos dinâmicos, incluíam o controle simplificado do ângulo das pás. Uma das propostas considerava turbinas eólicas com duas pás, sendo que o controle de ângulo de passo as rotacionava apenas parcialmente.

As turbinas eólicas eram representadas, basicamente, por uma equação utilizando o coeficiente de potência. Modelos mais complexos utilizam o *Blade Element Momentum* (BEM), que consiste na representação individual de diferentes seções ao longo das pás. Porém, um estudo apresentado na tese de doutorado defendida por Akhmatov (2003), constatou que a representação por curvas de coeficiente de potência ( $C_p$ ) é suficientemente precisa para estudos de estabilidade transitória. A precisão das curvas  $C_p$  resultantes dos valores propostos por Akhmatov (2003) foi comprovada com dados reais de operação de uma fazenda eólica. Vale ressaltar que esses modelos são genéricos, pois cada fabricante mantém em segredo o conjunto de curvas  $C_p$  que determinaram experimentalmente.

Quanto ao tipo de turbina eólica, Zinger e Muljadi (1997) afirmam que a produção de energia pode ser aumentada em até 40%, com o uso de turbinas de velocidade variável, devido à possibilidade de controle da potência captada. Akhmatov e Nielsen (1999) concluíram que turbinas de velocidade fixa transmitem fortes variações de potência à rede, quando da ocorrência de variações rápidas da velocidade do vento.

A turbina de velocidade fixa opera a velocidade constante se usada em conjunto com geradores síncronos e praticamente constante se usada em conjunto com geradores gaiola de

esquilo. A conexão à rede é feita diretamente, ou seja, sem a presença de conversores (Slootweg *et al.* 2001c).

Nunes *et al.* (2003) realizaram um estudo sobre a integração à rede elétrica, de sistemas eólicos de velocidade variável com GIDA (Gerador de Indução Duplamente Alimentado), comparando-os com sistemas de velocidade fixa com gerador de indução em gaiola. As margens de estabilidade transitória foram comparadas para redes “fortes” e “fracas”, indicando que no GIDA há a melhora da estabilidade pós falta de curta duração dos demais geradores síncronos da rede.

Martins *et al.* (2004) e Mota e Barros (2005a) analisaram o desempenho de sistemas com turbinas eólicas, no que diz respeito à capacidade de restabelecimento dos níveis de tensão após a ocorrência de distúrbios na rede elétrica. Ambos concluem que turbinas equipadas com geradores GIDA têm a capacidade de participar do controle de tensão dos sistemas, devido à possibilidade de controle deste tipo de gerador.

Em relação à quantidade de pás que proporciona o melhor desempenho da turbina, Hau (2006) afirma que a melhor configuração seria com cinco pás. Porém o aumento no rendimento em relação às turbinas de três ou quatro pás não é significativo, concluindo que não é economicamente vantajoso utilizar turbinas com cinco pás.

## 2.2 Controle do ângulo de passo

Muljadi e Butterfield (2001) analisaram a limitação de potência através do controle do ângulo de passo (*pitch*) para turbinas eólicas de velocidade variável, e concluíram que este arranjo possibilita a operação segura para velocidades do vento acima do limite técnico do sistema de conversão.

Burton (2001) afirma que o controle de potência por ângulo fixo/estol passivo é o modo mais simples de controlar a máxima potência a ser gerada pela turbina. Sua principal vantagem é a simplicidade, porém há desvantagens significantes como: alta fadiga mecânica causada por rajadas de vento, partida não assistida e variações na máxima potência devido a variações na densidade do ar. Algumas dessas deficiências podem ser resolvidas utilizando o controle ativo do ângulo de passo (*pitch*).

Akhmatov (2003) afirma que o controle do ângulo de passo é comumente utilizado na otimização da produção de potência provinda do vento. Ainda exemplifica os possíveis sinais de entrada do controlador do ângulo de passo. Quando a velocidade do rotor é utilizada como

sinal de entrada do controlador, é possível otimizar a potência de saída da turbina porque a potência do gerador e a velocidade são inequivocamente relacionadas uma à outra. Outra opção é utilizar sinais que provenham da rede fora do parque como a tensão no ponto de acoplamento.

Mota e Barros (2005b) analisaram a atuação do controle do ângulo de passo através de simulações dinâmicas. Para a turbina eólica modelada, o controle do ângulo possibilita a operação à potência nominal até velocidades do vento 20% acima da média esperada; a máxima produção de potência ocorre para velocidades do vento até 13% abaixo da média. O trabalho conclui que estes limites dependem dos parâmetros de projeto da turbina e que valores diferentes podem ocorrer para turbinas reais.

### 2.3 Lógica *Fuzzy*

Zadeh (1965) propôs, em seu trabalho pioneiro na área, que ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas diferenciais, através de um modelo matemático, no controle *fuzzy* utilizam-se regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo.

Segundo Cox (1994) o modelo PID pode parecer mais simples e às vezes mais barato, mas não se pode assumir isto facilmente. Na verdade os controladores *fuzzy* são frequentemente mais fáceis de prototipar e implementar, geralmente tem um desempenho igual ao PID. Porém são simples de descrever e verificar, podendo ser mantidos e estendidos com um alto grau de precisão em pouco tempo. Devido a sua dependência de regras e conhecimentos, dá ao ambiente o que Lotfi Zadeh chama de alto quociente de inteligência da máquina.

Almeida *et al.* (2004) propuseram o uso de malhas com controle *fuzzy* em substituição às malhas PI para o controle desacoplado da potência e da tensão, visando contornar o problema de retirada de operação dos conversores de potência da turbina. O controlador *fuzzy* melhorou o comportamento dinâmico do sistema.

Simões e Shaw (2007) afirmam que aplicações de energia elétrica derivadas de fontes renováveis requerem sistemas capazes de compensar a dinâmica de carga e demanda com energia de entrada restrita. Uma vez que energia é a integral da potência, a qual é a multiplicação de duas variáveis (por exemplo, torque e velocidade angular ou tensão e corrente), as quais também dependem de características ambientais (tais como intensidade de

iluminação solar, densidade do ar ou da água etc.). Assim sendo, a otimização de sistemas renováveis de energia depende de uma função não linear que pode ser mais bem modelada através da utilização do controle *fuzzy*.

## 2.4 Síntese bibliográfica

O controle do ângulo das pás da turbina é necessário para que haja o aproveitamento máximo da energia provinda do vento. De acordo com os modelos existentes na literatura este controle é feito com controladores do tipo PI, os quais necessitam da descrição analítica do sistema através de equações algébricas diferenciais. O método proposto se diferencia por não necessitar de tal descrição. Utilizam-se regras lógicas (lógica *fuzzy*) para obtenção do algoritmo de controle e uma resposta mais adequada em relação à não linearidade do vento.

## Capítulo 3

### 3. Fundamentação teórica

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica envolve dois processos de conversão de energia que, de forma geral, são executados: pelo rotor, que extrai energia cinética do vento e, posteriormente, pelo gerador que converte esta energia em eletricidade alimentando o sistema elétrico. O princípio geral de funcionamento está representado na Fig. 3.1, a seguir. Embora pareça bastante simples, uma turbina eólica é um sistema complexo, no qual conhecimentos nas áreas como aerodinâmica, mecânica, eletromagnetismo e engenharia de controle são necessários.

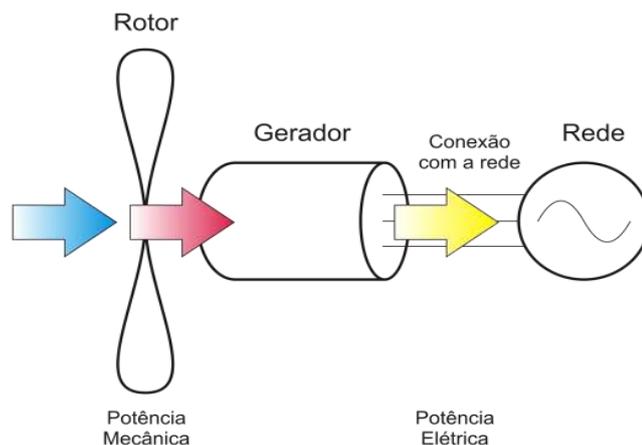


Figura 3.1 – Princípio geral de funcionamento de uma turbina eólica

Fonte: Slootweg e Kling, 2003b, p. 29 (Adaptação)

#### 3.1 Equações do modelo aerodinâmico da turbina eólica

As equações do modelo aerodinâmico permitem calcular o valor do conjugado mecânico (ou da potência mecânica) aplicado ao eixo do gerador elétrico, considerando diferentes velocidades do vento e diferentes posições do ângulo de passo das pás. Este modelo depende do tipo de turbina eólica a ser representado (eixo vertical ou horizontal, quantidade de pás, controle de ângulo das pás etc.). O modelo aerodinâmico independe do tipo de gerador elétrico escolhido ou do tipo de controle utilizado nos conversores. Desta forma, ele pode ser estudado utilizando diferentes tipos de geradores elétricos. O trabalho de Slootweg (2003) define a equação da potência mecânica (3.1), que pode ser extraída do vento:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (3.1)$$

Em que:

$P_m =$  potência mecânica ( $W$ ).

$\rho =$  densidade do ar ( $kg/m^3$ ).

$A_r =$  área varrida pelas pás da turbina ( $m^2$ ).

$C_p =$  coeficiente de potência.

$\beta =$  ângulo de passo das pás da turbina ( $grau$ ).

$v_w =$  velocidade do vento ( $m/s$ ).

$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w}$  relação de velocidade.

$\omega_m =$  velocidade angular do rotor ( $\frac{rad}{s}$ ).

$R =$  raio do rotor eólico medido da ponta da pá ( $m$ ).

O coeficiente de potência,  $C_p$ , depende do ângulo de passo das pás,  $\beta$ , e da relação linear entre a velocidade do vento e a velocidade da ponta da pá,  $\lambda$ . Tal coeficiente indica a eficiência com que a turbina eólica transforma a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica. Segundo o limite de Betz para turbinas de eixo horizontal com três pás, o valor máximo possível é aproximadamente 0,593 (Akhmatov, 2003). A estrutura das Equações 3.2 e 3.3 a seguir, foi proposta por Heier (1998). Contudo, os valores das constantes  $c_1$  a  $c_9$  foram ligeiramente modificadas para se adequar à indústria.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7/\lambda_i} \quad (3.2)$$

Em que

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (3.3)$$

Na Tabela 3.1 a seguir temos os valores para os coeficientes propostos por Heier, e por Slootweg (para turbinas de velocidade constante e variável).

Tabela 3.1 – Coeficientes das equações das curvas de potência

<b>Autor</b>	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$
<b>Heier</b>	0.5	116	0.4	0	0	5	21	0.08	0.035
<b>Velocidade constante (Slootweg)</b>	0.44	125	0	0	0	6.94	16.5	0	-0.002
<b>Velocidade variável (Slootweg)</b>	0.73	151	0.58	0.002	2.14	13.2	18.4	0.02	-0.003

Fonte: Ackerman, 2005, p. 563

Idealmente a turbina eólica deve operar no  $C_p$  máximo na maior parte do tempo, dessa forma obtendo o melhor aproveitamento da potência disponível no vento. A seguir temos curvas geradas a partir das Equações 3.2 e 3.3 para diversos ângulos de passo para os três casos apresentados na Tabela 3.1.

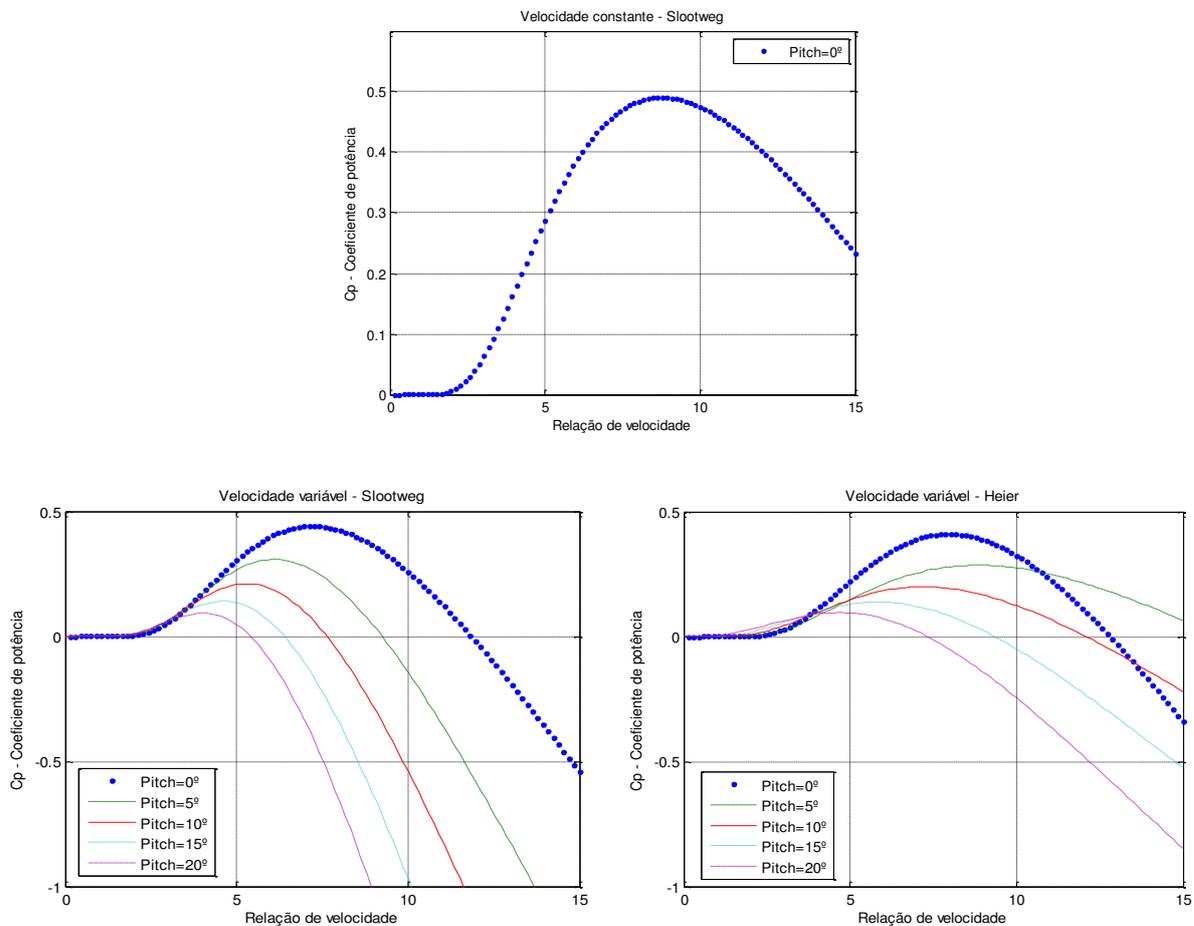


Figura 3.2 – Curvas do coeficiente de potência em função da relação de velocidade para turbinas eólicas com os coeficientes apresentados na Tabela 3.1

A característica apresentada na Fig. 3.2 indica que a potência desenvolvida por um rotor eólico é nula ( $C_p = 0$ ) em duas regiões distintas de valores da velocidade específica: quando o rotor está estacionário ( $\omega_m$  *baixo*) e quando o rotor está em velocidades muito elevadas, onde a velocidade na ponta da pá é várias vezes maior que a velocidade do vento incidente. Nas demais velocidades o  $C_p$  varia de acordo com a Equação 3.2. A máxima eficiência é obtida para um valor ótimo da velocidade específica, pois para apenas um único valor de  $\lambda$  teremos o  $C_p$  máximo. Apenas as turbinas de velocidade variável tem capacidade de manter o valor de  $\lambda$  constante.

De forma geral há duas diferentes regiões de operação de uma turbina eólica de velocidade variável, tais regiões estão apresentadas na Fig. 3.3 a seguir (Salles, 2009).

*Região I* – Esta região tem início quando a velocidade do vento,  $v_{cut-in}$ , é suficiente para dar início a geração de potência. Nesta região a potência produzida varia com o cubo da velocidade do vento e o ângulo de passo deve ser definido para o melhor aproveitamento de potência. A relação de velocidade,  $\lambda$ , é mantida em seu valor ótimo.

*Região II* – Nesta região o rotor permanece com velocidade fixa, variando-se o ângulo de passo para limitar a potência gerada. Mantêm-se a velocidade do gerador constante, através da tensão aplicada no rotor. A velocidade de corte,  $v_{cut-out}$ , é a máxima velocidade de vento com a qual a turbina pode operar. Acima dessa velocidade, a turbina deve sair de operação para que sejam evitados danos à turbina e ao sistema a qual está interligada.

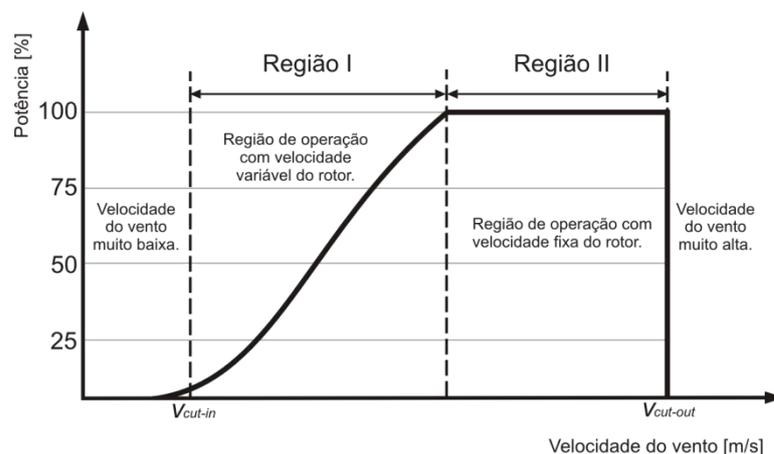


Figura 3.3 – Regiões de operação de uma turbina eólica

Fonte: Salles, 2009. (Adaptação)

Ao longo dos anos muitos foram os modelos de turbinas experimentados, principalmente no que diz respeito à quantidade de pás. Da Fig. 3.4, a seguir, são apresentados diversos modelos já fabricados, dentre estes destaca-se a turbina eólica de eixo horizontal com três pás, com um melhor desempenho com relação ao  $C_p$  máximo. Por este motivo, na atualidade, este tipo de turbina é o mais utilizado.

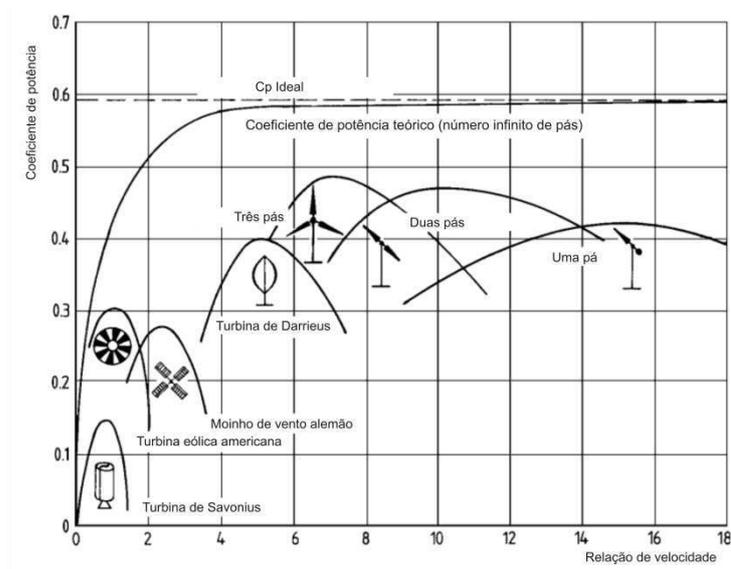


Figura 3.4 – Coeficiente de potência para diferentes configurações de turbinas

Fonte: Hau, 2005, p. 101. (Adaptação)

De acordo com Burton (2001), um dos aspectos que define a quantidade de pás a serem utilizadas em uma turbina eólica é a solidez, que é definida pela área total das pás dividida pela área varrida por estas. Na Fig. 3.5 estão apresentadas as curvas de coeficiente de potência para diversas configurações de quantidade de pás.

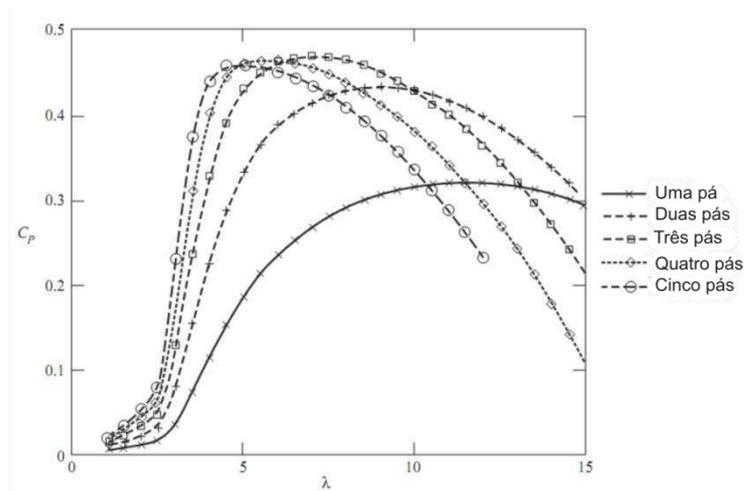


Figura 3.5 – Efeito da mudança da quantidade de pás da turbinas

Fonte: Burton, 2001, p. 175 (Adaptação)

Observando a Fig. 3.5 são verificados alguns aspectos:

- i. Baixa solidez produz uma ampla curva significando que o  $C_p$  mudará muito pouco em uma ampla faixa de relação de velocidade ( $\lambda$ ), mas o coeficiente de potência máximo é baixo porque as forças de arrasto são altas (as perdas de arrasto são aproximadamente proporcionais ao cubo de  $\lambda$ );
- ii. Elevada solidez produz uma curva de desempenho estreita, com um pico agudo, fazendo com que a turbina fique muito sensível a mudanças na relação de velocidade;
- iii. A solidez ótima parece ser alcançada com três pás, mas a configuração com duas pás pode ser uma alternativa aceitável porque, embora o máximo  $C_p$  seja um pouco menor, o pico da curva é mais largo o que pode resultar em uma maior faixa de captura de energia.

Teoricamente a melhor escolha seria um número elevado de pás com pequena solidez individual, porém esta configuração resultaria em pás estruturalmente fracas e muito flexíveis. A escolha das turbinas com três pás dá-se por aspectos econômicos, com um coeficiente de potência maior a captação de energia também cresce.

O desenvolvimento de vários conceitos de turbinas eólicas tem sido bastante dinâmico na última década. As principais diferenças nos conceitos são em relação ao projeto elétrico e controles. Assim, os sistemas de conversão de energia eólica podem ser classificados de acordo com o *controle de velocidade* e o *controle de potência*, levando à diferenciação das turbinas pelo sistema de geração (controle de velocidade) e pelo método aplicado para limitar a eficiência aerodinâmica (controle de potência).

O critério de controle de velocidade leva a dois tipos de sistema de conversão de energia: turbinas de velocidade fixa e de velocidade variável. Enquanto a capacidade de controle de potência divide-se em duas categorias: controle por estol aerodinâmico (passivo e ativo) e controle por *pitch*. De maneira simples este conceito se encontra na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Resumo dos conceitos de turbinas eólicas

Controle de velocidade		Controle de potência		
Fixa	Variável	Estol passivo	Estol ativo	<i>Pitch</i>

### 3.2 Controle de Velocidade

- **Velocidade fixa**

Turbinas de velocidade fixa foram pioneiras na indústria de turbinas eólicas. Elas são simples, confiáveis e suas partes elétricas têm baixo custo. São diretamente conectadas à rede, fazendo com que o rotor tenha velocidade quase constante, atrelada à frequência da rede, independente da velocidade do vento. Porém, este tipo de turbina transmite fortes variações de potência à rede, quando da ocorrência de variações rápidas da velocidade do vento (Akhmatov e Nielsen, 1999).

- **Velocidade variável**

Turbinas de velocidade variável são atualmente as mais utilizadas. Suas vantagens, comparadas às de velocidade fixa, são numerosas. Uma característica importante deste tipo de turbina é o desacoplamento entre o sistema de geração e a frequência da rede, tal característica permite que as turbinas sejam mais flexíveis em termos de controle e operação ótima. Para que isto seja possível é necessário o uso de conversores de eletrônica de potência, que fazem a interface entre o gerador elétrico e a rede. A alta controlabilidade oferecida pela operação em velocidade variável é uma poderosa vantagem para alcançar níveis mais altos de penetração da energia eólica nos sistemas existentes.

A operação com velocidade variável permite que a velocidade rotacional da turbina seja continuamente adaptada (acelerada ou desacelerada) de maneira que a turbina opera constantemente no seu nível máximo de eficiência aerodinâmica. Enquanto as turbinas de velocidade fixa são desenvolvidas para conseguir a máxima eficiência aerodinâmica em uma única velocidade do vento. Turbinas de velocidade variável conseguem esta máxima eficiência em uma vasta gama de velocidades do vento.

Além disso, a operação em velocidade variável permite o uso de avançados métodos de controle, com diferentes objetivos: redução de esforço mecânico, redução do barulho, aumento da potência capturada etc. (Ackerman, 2005).

### 3.3 Controle de Potência

A capacidade de controle de potência, assim como o controle de velocidade, se refere ao desempenho aerodinâmico da turbina eólica, especialmente na limitação da potência de

operação. Todas as turbinas têm algum tipo de controle de potência. Na Fig. 3.6, abaixo, estão apresentados os perfis das pás e como se movimentam de acordo com o método de controle da potência.

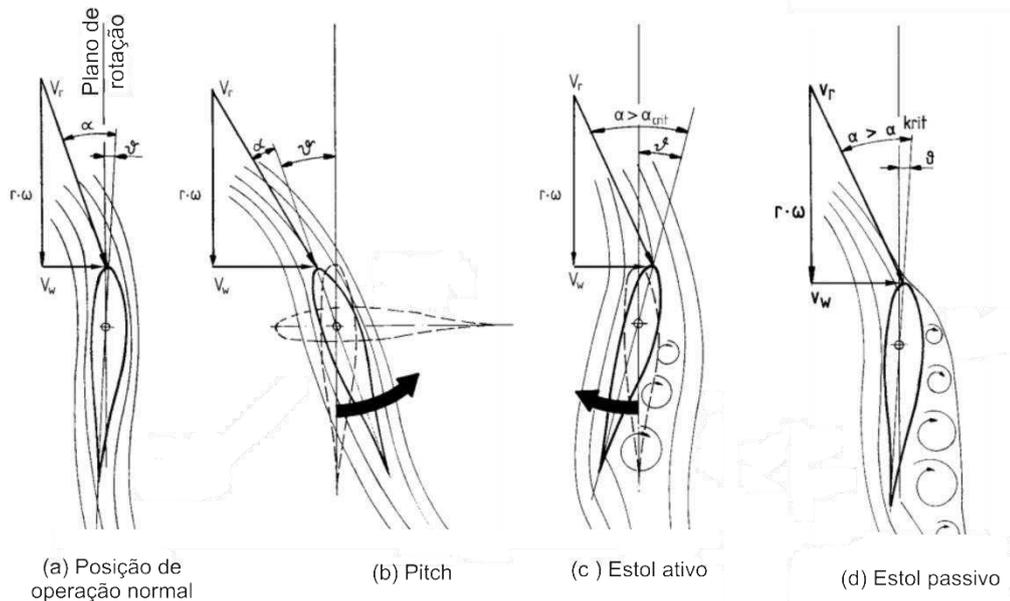


Figura 3.6 – Movimentação da pá de acordo com cada tipo de controle

Fonte: Hau, 2005, p. 103 (Adaptação)

- **Controle por estol passivo (ângulo fixo)**

A forma mais simples de controle de potência dá-se através da redução da eficiência aerodinâmica utilizando o efeito de estol em ventos de alta velocidade, sem mudança na geometria das pás da turbina, isto é, as pás são fixas de acordo com um  $\beta$  pré-definido.

De acordo com o crescimento da velocidade do vento, a aerodinâmica do rotor leva-o ao regime de estol “naturalmente”. Inicia-se quando o escoamento do vento, anteriormente laminar em torno do perfil (Fig. 3.6 a), passa a apresentar regiões de turbulência (Fig. 3.6 d). Como consequência, ocorre um aumento de pressão na face posterior da pá, resultando numa redução da potência produzida. O fator chave deste método é o projeto especial do perfil da pá, criando um efeito acentuado de estol em torno da potência nominal sem um comportamento dinâmico inesperado.

As desvantagens deste método de controle de potência são: alta fadiga mecânica causada por rajadas de vento, partida e parada não assistidas e variações na máxima potência devido a variações na densidade do ar.

- **Controle por estol ativo**

Em grandes turbinas, não é possível obter um desempenho satisfatório, cobrindo todas as condições de operação apenas utilizando o estol passivo (ângulo fixo). A operação com diferentes ângulos de passo é necessária. No controle por estol ativo o ângulo das pás varia negativamente até alcançar a posição de estol passivo, onde passa a atuar como tal (Fig. 3.6 c), também sendo conhecido como controle de *pitch* negativo.

A vantagem deste método é que para uma faixa de velocidades do vento, apenas pequenas excursões de ângulo são necessárias para o controle da potência. Porém em velocidades maiores, o controle encontra os mesmos problemas do estol passivo. Outra desvantagem é a dificuldade na previsão do comportamento aerodinâmico na posição de estol.

- **Controle de *pitch***

Algumas das deficiências do controle por estol podem ser resolvidas utilizando o controle de *pitch* (Fig. 3.6 b), onde o ângulo varia de acordo com a variação do vento, não tendo regiões de estol. As principais vantagens deste tipo de controle são a boa execução do controle de potência, partida assistida e auxílio na parada de emergência para redução de potência. Um  $\beta$  de  $90^\circ$  é comumente utilizado para auxiliar a parada da turbina, minimizando a velocidade do rotor quando o freio é aplicado.

Por outro lado, este controle adiciona custos e complexidade ao projeto devido ao mecanismo de passo e ao sistema de controle. Para um melhor entendimento de como o ângulo varia, na Fig. 3.7, a seguir, são apresentadas curvas genéricas de variação do ângulo de passo nos casos de controle por estol ativo e *pitch*.

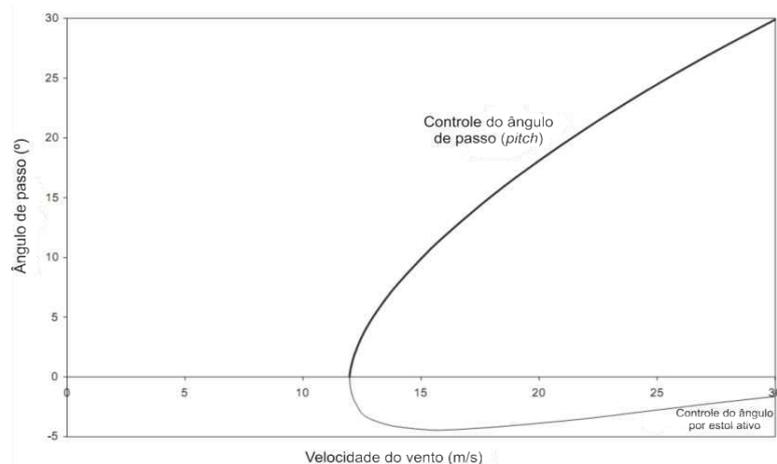


Figura 3.7 – Excursão do ângulo no controle de *pitch* e no estol ativo

Fonte: Burton, 2001, p. 356 (Adaptação)

Atualmente o controle de *pitch* é o mais utilizado pela indústria de turbinas eólicas. Devido à importância deste aspecto no crescente cenário de geração eólica, propõe-se nesta dissertação a obtenção do controlador *fuzzy*, em alternativa ao controle PI utilizado na maioria das turbinas.

### 3.3.1 Controle do ângulo das pás da turbina

De forma geral o melhor modo de extrair o máximo da potência do vento é através das turbinas de velocidade variável com controle do ângulo de passo. Os principais objetivos do controle do ângulo das pás da turbina são apresentados a seguir (Akhmatov, 2002a):

- Otimização da potência de saída das turbinas eólicas, isto é, produzir tanta potência quanto seja possível com o vento disponível.
- Prevenção para que a potência mecânica não exceda a potência nominal em ventos fortes (em velocidades de vento acima da nominal). Também funciona como proteção da estrutura da turbina contra sobrecargas e riscos de danos à sua estrutura física.

Em alguns países, a exemplo da Dinamarca, os códigos de rede exigem que os parques eólicos sejam capazes de reduzir a potência produzida ao nível abaixo de 20% em menos de 2s. Este procedimento é feito para controlar o suprimento de potência do parque eólico e prevenir uma possível sobregeração em situações com ventos fortes e baixo consumo. Isto pode ser conseguido utilizando o controle do ângulo das pás. Em ventos de velocidade alta, a velocidade do rotor deve ser controlada para evitar seu crescimento além do limite controlável (Muljadi e Butterfield, 2001).

O controle do ângulo das pás também pode ser utilizado para a estabilização dos parques eólicos quando ocorrem faltas na rede (para reduzir o desbalanço entre geração e carga). Portanto este princípio de controle deve ser levado em consideração em estudos de estabilidade transitória e representado em modelos dinâmicos de turbinas eólicas. Como já mencionado, o controle do ângulo das pás pode ser feito de duas formas (Akhmatov, 2003):

- Controle de passo (*pitch*): a potência mecânica é reduzida quando o ângulo de passo,  $\beta$ , cresce. Este princípio é aplicado, na maioria dos casos, em turbinas de velocidade variável. Turbinas de velocidade fixa podem também utilizar este controle;
- Controle por estol ativo: a potência mecânica é reduzida quando o ângulo de passo decresce. Este tipo de controle é comumente aplicado em turbinas de velocidade fixa.

Lembrando que a curva característica  $C_p(\lambda, \beta)$  fornece o coeficiente de potência, que depende da razão de velocidade da pá  $\lambda$  e do ângulo de passo  $\beta$ .

O mecanismo de controle do ângulo de passo pode ser ativado por componentes hidráulicos ou elétricos, o projeto dos controladores geralmente tem seu desenvolvimento mantido em segredo pelos fabricantes.

Este mecanismo sofre ação de forças dinâmicas, forças de atrito e momentos inerciais, constituindo um elemento de modelagem relativamente complexa. Geralmente é representado por uma equação dinâmica de primeira ordem com uma série de limitadores que restringem a faixa de excursão do ângulo de passo e sua taxa máxima de variação (Slootweg e Kling, 2001b; Akhmatov, 2003). Esta taxa de variação fica entre 3° e 10° por segundo (dependendo do tamanho da turbina), para condições de operação normal.

- **Modelo genérico do controlador**

Na Fig. 3.8 está representado o modelo genérico do controle do ângulo das pás.

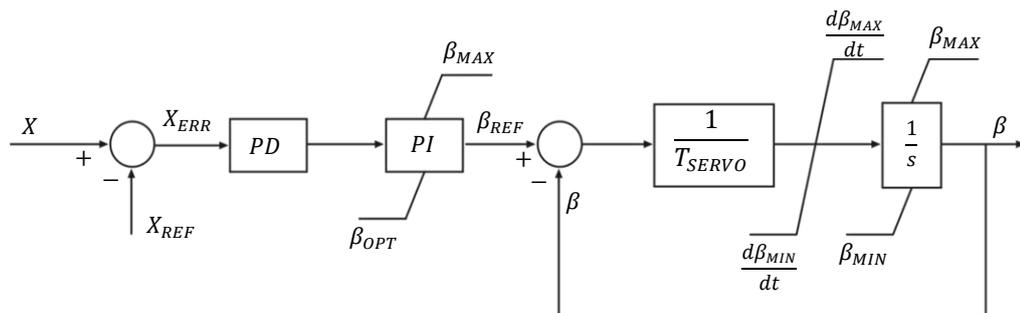


Figura 3.8 – Modelo genérico do controle do ângulo das pás

Fonte: Akhmatov, 2003, p. 47.

A posição do ângulo  $\beta$  é controlada pelo valor,  $X$ , que pode ser caracterizado de diversas formas, como:

- 1) Uma grandeza elétrica. Por exemplo, a potência elétrica,  $P_e$ , como descrito em (Akhmatov, 2001);
- 2) Uma grandeza mecânica. Por exemplo, a potência mecânica,  $P_m$ , ou a velocidade do gerador,  $\omega_G$ , como descrito em (Akhmatov 2002a; Akhmatov *et al.*, 2003; Lopes e Almeida, 2004a; Slootweg, 2003);
- 3) Uma combinação de valores elétricos e mecânicos, de acordo com (Akhmatov *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2003).

O valor de controle,  $X$ , é comparado ao valor de referência,  $X_{REF}$ . O sinal de erro,  $X_{ERR}$ , é então enviado ao controlador Proporcional-Diferencial (PD) que é opcional e aplicado para melhorar na estabilidade, e, então, enviado para o controlador Proporcional-Integral (PI) produzindo o valor de referência do ângulo de passo,  $\beta_{REF}$  (Akhmatov *et al.*, 2003).

O valor de referência,  $\beta_{REF}$ , atua em faixas diferentes dependendo do modo de controle:

- 1) Está entre o valor ótimo,  $\beta_{OPT}$ , e o valor máximo do ângulo de passo,  $\beta_{MAX} = 90^\circ$ , em caso de turbinas controladas por ângulo de passo.
- 2) Está entre o valor mínimo,  $\beta_{MIN}$ , e o valor ótimo,  $\beta_{OPT}$ , em caso de estol ativo.

Finalmente  $\beta_{REF}$  é comparado ao valor atual do ângulo de passo,  $\beta$ . O sinal de erro, isto é, a diferença entre o ângulo e sua referência é corrigida por servomecanismos já citados (hidráulico ou elétrico).  $T_{SERVO}$  é a constante de atraso e  $d\beta/dt$  é a taxa de variação do ângulo das pás.

Objetivando obter uma resposta realista dos sistemas de controle, alguns mecanismos de atrasos são implementados nos modelos dos controladores. Estes atrasos representam, basicamente, amostragem e filtros para amortecimento das frequências naturais da turbina eólica (Akhmatov, 2002a).

Idealmente, os parâmetros de controle deveriam ser escolhidos em função da velocidade do vento, mas este não é um procedimento adequado, pois não é possível medir tal variável precisamente. A velocidade do vento pode ser alterada pela nacele da turbina, por este motivo e também por redundância geralmente a turbina dispõe de dois anemômetros. Assumindo que o sistema da turbina é bem controlado, a potência ativa pode ser utilizada como parâmetro (Hansen, 2004).

Nesta dissertação é proposta a utilização do erro entre a potência mecânica de referência e a potência mecânica gerada pela turbina como sinal de entrada para o controle, utilizando um controlador *fuzzy* em substituição ao bloco do controlador PI que foi apresentado na Fig. 3.8. O bloco PD não é utilizado na versão original do controlador (controle PI), visto que este é opcional.

Em um sistema de controle, o sistema *fuzzy* geralmente opera em tempo real com o objetivo de encontrar os valores de desempenho ótimo (ou perto do ótimo). O uso das regras *fuzzy* assegura que o estado de operação do dispositivo permaneça dentro da faixa de operação desejada (Cox, 1994).

## Capítulo 4

### 4. Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* tem por essência gerar valores de saída sem a necessidade de entradas precisas. Fornece um método de traduzir expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos (Simões e Shaw, 2007). Tem como principal vantagem não necessitar de uma descrição analítica do sistema a ser controlado.

A teoria de conjuntos *fuzzy* foi apresentada em 1965 por Lotfi A. Zadeh, professor no departamento de engenharia elétrica e ciências da computação da Universidade da Califórnia, em Berkeley, quando ele trabalhava com problemas de classificações de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas (ou seja, a transição entre os conjuntos é suave e não abrupta). O termo *fuzzy* significa nebuloso, difuso, e se refere ao fato de, em muitos casos, não conhecermos completamente os sistemas que estamos analisando.

Os controladores *fuzzy* têm despertado interesse cada vez maior nos últimos anos. A aplicação em escala mais ampla teve início no Japão em meados da década de 80. Podem ser citados alguns produtos que usam a lógica *fuzzy*: lavadoras de prato, aspiradores de pó, câmeras de vídeo, máquinas de lavar roupa, controle de velocidade de trens de metrô, ar condicionado, modelos para previsão meteorológica, etc.

#### 4.1 Conjuntos *fuzzy* e funções de pertinência

Os conjuntos *fuzzy* são conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas e que foram definidos devido ao fato de os conjuntos clássicos apresentarem limitações para lidar com problemas onde as transições de uma classe para outra acontecem de forma suave.

Sua definição, propriedades e operações são obtidas da generalização da teoria de conjuntos clássica, recaindo esta em um caso particular da teoria de conjuntos *fuzzy*. A teoria de conjuntos clássica está baseada na função característica clássica, dada por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (4.1)$$

A *pertinência* de um elemento  $x$  em um conjunto  $A$  é dada por  $x \in A$ . A função apresentada em (4.1) é chamada de *função de pertinência*, cujo valor indica se o elemento  $x$  pertence ou não ao conjunto  $A$  (Ortega, 2001).

Em se tratando de lógica *fuzzy*, um elemento pode ser parcialmente membro de um conjunto, indicado por um valor dentro de um intervalo numérico. O “quanto” que um dado elemento  $x$  pertence a um conjunto  $A$  é chamado de *grau de pertinência*, sendo representado pela sua respectiva função de pertinência.

A função de pertinência tem todos os valores dentro do intervalo  $[0,1]$ , esta é a principal propriedade da lógica *fuzzy*. Portanto, quanto mais próximo seja  $\mu_A(x)$  de 1, mais  $x$  pertencerá a  $A$ . Considerando  $A$  um subconjunto de  $U$  (conjunto universo),  $A$  é caracterizado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\} \quad (4.2)$$

A função de pertinência fornece o grau de relacionamento do elemento, e não apenas a relação *pertence e não pertence*. O elemento  $x$  pertencerá ao subconjunto  $A$  com um grau de pertinência que é um valor no intervalo  $[0,1]$ .

Também conhecidas como *função de relacionamento*, as funções de pertinência podem ser caracterizadas de várias formas como: linear por partes (trapezoidal ou triangular), quadrática, gaussiana etc.

Nos problemas de engenharia a representação convencional é a trapezoidal e a triangular. A trapezoidal geralmente mapeia as funções de pertinência nos extremos, enquanto as triangulares mapeiam as outras variáveis em pequenas, mas bem definidas regiões. A ideia é capturar a natureza linguística de cada sub-região, quando nos movimentamos da esquerda para a direita através do domínio, a compatibilidade com a região *fuzzy* aumenta até alcançar a unidade; após isto começa a decair até o zero. Todo conjunto *fuzzy* tem que ser normal, isto é, pelo menos uma função de pertinência com valor um e pelo menos uma com valor zero (Cox, 1994).

As funções lineares por partes são as mais utilizadas devido a sua simplicidade e ao fato de que o custo computacional adicional exigido pelos outros tipos de funções não refletem, em geral, em uma melhoria significativa na qualidade dos valores de saída dos sistemas (Ortega, 2001). Na Fig. 4.1 a seguir, é apresentado um exemplo de funções de pertinência onde foram utilizadas as formas triangular e trapezoidal.

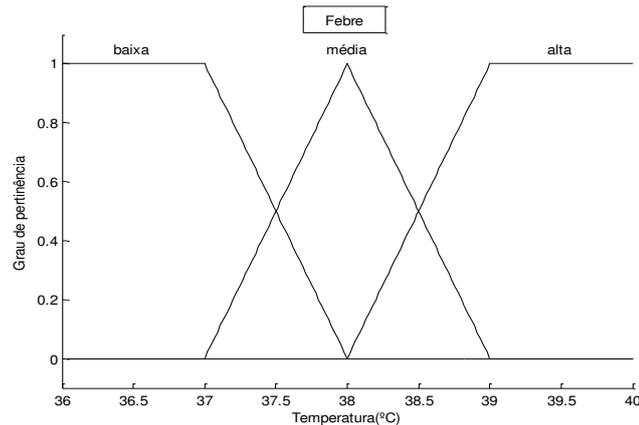


Figura 4.1 – Exemplo de variável linguística e funções de pertinência

Representando cada uma das funções de pertinência temos as *variáveis linguísticas*, em que cada termo tem a ele associado um conjunto *fuzzy* que o caracteriza. Por exemplo, a temperatura do corpo de uma pessoa que está com febre pode ser uma variável linguística com valores: baixa, média e alta. Note que, na formulação clássica, os termos linguísticos atribuídos para *Febre* são: *presente* e *ausente*.

Os termos linguísticos são usados para expressar conceitos e conhecimentos na comunicação humana, e em muitas áreas eles são a forma mais importante (quando não a única) de quantificar os dados ou informações. Eles fornecem uma maneira sistemática para caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos (Almeida, 2009).

Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência, e o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro de um conjunto *fuzzy*. As funções de pertinência podem ser obtidas das seguintes formas (Ross, 2010):

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

Nesta dissertação, os métodos utilizados foram a intuição e a inferência, onde a análise do problema foi feita a partir do conhecimento prévio de como o controle de *pitch* atua.

## 4.2 Operações entre conjuntos fuzzy

Assim como em um conjunto tradicional, um conjunto *fuzzy* é completamente caracterizado por seu *vetor de pertinência* (vetor que contém os graus de pertinência), exceto que os graus de pertinência individualmente são multivalentes dentro do intervalo numérico  $[0,1]$ . Os graus de pertinência podem ser considerados como medidas que expressam a possibilidade de um dado elemento ser membro de um conjunto *fuzzy*. Assim, um vetor de pertinência também pode ser chamado por *vetor de possibilidade* ou de *distribuição de possibilidade* (Simões e Shaw, 2007).

- **União entre conjuntos fuzzy**

Seja  $E$  o universo de discurso,  $x \in E$ ,  $M = [0,1]$  e os conjuntos *fuzzy*  $A \subset E$ ,  $B \subset E$ . A união  $A \cup B$  é o menor subconjunto do universo de discurso  $E$ , que inclui ambos os conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$ . A união é o contorno que inclui ambos os conjuntos *fuzzy*, e, portanto, é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais  $A$  e  $B$ . Então, o vetor de pertinência de união é calculado dos valores individuais de  $A$  e  $B$ , como segue (Simões & Shaw, 2007):

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.3)$$

- **Intersecção entre conjuntos fuzzy**

Seja  $E$  o universo de discurso,  $x \in E$ ,  $M = [0,1]$  e os conjuntos *fuzzy*  $A \subset E$ ,  $B \subset E$ , então a intersecção  $A \cap B$  é o maior subconjunto do universo de discurso  $E$ , o qual é ao mesmo tempo parte de  $A$  e também parte de  $B$ . A intersecção é a parte comum dos conjuntos  $A$  e  $B$  e, como resultado, é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais  $A$  e  $B$ . Por esta razão o vetor de pertinência da intersecção  $A \cap B$  pode ser calculado dos valores individuais, de  $A$  e  $B$ , como segue:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.4)$$

## 4.3 Sistemas Fuzzy

A construção de um sistema *fuzzy* passa pelo processo apresentado na Fig. 4.2, a seguir. Inicialmente há a *fuzzificação* do espaço de entrada, feito com o uso de funções de pertinência anteriormente definidas. A etapa do *procedimento de inferência* é feita através da consulta das *regras fuzzy*, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída.

A última etapa é a *defuzzificação*, que também faz uso de funções de pertinência para obter a variável de saída.

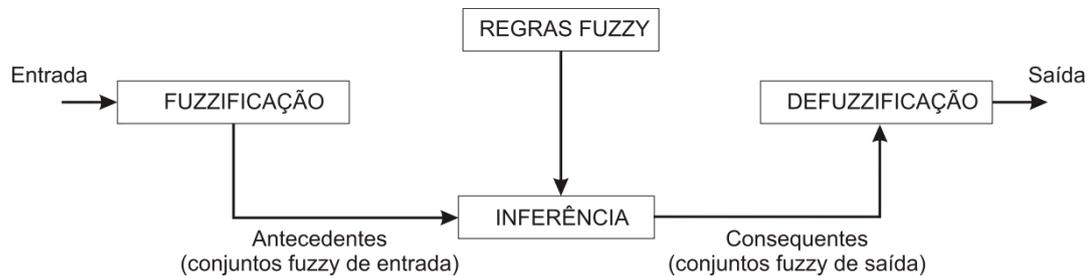


Figura 4.2 – Estrutura básica de um sistema *fuzzy*

Fonte: Wang, 1997, p. 7. (Adaptação: Houve tradução dos termos).

- **Fuzzificação**

A fuzzificação consiste de um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio *fuzzy*. Calcula-se um valor para representar o grau de pertinência de um espaço de entrada em um ou mais conjuntos *fuzzy*. É a tradução dos termos linguísticos, ou seja, transforma valores qualitativos em quantitativos.

- **Regras *fuzzy***

As *regras fuzzy* descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado. 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. Um conjunto de regras é capaz de descrever um sistema em suas várias possibilidades. Cada regra *fuzzy* é composta por uma parte antecedente (a parte *Se*) e uma parte consequente (a parte *Então*), resultando em uma estrutura do tipo:

$$\textit{Se} \{ \textit{antecedentes} \} \textit{Então} \{ \textit{consequentes} \}$$

Os antecedentes e consequentes são definidos através de funções de pertinência. Os antecedentes definem uma região *fuzzy* no espaço das variáveis de entrada do sistema. Já os consequentes descrevem uma região no espaço das variáveis de saída do sistema, qual seja a sua conclusão/ação.

Uma vez construído o conjunto de regras *fuzzy* faz-se necessário o uso de uma “máquina de inferência” para extrair dela a resposta final. A inferência mais comum, e amplamente utilizada no controle de sistemas, é o Método de Mamdani (utiliza variáveis

linguísticas). As regras são processadas em paralelo, ou seja, todas as regras (consequentes) são consideradas ao mesmo tempo, e ao final obtemos uma resposta que pode ser tanto um valor numérico clássico, quanto um conjunto *fuzzy*, a depender do tipo de consequente utilizado. Dependendo da utilização da variável de saída teremos que acrescentar a etapa de defuzzificação, por exemplo, se a saída do sistema for um conjunto *fuzzy* e a saída desejada for um número real.

- **Inferência**

Uma vez obtidas as regras o passo seguinte é a inferência que conforme Simões e Shaw (2007), consiste em:

- Agregação: responsável pela avaliação da porção SE de cada regra, através do operador “AND”, o qual fornece o menor dos dois valores de pertinência ( $\mu$ ) que indica o grau de adequação de cada regra ao estado atual do sistema;
- Composição: responsável pela ponderação das diferentes conclusões das regras analisadas, através do operador “OR”, o qual fornece o maior dos resultados.

A *inferência* determina o grau de validade dos consequentes das regras e combina os resultados no conjunto *fuzzy* que vai para a defuzzificação. Os métodos mais comuns para determinação desse grau são: a inferência *max-min* e a inferência *max-prod*, as quais são representadas por (Almeida, 2009):

$$\text{max-min: } f(i) = \max_k [\min(A(i), B(i))] \quad (4.5)$$

$$\text{max-prod: } f(i) = \max_k [A(i) * B(i)] \quad (4.6)$$

Em que:

- $i$  representa os valores de entrada;
- $k$  representa o número de regras *fuzzy* disparadas pela entrada  $i$ ;
- $A(i)$  e  $B(i)$  são os valores de  $i$  dentro da função de relacionamento dos conjuntos *fuzzy*  $A$  e  $B$ , respectivamente;
- A função *min* é a intersecção das funções de saída obtidas por  $A(i)$  e  $B(i)$ ;
- A função  $\max_k$  é a união das saídas produzidas pelas  $k$  regras disparadas por  $i$ .

- **Defuzzificação**

Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido num valor discreto. Portanto, a defuzzificação é uma transformação inversa que

traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Há diversas técnicas de defuzzificação e entre as mais utilizadas estão: *Centro da área (C-o-A)*, *Centro do máximo (C-o-M)* e *Média-do-máximo (M-o-M)*.

Neste trabalho é proposto o uso do método *Centro da área (C-o-A)*, pois é recomendado para quando se deseja um sinal de saída mais suave e todas as funções de pertinência utilizadas se sobrepõem. Neste método, também chamado de *Centro de gravidade*, é calculado o centroide da área composta que representa o termo de saída *fuzzy*. O procedimento é similar ao usado para calcular o centro de gravidade em física se for considerado a função de pertinência  $\mu_A(x)$  como a densidade de massa de  $x$ .

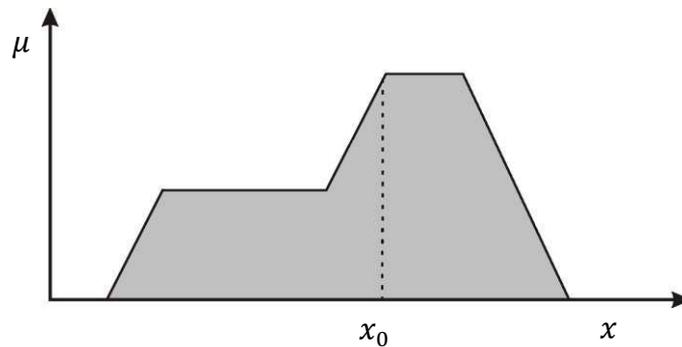


Figura 4.3 – Exemplo do método de defuzzificação C-o-A

Fonte: Ortega, 2001.

## Capítulo 5

### 5. Método Proposto e Construção do Sistema *Fuzzy*

No sistema de controle do ângulo de passo, o sinal elétrico é recebido pelo controlador e processado para que os mecanismos de controle atuem mantendo o sistema sempre em sua região ótima de operação. Na Fig. 5.1 é apresentado o diagrama de blocos para o controle do ângulo de passo que o programa de Simulação Dinâmica utiliza, sendo este um controlador do tipo Proporcional-Integral.

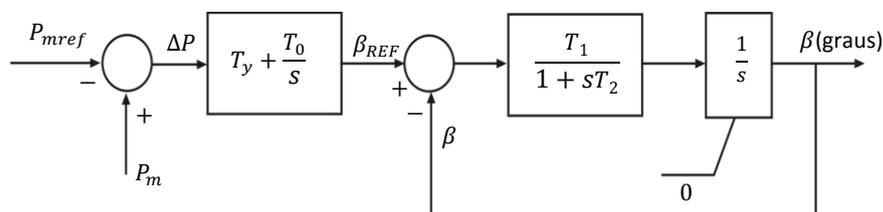


Figura 5.1 – Diagrama de blocos para o controle do ângulo de passo com o controle PI

Fonte: Lopes e Almeida, 2004a, p. 16.

Na Fig. 5.2 a seguir, está apresentado o diagrama do sistema proposto com as devidas modificações em relação ao anterior.

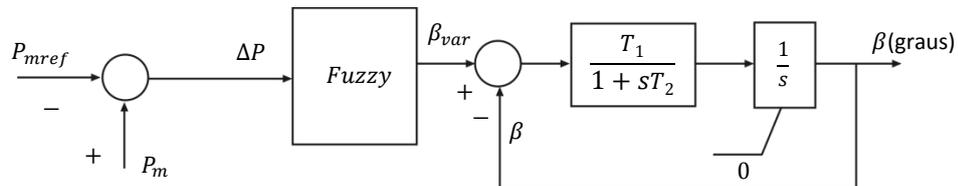


Figura 5.2 – Diagrama de blocos para o controle do ângulo de passo com o controle *fuzzy*

Em que:

$P_{mref}$  – Potência de referência (valor fixo = 0.1109 p.u.)

$P_m$  – Potência gerada

$\Delta P$  – Erro de potência

$\beta_{var}$  – Variação do ângulo

$T_1$  – Ganho do mecanismo de controle do ângulo de passo

$T_2$  – Constante de tempo do mecanismo de controle do ângulo de passo

$T_y$  e  $T_0$  – Ganhos do controlador Proporcional Integral

Fazendo um paralelo entre o que ocorre em um controlador PI e no *fuzzy* temos que, de forma geral, seja  $de$  a variação do erro  $e$  e  $du$  a variação da saída  $u$ , no domínio do tempo, então,

$$du = K_p de + K_I e \quad (5.1)$$

em que  $e$  é o erro entre o sinal de referência e a saída do processo.

A definição na regra *fuzzy* do controle proposto:

$$\text{SE } erro = E_i \text{ ENTÃO } controle = U_i \quad (5.2)$$

em que  $E_i$  e  $U_i$  são funções de pertinência linguísticas atribuídas às variáveis  $e$  e  $u$ . Este controlador tem apenas uma entrada e uma saída: o erro de potência ( $\Delta P$  em p.u.) e a variação do ângulo de passo ( $\beta_{var}$  em graus), respectivamente.

Após a análise do problema, a construção de um sistema *fuzzy* segue uma ordem, o primeiro passo, que consiste na escolha das variáveis de desempenho (entrada e saída), já foi executado. O próximo passo é a escolha dos conjuntos *fuzzy*, ou superfícies de controle.

Para melhor compreensão do processo de construção do controlador no *Fuzzy Logic Toolbox<sup>TM</sup>*, no APÊNDICE A estão apresentados todos os passos para a construção do sistema.

### 5.1 Escolha dos conjuntos *fuzzy*

Um das formas de se fazer a escolha dos conjuntos é partir do conhecimento do operador para obter as funções de pertinência. Tal escolha vai depender do tipo de problema e qual o resultado desejado. Como citado no Capítulo 4, há diversos tipos de funções de pertinência. Neste caso foram adotadas as trapezoidais e triangulares para compor o sistema.

Segundo Simões e Shaw (2007), um número prático de funções de pertinência é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de funções, maior a precisão, porém a demanda computacional é mais significativa, além disso, a partir de 7 funções não há melhorias significativas na precisão.

Após algumas variações com relação à quantidade de funções assumiram-se 7 funções *fuzzy* para as entradas e 7 para a saída, com funções de pertinência triangulares e trapezoidais.

Simulações com 5 e 9 funções (de entrada e saída) foram realizadas. As simulações com 5 funções resultaram em muitas oscilações nas variáveis da turbina. Já nas simulações com 9 funções o resultado ficou bem aproximado do sistema com 7 funções. Então o esforço computacional com 9 funções seria maior e não seriam obtidas melhorias significativas. Por isto optou-se por utilizar as 7 funções. Confirmando a afirmação de Simões e Shaw (2007).

As funções são descritas pelas seguintes variáveis linguísticas:

NL – Negativo grande

PL – Positivo grande

NM – Negativo médio

PM – Positivo médio

NS – Negativo pequeno

PS – Positivo pequeno

ZE – Zero

Na Fig. 5.3 é apresentado o conjunto de funções de pertinência da entrada do controlador. Note que no ponto central de equilíbrio (ZE) as funções são mais densas, garantindo uma maior estabilidade para o ajuste de posição preciso, enquanto um ajuste mais grosseiro é aceitável em regiões mais distantes do ponto de equilíbrio. Em tal sistema, o universo de discurso cobre valores negativos e positivos, tendo o zero como o ponto central de equilíbrio.

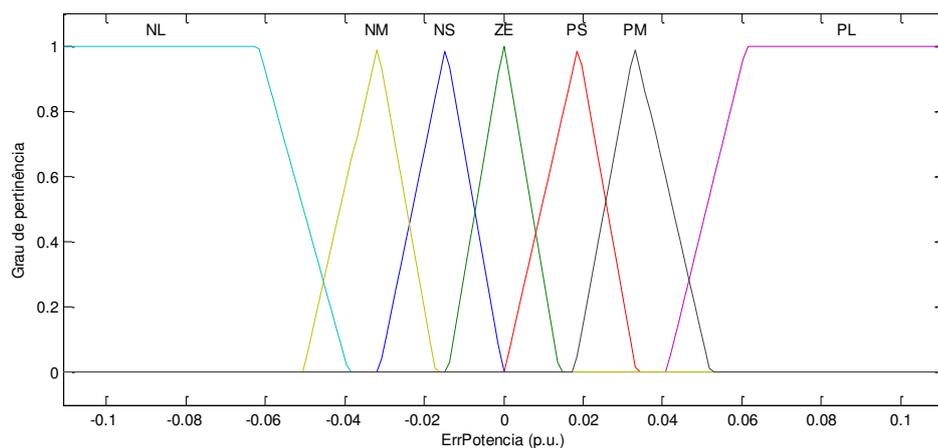


Figura 5.3 – Função de pertinência da entrada do controlador: erro de potência

As funções de pertinência da saída do sistema (Fig. 5.4) também são construídas seguindo o mesmo raciocínio.

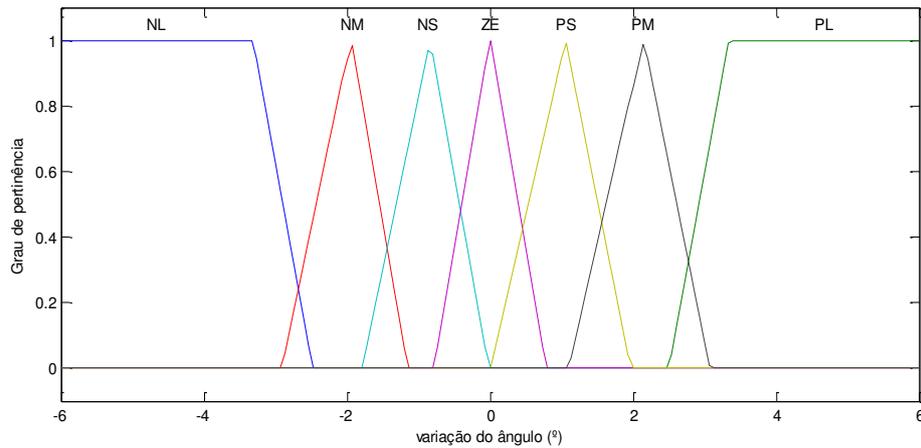


Figura 5.4 – Função de pertinência da saída do controlador

Outro fator que afeta a precisão é o grau de sobreposição. Para conseguir uma saída contínua e suave, cada conjunto *fuzzy* tem que, em algum grau, sobrepor o conjunto vizinho. Não há um algoritmo preciso para determinar o mínimo ou o máximo grau de sobreposição. Experiências indicam que o grau de sobreposição para regiões triangulares e trapezoidais fica entre 25% e 50% do conjunto *fuzzy*. Depende do conceito modelado e do grau de imprecisão associado aos conjuntos vizinhos. A escolha das regras que irão relacionar as funções de pertinência é o próximo passo.

## 5.2 Escolha das regras

As regras *fuzzy* vão definir o relacionamento das funções de entrada e saída. São descritas de acordo com o resultado desejado. Na Tabela 5.1, a seguir, é apresentada a base de regras para o sistema construído.

Tabela 5.1 – Base de regras para a variação do ângulo

$\Delta P$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$\beta_{var}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL

Um exemplo de regra utilizada é dado a seguir. Ao invés de se utilizar números reais, as entradas e saídas são descritas através de “valores *fuzzy*”:

$$\text{Se } \Delta P = NL \text{ então } \beta_{var} = NL \tag{5.3}$$

NL foi definido através das funções de pertinência que descrevem a imprecisão de tais valores de entrada e saída. Como interpretação dessa regra temos que: se o erro de potência é grande negativo então o ângulo precisa diminuir, pois a potência gerada está muito baixa, dessa forma  $\beta_{var}$  diminuirá para obter o ajuste. A interpretação para o caso do controle do ângulo de passo é direta, pois se a geração de potência estiver abaixo do valor nominal, o ângulo sofrerá um decréscimo e se estiver acima, o ângulo sofrerá um acréscimo.

O conjunto de regras é completamente varrido, para verificar que regras devem ser ativadas. Modificando o ângulo de passo, que é calculado pelo sistema, o controle *fuzzy* busca o erro zero para a potência, significando um melhor desempenho.

Note que nenhuma expressão numérica é utilizada, uma expressão linguística (ou verbal) pode ser utilizada para descrever a relação entre a variável de entrada e a de saída. Mais importante que isso, a restrição de linearidade não é mais necessária, uma vez que a função entrada-saída é descrita ponto a ponto, exatamente como no método experimental.

O método heurístico tem a habilidade de possibilitar a construção de uma função de entrada versus saída, não matemática, porém útil na descrição de uma planta ou processo (Simões e Shaw, 2007).

### 5.3 Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação

A fuzzificação recebe o valor do sensor referente à variável de entrada, transformando-o em variável linguística e através das funções de pertinência o mapa de regras é devidamente ativado.

A inferência utilizada é do tipo *max-prod*, pois esta fornece melhor continuidade e uma saída mais suave. A operação de agregação (*prod*) escalona o conjunto *fuzzy* consequente.

Por fim, a saída *fuzzy* é defuzzificada, de acordo com o método escolhido (C-o-A), tal método foi descrito anteriormente no Capítulo 4. Na Fig. 5.5, a seguir, estão apresentadas as 7 funções de pertinência para a entrada e 7 para a saída, assim como as 7 regras e um exemplo de como estas se relacionam.

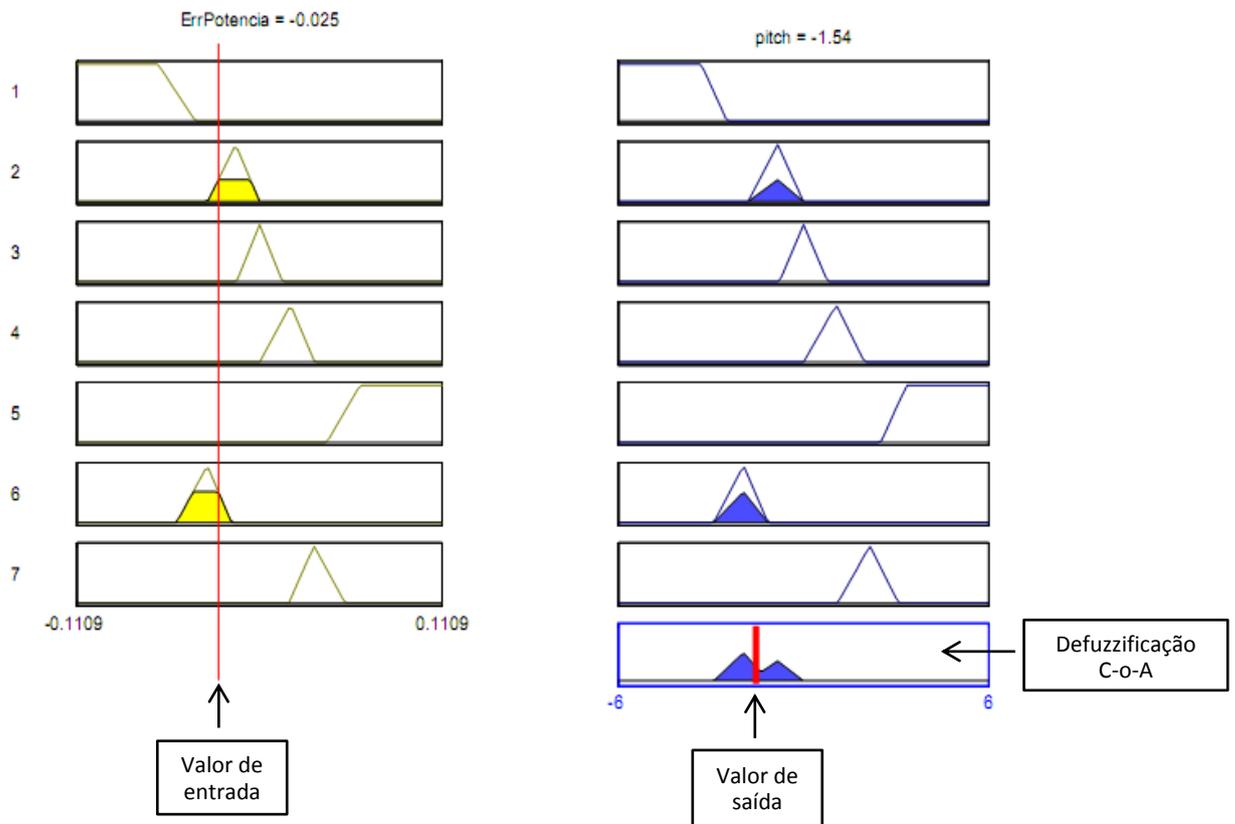


Figura 5.5 – Exemplo gráfico das regras e método de inferência e defuzzificação

Em destaque o valor de entrada que vai ativar as regras e o valor de saída como resultado da avaliação da regra. O método de composição *max* (União *fuzzy*) gera o contorno da superfície comum aos dois conjuntos *fuzzy* de saída. O método de defuzzificação Centro-da-Área gera como resultado um número real ( $\beta_{var}$ ) que será utilizado no controle do ângulo.

No próximo capítulo os resultados referentes às simulações em um sistema de potência serão apresentados.

## Capítulo 6

### 6. Avaliação do Método e Resultados

#### 6.1 Sistema Teste

O sistema teste utilizado foi retirado de (Lopes e Almeida, 2004b), tal sistema é composto de 15 barras, Fig. 6.1 a seguir. Sua geração é diversificada, contendo unidades de geração hidroelétrica, diesel e eólicas, esta com dois tipos de geradores (GIDA e Gaiola de esquilo). O gerador convencional (gaiola de esquilo) conta com ângulo de passo variável, já no GIDA (ou DFIM) as pás são fixas, e tem seu ângulo  $\beta$  fixado em  $2^\circ$ .

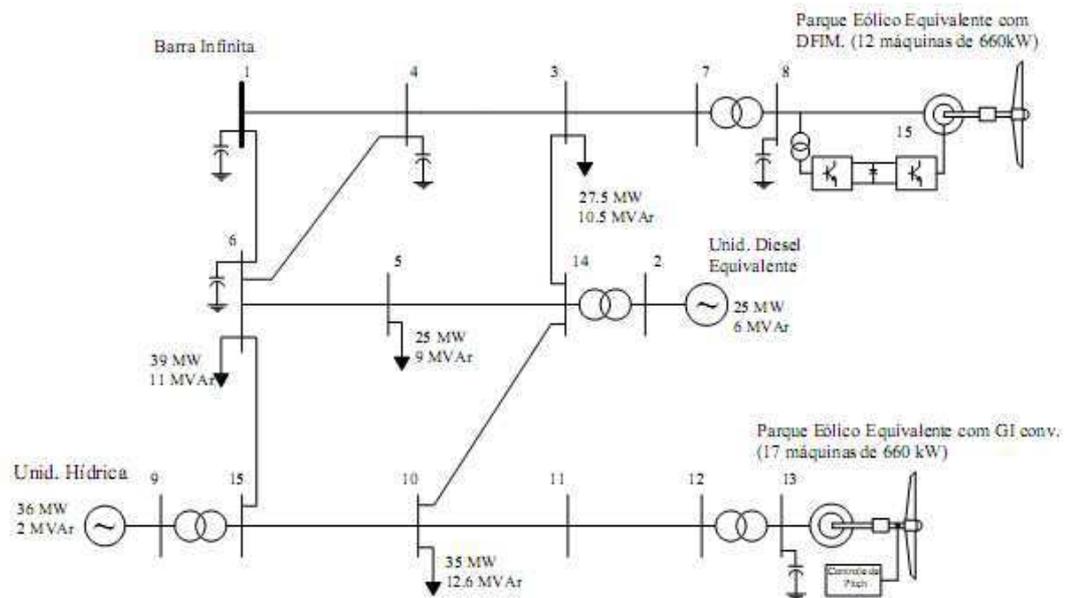


Figura 6.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico

Fonte: Lopes e Almeida, 2004b.

O parque é composto de 17 máquinas com capacidade de geração de 660 kW cada uma. Podendo gerar uma potência de até 11,22 MW. O parque está modelado por uma máquina equivalente referente à potência total deste.

Os dados de linhas, barras, fluxo de potência inicial, do gerador de indução convencional e da turbina eólica podem ser consultados no ANEXO A. Os dados dos demais geradores e dos controladores podem ser obtidos em (Lopes e Almeida, 2004b).

## 6.2 Simulações e Resultados

As simulações foram executadas com o auxílio do programa MATLAB<sup>®</sup>, o Programa de Simulação Dinâmica foi alterado para receber o controle *fuzzy*. Inicialmente foram feitas simulações com o sistema sem alterações (controle PI) para obtermos os valores de referência. Logo em seguida este controle foi retirado e o controle *fuzzy* foi incorporado ao programa. Este controle foi desenvolvido com o *Fuzzy Logic Toolbox*<sup>™</sup> também disponível no MATLAB<sup>®</sup>. No APÊNDICE A encontra-se o desenvolvimento detalhado do projeto do controlador *fuzzy*.

Para a avaliação da eficiência do método proposto foi aplicada uma variação de vento de -10% de seu valor inicial que é de 15 m/s, obtendo o comportamento do parque eólico com a máquina assíncrona convencional. A variação ocorreu na forma de um pico triangular, de acordo com a Fig. 6.2. A escolha do evento a ser aplicado foi devido ao fato de ser um evento comum em parques eólicos, já que o vento está em constante variação de velocidade.

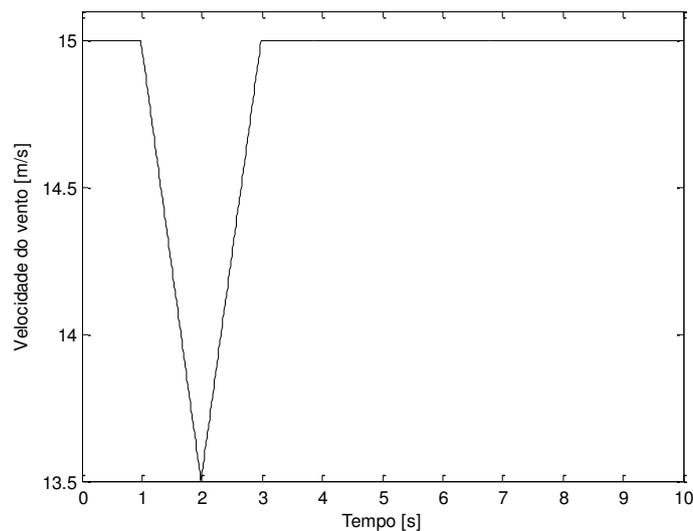


Figura 6.2 – Variação na velocidade do vento

Nos gráficos a seguir estão apresentadas as variáveis correspondentes ao gerador assíncrono equipado com controlador PI ou com controlador *fuzzy* para a mesma ocorrência. Ao lado de cada uma é apresentado um zoom da região onde há as oscilações, evidenciando a melhora no controle.

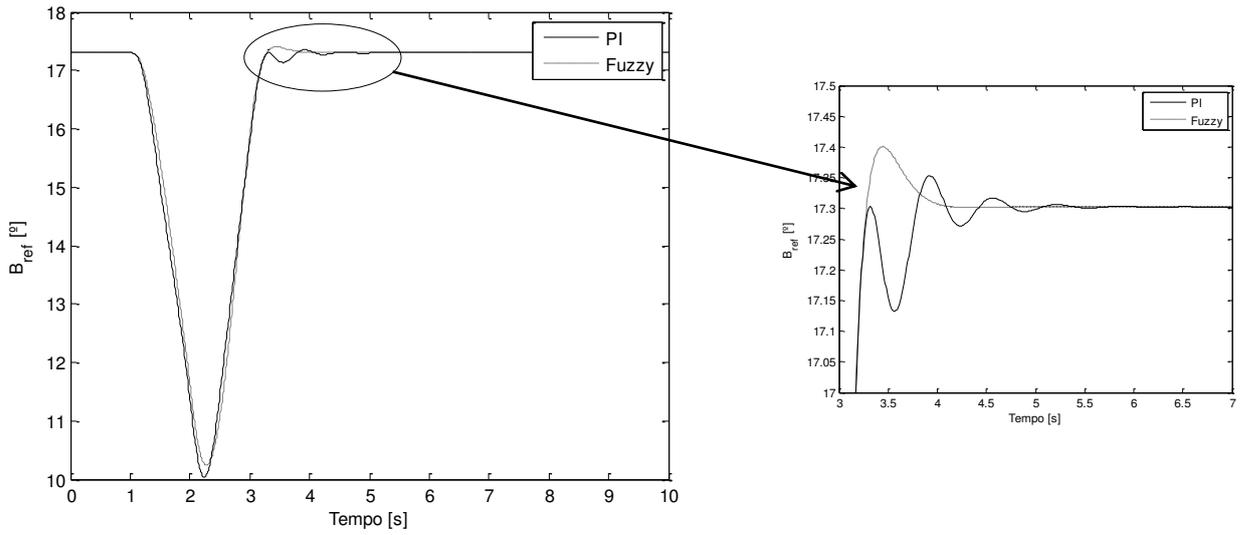


Figura 6.3 – Variação do ângulo de passo

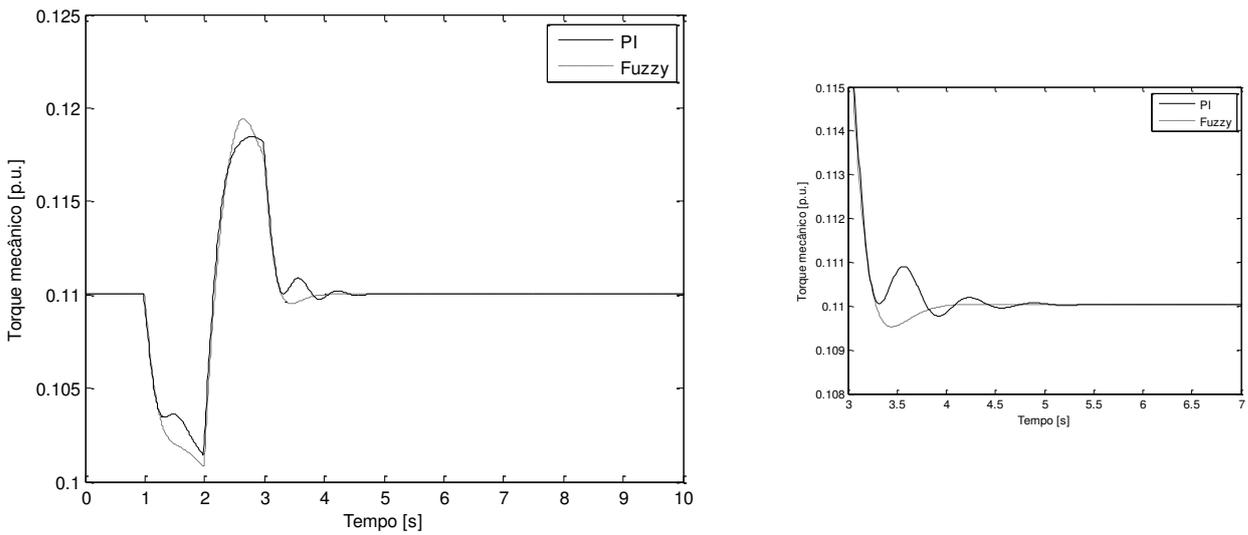


Figura 6.4 – Variação do torque mecânico

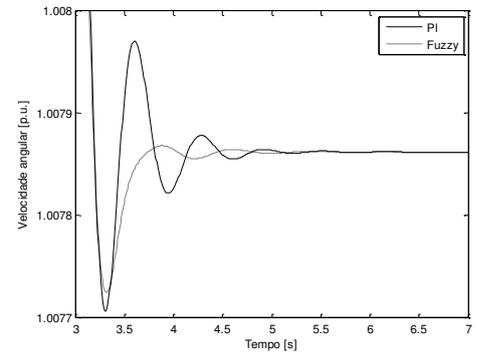
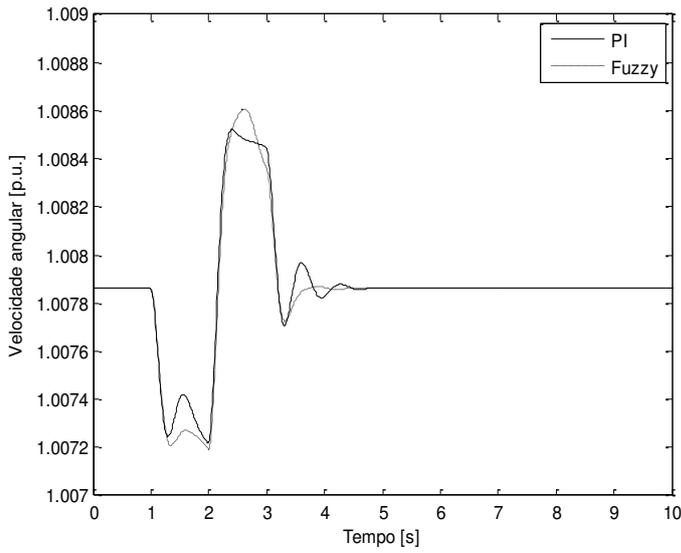


Figura 6.5 – Variação da velocidade angular

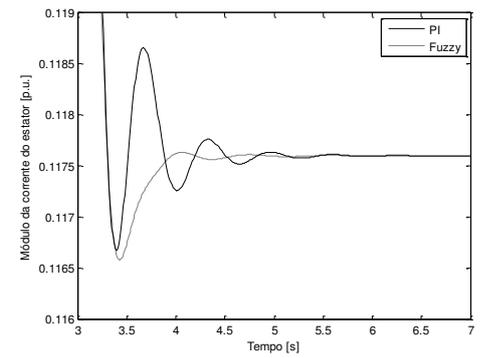
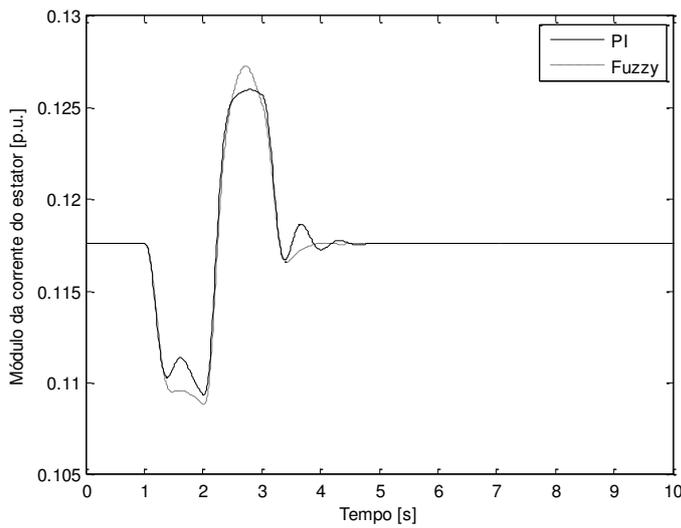


Figura 6.6 – Variação da corrente do estator

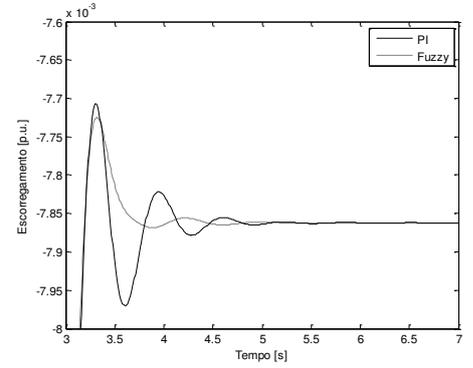
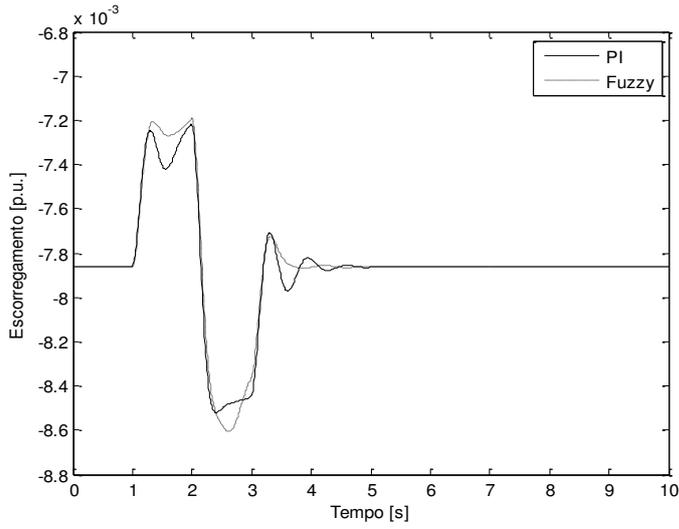


Figura 6.7 – Variação do escorregamento

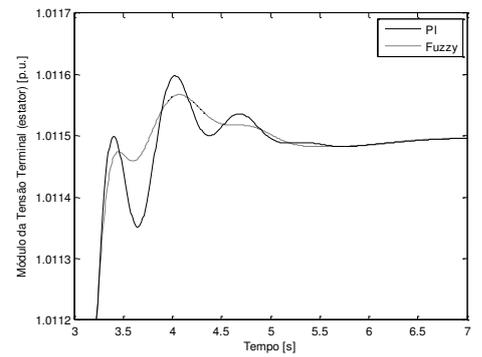
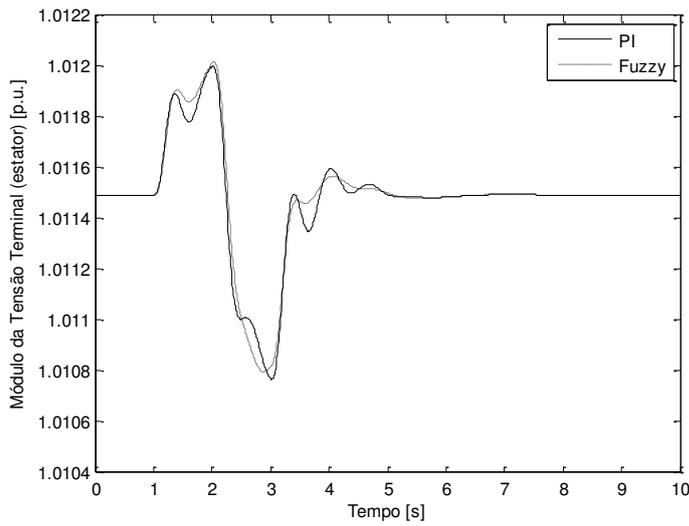


Figura 6.8 – Variação do módulo da tensão terminal (estator)

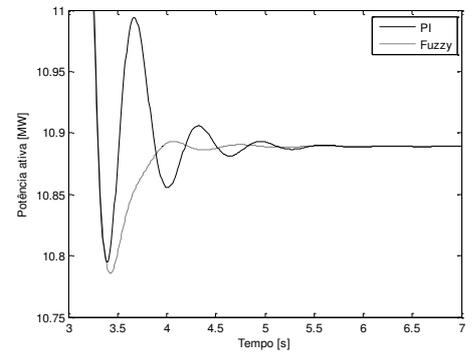
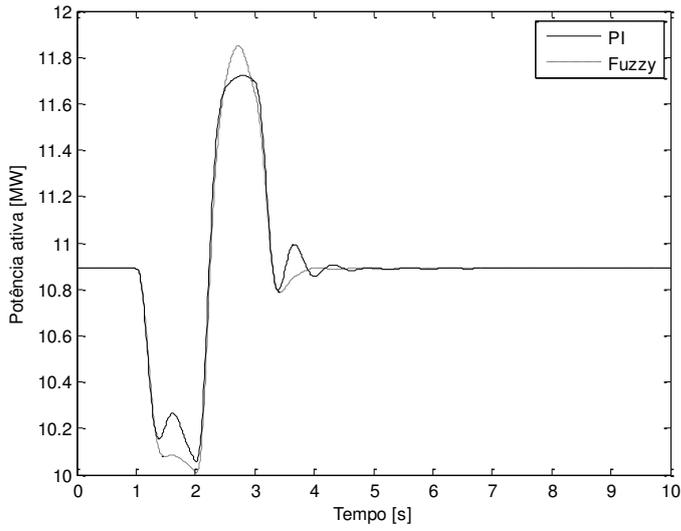


Figura 6.9 – Variação da potência ativa gerada

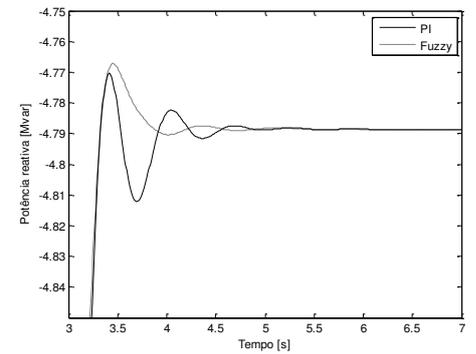
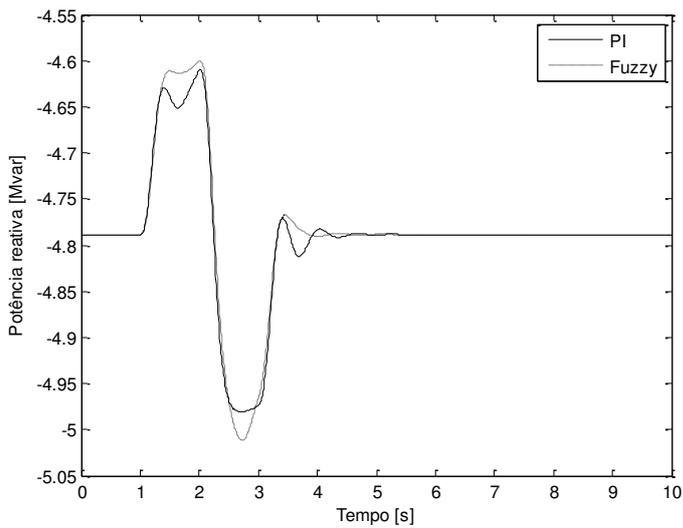


Figura 6.10 – Variação da potência reativa gerada

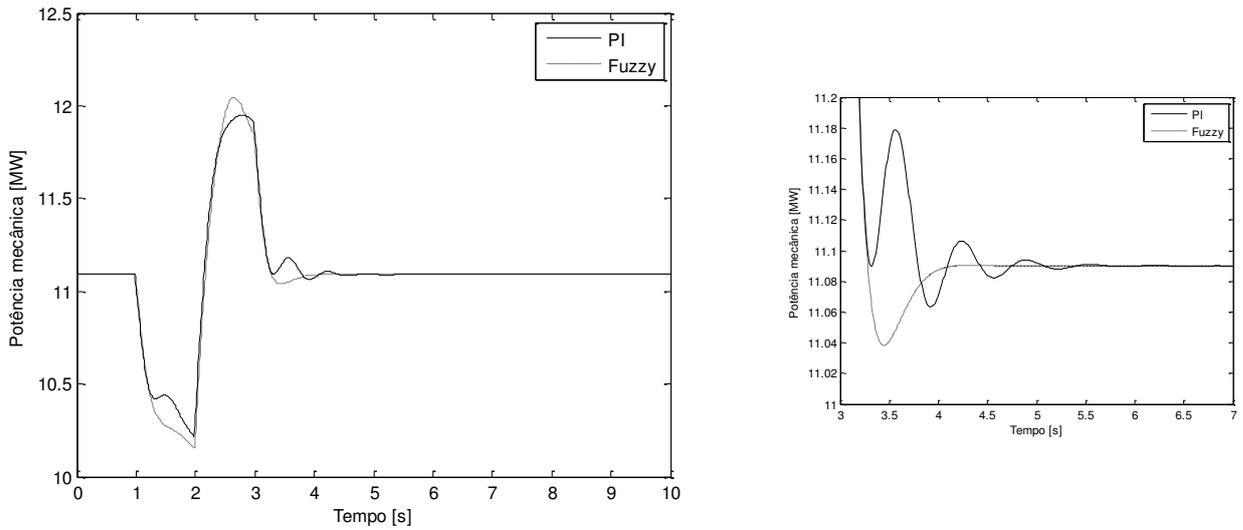


Figura 6.11 – Variação da potência mecânica

Observando-se as figuras 6.3 a 6.11, nota-se a atenuação das oscilações e consequentemente a suavização das respostas em todas as variáveis apresentadas quando o controlador *fuzzy* é utilizado. A influência do controle do ângulo de passo não se reflete apenas na potência gerada, podemos ver a influência em todas as variáveis relacionadas à turbina, desde o torque até o escorregamento.

Em algumas variáveis ocorreu o aumento nos valores de pico, porém tais valores não são significativos. O controle *fuzzy* se mostrou eficiente em relação à diminuição das oscilações das variáveis monitoradas quando comparado com o controle PI convencional.

## Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado um controlador *Fuzzy* para controle do ângulo de passo de turbinas eólicas. Apresentando-se como uma alternativa ao controle Proporcional-Integral utilizado atualmente.

Um estudo sobre os tipos de controle de geração de potência foi realizado, constatou-se que turbinas com ângulo de passo variável tem um melhor desempenho em relação às de ângulo fixo. Este controle é geralmente feito com controladores do tipo PI, que tem difícil obtenção de parâmetros.

O controle *fuzzy* se mostrou adequado ao problema porque não precisa de definições matemáticas, necessita apenas do conhecimento do processo, para que seja gerada uma solução adequada. Neste caso o processo era a variação do ângulo de passo da turbina eólica em função da potência gerada.

Constatou-se que quando as variáveis de controle têm grandes excursões, o controle *fuzzy* se comporta melhor que o PI e tem comportamento similar quando estes valores são pequenos. Isto é devido à ação linear inerente ao controle *fuzzy*. Os controladores *fuzzy* tem um melhor desempenho em sistemas submetidos a grandes perturbações.

Apesar disso o controle *fuzzy* se mostrou eficiente perante a perturbação aplicada ao sistema, diminuindo as oscilações da potência gerada e das outras variáveis observadas.

A opção com o controle contendo duas entradas também foi analisada, neste caso teríamos o erro de potência e a variação do erro de potência como entrada. Inicialmente se apresentou como uma boa alternativa, porém ao se comparar com o sistema com apenas uma entrada e 7 regras (bem mais simples), não mostrou vantagens. Este fato pode ter ocorrido devido ao processo de calibragem do controlador, não extinguindo a possibilidade de seu bom funcionamento.

Uma questão interessante é que se temos um modelo matemático, por que criar um sistema com controle *fuzzy*? A resposta situa-se em duas direções: flexibilidade e extensibilidade. Os modelos *fuzzy* são muito mais flexíveis, uma vez que podemos mudar a superfície de controle heurísticamente, elas são geralmente mais extensíveis uma vez que não há a necessidade de desenvolver um profundo modelo matemático para um novo problema. O desenvolvimento do controle *Fuzzy* tem como objetivo buscar novas estratégias de controle,

visando as dinâmicas não modeladas, evitar os ruídos de medição, perturbações e incertezas paramétricas.

Como trabalhos futuros é possível destacar os seguintes itens:

- Utilizar diferentes entradas para o controlador, como descrito na literatura;
- Implementar o controle em Geradores de Indução Duplamente Alimentados, que além do controlador do ângulo tem outros controladores PIs (velocidade, tensão);
- Implementar um controle que seja capaz de identificar e atuar nas diversas regiões de velocidade do vento;
- Implementar o controle sem a realimentação do ângulo de passo, simplificando e evitando perturbações no sistema.

## Referências Bibliográficas

- ACKERMANN, T. *Wind Power in Power Systems*. Stockholm: Wiley, 2005. 691 p.
- AKHMATOV, V. and NIELSEN, A. H., *Fixed Speed Active-stall Wind Turbines in Offshore Applications*. Proc. Int. Conf. Power System Transients IPST'99, Budapest, Hungary, pp 289-294. June 1999.
- AKHMATOV, V. *Note concerning the mutual effects of grid and wind turbine voltage stability control*. Wind Engineering, vol. 25, no. 6, p. 367 –371. 2001.
- AKHMATOV, V. *Variable-speed Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generators – Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools*. Wind Engineering, [S.l.], vol. 26, no. 2, p. 85-108, 2002a.
- AKHMATOV, V. *Variable-speed Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generators – Part II: Power System Stability*. Wind Engineering, [S.l.], vol. 26, no. 3, p. 171-188, 2002b.
- AKHMATOV, V.; KNUDSEN, H.; NIELSEN, A. H.; PEDERSEN, J. K.; POULSEN, N. K. *Modelling and Transient Stability of Large Wind Farms*. Elsevier Electrical Power and Energy Systems, [S.l.], 25, p. 123-144, 2003.
- AKHMATOV, V. *Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power Systems With Large Amount of Wind Power*. 2003. 261 f. Thesis (PhD) – Technical University of Denmark, Denmark, 2003.
- ALMEIDA, R. G.; PEÇAS LOPES, J. A.; BARREIROS, J. A. L. *Improving Power System Dynamic Behavior Through Doubly Fed Induction Machines Controlled by Static Converter Using Fuzzy Control*. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 19, Nº 4, November, 2004.
- ALMEIDA, A. M. F. *Otimização Multiobjetivo e Lógica Fuzzy Aplicados ao Planejamento Integrado de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição*. 2009. 126 f. Tese (Doutorado) – UFCG, Campina Grande. 2009.
- BARROS, L. S. *Uma Estratégia de Controle para o Melhoramento do Comportamento Dinâmico de Máquinas de Indução Duplamente Alimentadas Operando como Geradores Eólicos*. 2006. 112 f. Tese (Doutorado) – UFCG, Campina Grande. 2006.

- BIANCHI, F. D.; BATTISTA, H.; MANTZ, R. J. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. London: Springer, 2007. 205 p.
- BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N; BOSSANYI, E. *Wind Energy Handbook*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2001. 617 p.
- COX, Earl. *The Fuzzy Systems Handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*, Academic Press, 1994. 623p.
- EKANAYAKE, J.; HOLDSWORTH, L.; JENKINS, N. *Control of DFIG Wind Turbines*. Power Engineer, p. 28-32, February, 2003.
- FRANÇA, J. L.; VASCONCELLOS, A. C. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 8 ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2009. 258 p.
- HANSEN, A. D. et al. *Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DlgSILENT*. Technical Report RISØ-R-1400, RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2003.
- HANSEN, A. D. et al. *Control of variable speed wind turbines with doubly-fed induction generators*. Wind Engineering, vol. 28, Nº 4, Denmark, 2004.
- HAU, E. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2<sup>nd</sup> ed. Germany: Springer, 2006. 783 p.
- HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. 385 p.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p.
- KOESSLER, R. J. et al. *Integration of large wind farms into utility grids – Part I: Modeling of DFIG*. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, [S.l.], vol. 3, 2003, p. 1512-1519.
- LIMA, F. K. A. *Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada - Suportabilidade para Afundamento de Tensão*. 2009. 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- LOPES, J. A. P.; ALMEIDA, R. G. *Descrição de Modelos Matemáticos de Máquinas de Indução Convencional e Duplamente Alimentada e Estratégias de Controle para Estudo Dinâmico e de Estabilidade Transitória*. Trabalho de Consultoria para o ONS Brasil, INESC PORTO, 2004a.

- LOPES, J. A. P.; ALMEIDA, R. G. *Documentação do Programa de Simulação Dinâmica de Sistemas de Potência com Geradores de Indução Duplamente Alimentados e Geradores Convencionais com Controlo de Pitch*. Trabalho de Consultoria para o ONS Brasil, INESC PORTO, 2004b.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Amherst: John Wiley & Sons Ltd., 2002. 577 p.
- MARTINS, C. C.; ASSIS, T. M. L.; TARANTO, G. N. *Análise do Impacto da Geração Distribuída em Sistemas Elétricos de Potência através de Simulação Rápida no Tempo*. In: XV CBA - Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado, Setembro, 2004.
- MILLER, N. W.; PRICE, W. W.; SANCHEZ-GASCA, J. J. *Dynamic modelling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine generators*. Technical Report, Power Systems Energy Consulting, General Electric International, Shenectady, U.S.A. October, 2003. 31 p.
- MOTA, W. S. *Programa de Estabilidade Transitória – Etapeólica*. P&D CELPE/UFCG – Campina Grande, PB, 2002.
- MOTA, W. S.; BARROS, L. S.; PAMPLONA, F. M. P.; EPAMINONDAS, A. N.; BRAGA FILHO, E. R.; FORMIGA, A. M.; SANTOS, A. A. *Dynamic Simulations of Electric Power Systems Containing Wind Generation*. In: IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, São Paulo, November 8-11, 2004.
- MOTA, W. S.; BARROS, L. S. *Dynamic Simulations of Wind Generators Connected to Distribution Systems*. In: 18TH CIRED – International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin, 6-9 June, 2005a.
- MOTA, W. S.; BARROS, L. S. *Análise do Impacto na Qualidade de Energia da Conexão de Unidades de Geração Eólica a Sistemas de Potência*. VI SBQEE – Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica, Belém, Agosto, 2005b.
- MOTA, W. S. *Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência*. Campina Grande: Epgraf, 2006. 368 p.
- MULJADI, E.; BUTTERFIELD, C. P. *Pitch-controlled Variable-speed Wind Turbine Generation*. IEEE Transactions on Industry Applications, [S.l.], vol. 37, no. 1, p. 240-246, January-February 2001.
- MULJADI, E. *et al. Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid*. IEEE Transactions on Energy Conversion, [S.l.], vol. 22, no. 1, March, 2007.

- MÜLLER, S.; DEICKE, M.; DE DONCKER, R.W. *Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines*. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 8, no. 3, p. 26-33. 2002.
- MUNTEANU, I.; BRATCU, A. I.; CUTULULIS, N. A.; CEANGĂ, E. *Optimal Control of Wind Energy Systems*. London: Springer, 2008. 283 p.
- NIELSEN, J. E.; VARMING, S.; GAARDESATRUP, C. *Review of Technical Options and Constrains for Integration of Distributed Generation in Electricity Networks*. Report SUSTELNET, Netherlands, December, 2002.
- NUNES, M.V.A.; BEZERRA, U.H.; ZURN, H. H. *Transient stability margin of variable versus fixed speed wind systems in electrical grids*. In: IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, vol. 3, 7 p., Bologna, Jun. 2003.
- NUNES, M. V. A.; LOPES, J. A. P.; ZURN, H. H.; BEZERRA, U. H.; ALMEIDA, R. G. *Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids*. IEEE, Trans. On Energy Conversion, vol. 19, no. 4, dec, 2004.
- ORTEGA, N. R. S. *Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a problemas de biomedicina*. 2001. 152 f. Tese (Doutorado) – USP, São Paulo. 2001.
- PÖLLER, M. A. *Doubly-fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms*. IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, 2003, Bologna, Italy;
- ROSAS, P. A. C. *Dynamic Influences of Wind Power on the Power System*. 2003. 152 f. Thesis (PhD) – Technical University of Denmark, Denmark, 2003.
- ROSAS, P. A. C.; ESTANQUEIRO, A. I. *Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas – vol 1: Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica*. Recife: Centro Brasileiro de Energia Eólica, 2003.
- ROSS, Timothy J., *Fuzzy Logic with Engineering Application*, 3<sup>rd</sup> ed. USA: John Wiley & Sons, 2010. 585p.
- SALLES, M. B. C. *Modelagem e análises de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica*. 2009. 124 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

- SILVA, K. F. *Controle e integração de centrais eólicas à rede elétrica com geradores de indução duplamente alimentados*. 2006. 240 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2<sup>nd</sup> ed. São Paulo: Blucher, 2007. 186 p.
- SLOOTWEG, J.G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. *Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator*. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, p. 644-649, vol. 1, July, 2001a.
- SLOOTWEG, J.G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. *Initialization of wind turbine models in power system dynamics simulations*. In: IEEE Porto Power Tech Proceedings, 6 p., vol. 4, September, 2001b.
- SLOOTWEG, J. G.; De HAAN, S. W. H.; POLINDER, H.; KLING, W. L. *Voltage Control Methods with Grid Connected Wind Turbines: a tutorial review*. Wind Engineering, Volume 25, Nº 6, pp 353-999, 2001c;
- SLOOTWEG, J.G.; KLING, W. L. *Aggregated Modelling of Wind Parks in Power System Dynamics Simulations*. IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, June, 2003a.
- SLOOTWEG, J. G.; KLING, W. L. *Is the Answer Blowing in the Wind?* IEEE Power & Energy magazine. p.26-33, November-December, 2003b.
- SLOOTWEG, J.G.; POLINDER, H.; KLING, W. L. *Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 4, p. 516-524, December, 2003.
- SLOOTWEG, J. G. *Modelling and Impact on Power System Dynamics*. 2003. 206 f. Thesis (PhD) – Delft University of Technology, Delft, 2003.
- WANG, L.X. *A Course in Fuzzy Systems and Control*. 1997. USA: Prentice Hall International, Inc. 1997. 424 p.
- ZADEH, L. A. *Fuzzy sets*. Information and Control, v. 8, 1965. p. 338–353
- ZADEH, L. A. *Fuzzy sets and applications*. USA: John Wiley & Sons, 1987. 684p.
- ZHANG, J. *et al. Pitch angle control for variable speed wind turbines*. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, China, April, 2008.

ZINGER, D. S.; MULJADI, E. *Annualized wind energy improvement using variable speeds*.  
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 6, November-December, 1997.

## APÊNDICE A – Desenvolvimento do projeto do controlador *fuzzy* através do programa MATLAB®

O programa MATLAB® é uma poderosa ferramenta de computação numérica em diversas áreas científicas e se tornou um ambiente efetivamente utilizado em engenharia para realizar cálculos matemáticos, desenvolver algoritmos, modelagem e simulação. O MATLAB® contém um sistema interativo e linguagem de programação própria. Além de bibliotecas para cálculos aritméticos básicos, ainda oferece um grande número de ferramentas especializadas (*toolboxes*) para a resolução de problemas em áreas específicas, tais como estatística, programação linear, sistemas de controles, processamento de sinais, simulação dinâmica (Simulink) dentre diversas outras aplicações.

Uma biblioteca muito importante que foi utilizada nesta dissertação é o *Fuzzy Logic Toolbox™* que contém uma interface gráfica (GUI, *Graphical User Interface*) que permite a construção de sistemas *fuzzy* e efetiva implementação no MATLAB®.

Há quatro ferramentas GUI para projeto no *Fuzzy Logic Toolbox™*:

- *Fuzzy Inference System* ou editor FIS
- Editor de Funções de Pertinência
- Editor de regras
- Visualizador de regras

Estes GUIs são conectados dinamicamente de forma que alterações feitas em um processo afetam todas as demais.

Para se iniciar o FIS basta na linha de comando do MATLAB® digitar “fuzzy” e pressionar a tecla “enter”:

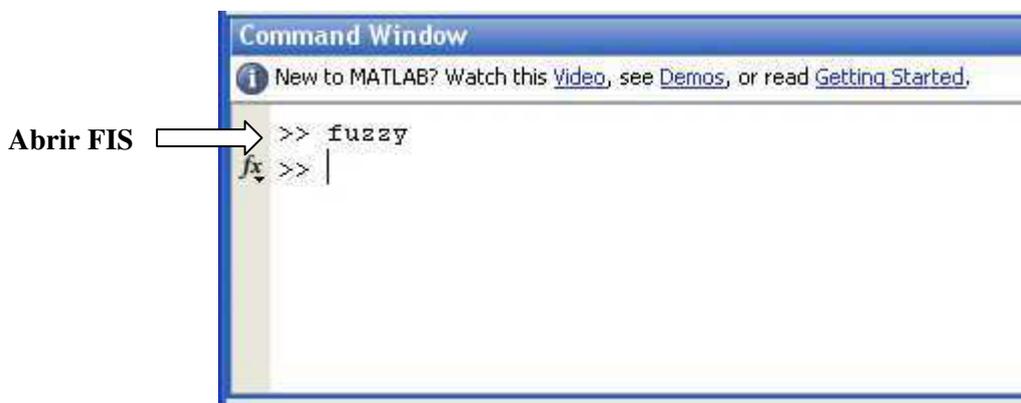


Figura 1 – Janela do MATLAB®

A seguir são apresentadas diversas telas do *Fuzzy Logic Toolbox™*, indicando passo a passo como proceder para construir o controlador. Alguns comentários estão intercalados com tais figuras e procedimentos.

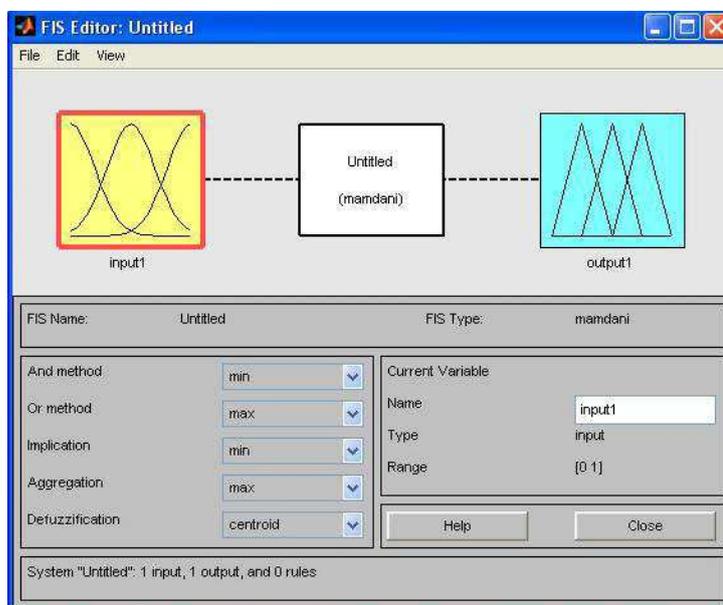


Figura 2 – Tela inicial de edição do FIS (*Fuzzy Inference System*)

Quando iniciamos o FIS este já contém uma variável de entrada e uma de saída, no nosso caso esta quantidade já é suficiente, se for preciso mais variáveis podem ser adicionadas seguindo o procedimento a seguir:

**Este menu permite a adição de variáveis de entrada e saída**

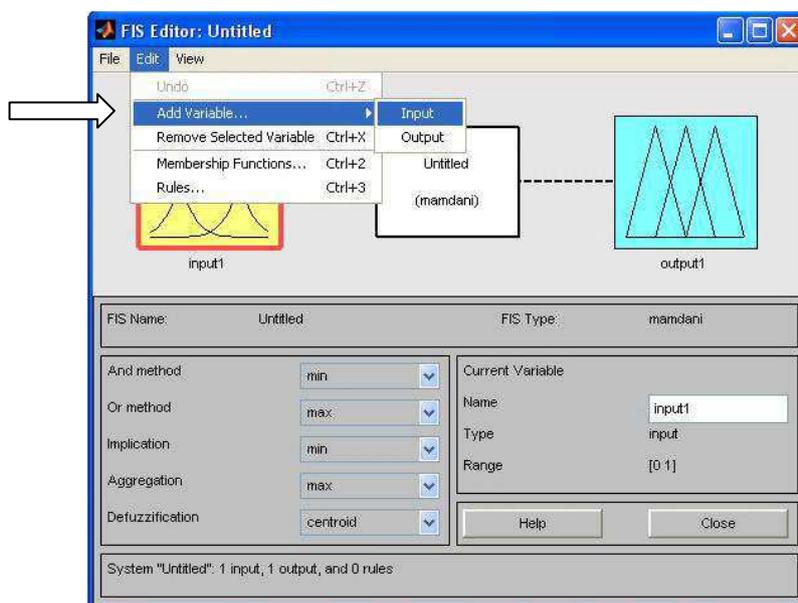


Figura 3 – Menu de adição de variáveis de entrada e saída

Após adicionada a variável de entrada e de saída, o erro de potência e o ângulo de passo, respectivamente, seu nome pode ser alterado.

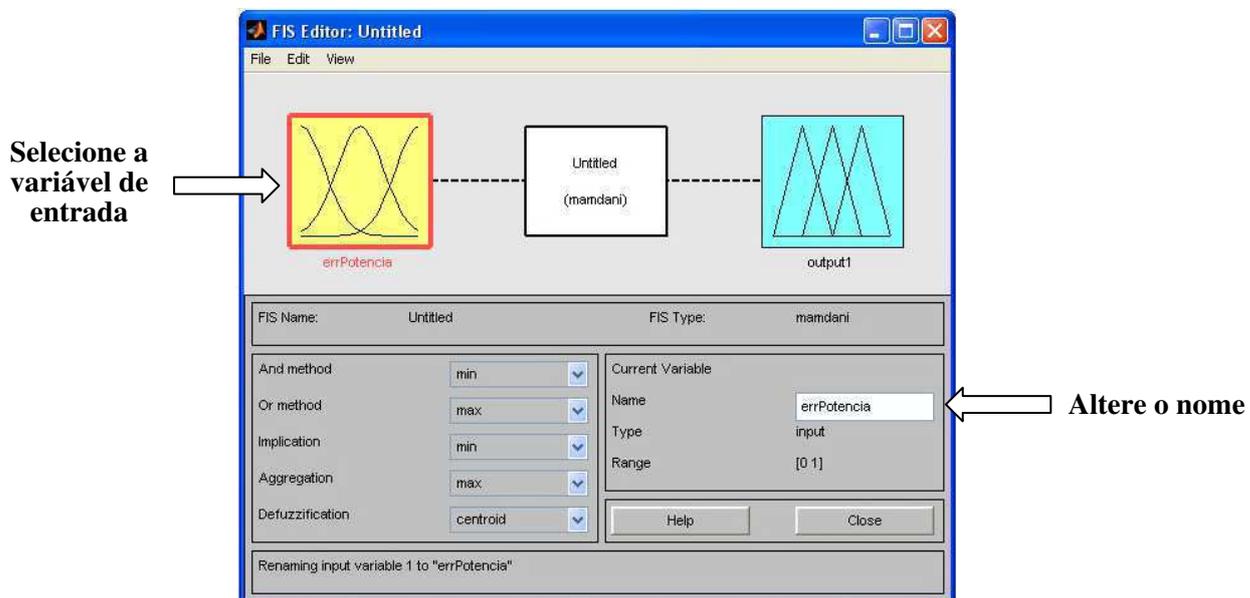


Figura 4 – Edição do nome da variável de entrada

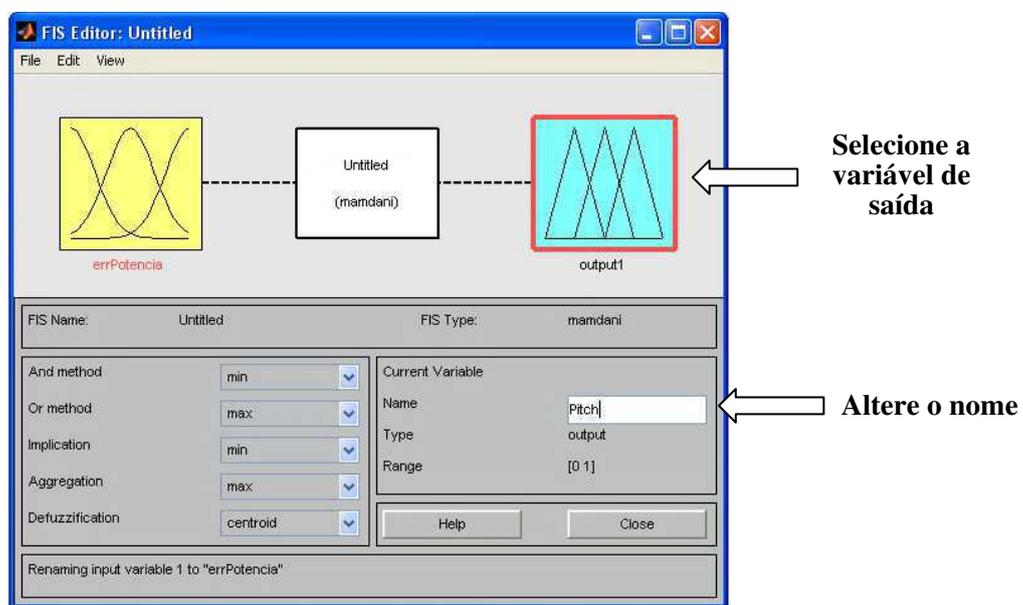


Figura 5 – Edição do nome da variável de saída

Com duplo clique na variável desejada acessamos a janela de edição de funções de pertinência. Como padrão, cada nova variável é iniciada com 3 funções de pertinência, essas podem ser removidas da seguinte forma:

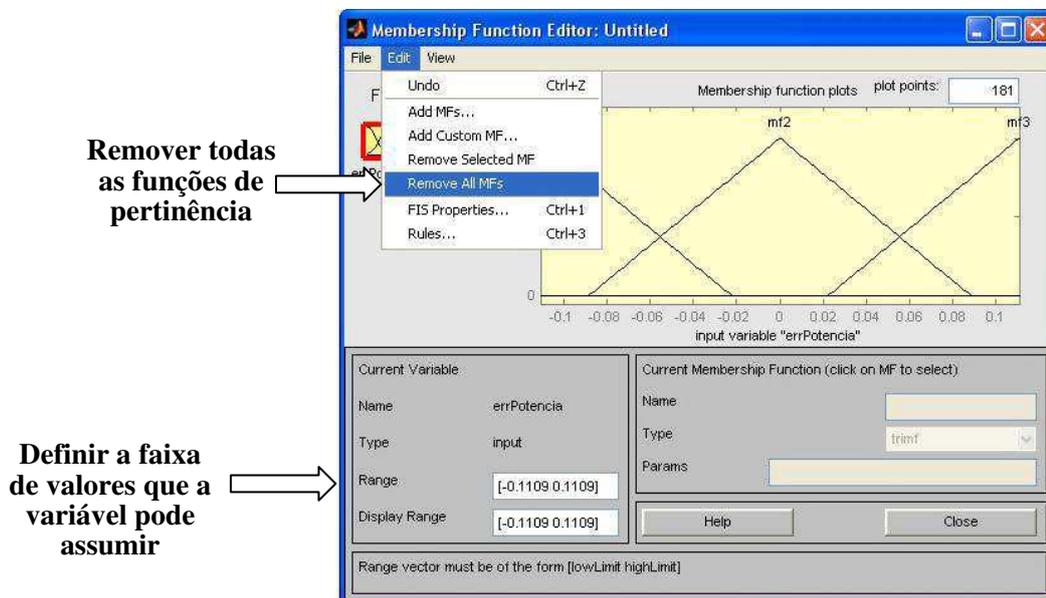


Figura 6 – Janela de edição de funções de pertinência referente à variável de entrada (erro de potência) e definição da faixa de valores que esta variável assume

Após a remoção podemos adicionar as funções específicas para o nosso problema, que no caso constará de cinco funções triangulares e duas trapezoidais.

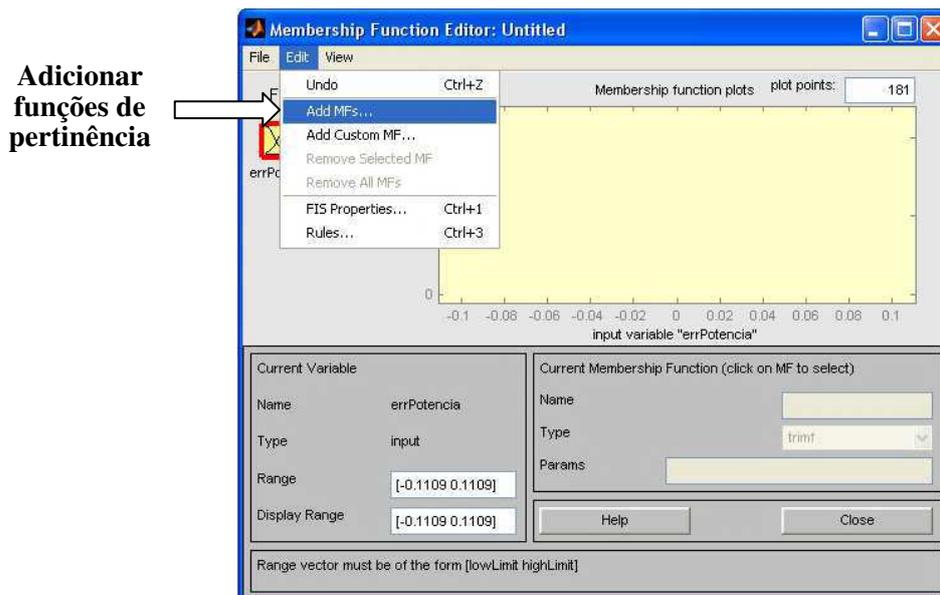


Figura 7 – Adição de funções de pertinência

Após escolher *add MFs*, ficará disponível a janela a seguir. As funções com mesmo formato podem ser inseridas simultaneamente, bastando para isso selecionar o tipo e a quantidade. Como se pode notar, existem diversos tipos de funções que podem ser utilizadas, por motivos já explicitados aqui serão utilizadas as funções triangulares e trapezoidais.



Figura 8 – Escolha das funções de pertinência a serem adicionadas

Após a inserção de todas as funções, estas podem ser posicionadas com o auxílio do mouse assim como podem ter seus limites definidos no campo “parâmetros”.

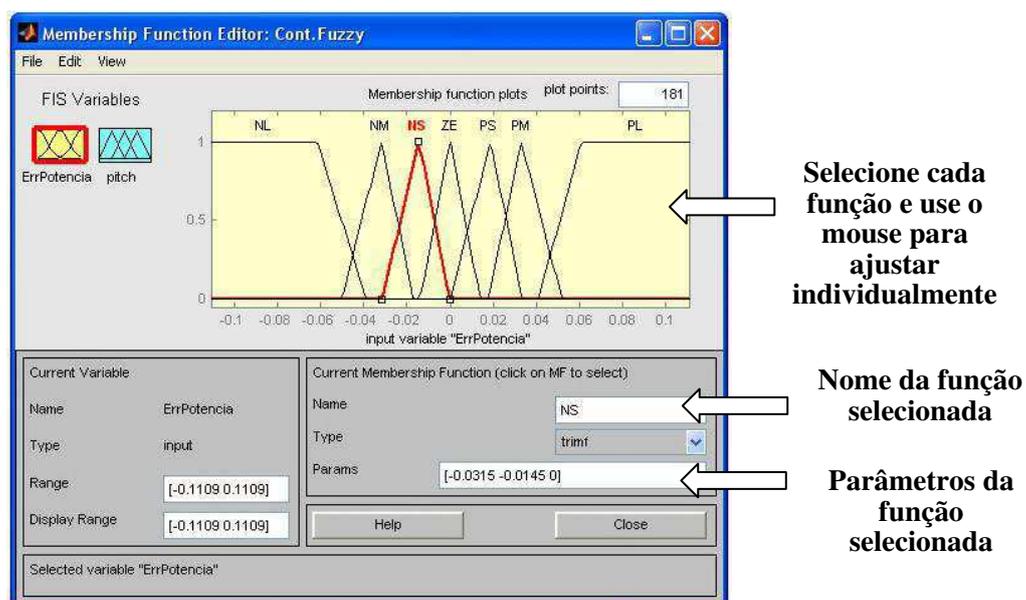


Figura 9 – Funções de entrada já definidas

O procedimento para a variável de saída é o mesmo.

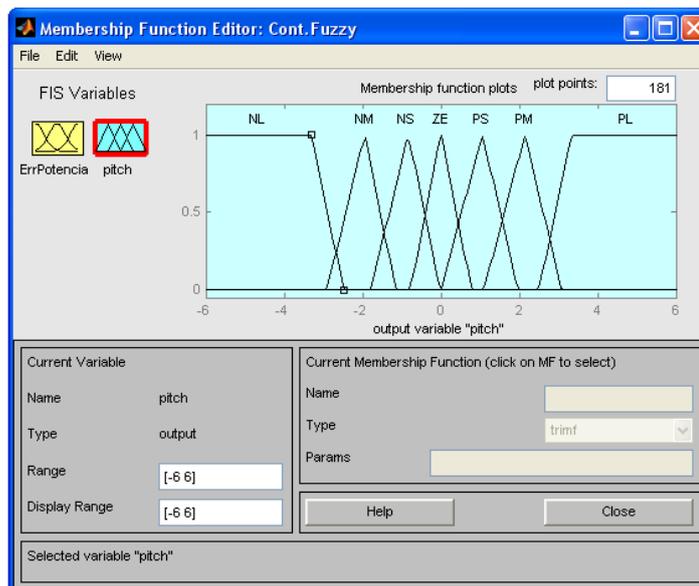


Figura 10 – Funções de saída já definidas

Ao fim destas etapas o sistema estará assim

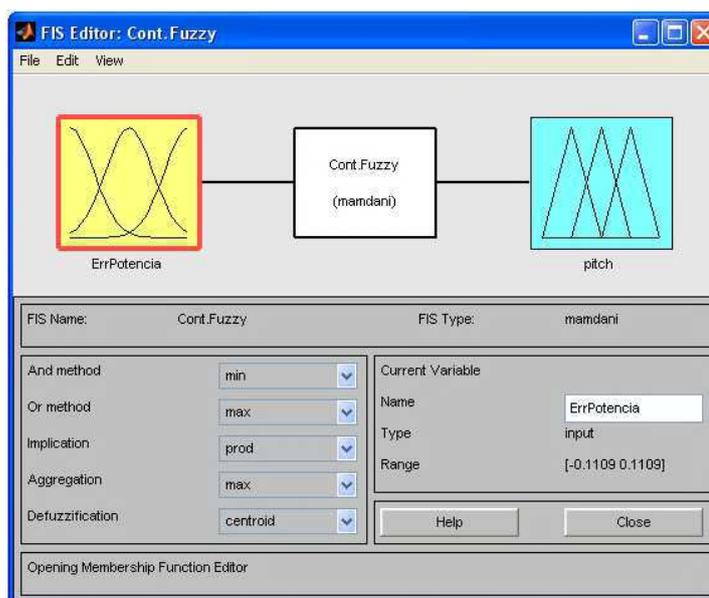


Figura 11 – Sistema com as variáveis de entrada e saída já definidas

Agora a base de regras pode ser definida de acordo com o mapa de regras que foi apresentado na tabela 5.1, apresentada novamente abaixo.

Tabela 1 – Base de regras para a variação do ângulo

$\Delta P$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$\beta_{var}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL

Para tanto, através de duplo clique no bloco do centro da figura anterior temos acesso ao editor de regras.

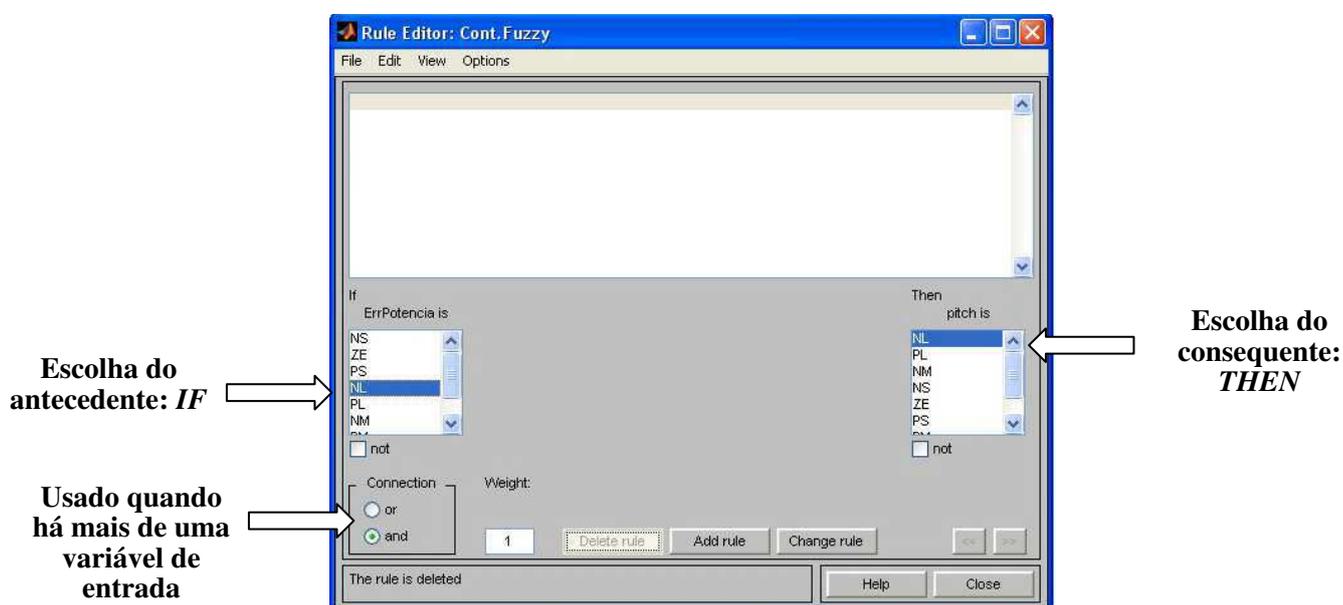


Figura 12 – Editor da base de regras

Após adicionadas todas as regras da base, o sistema está pronto pra ser utilizado.

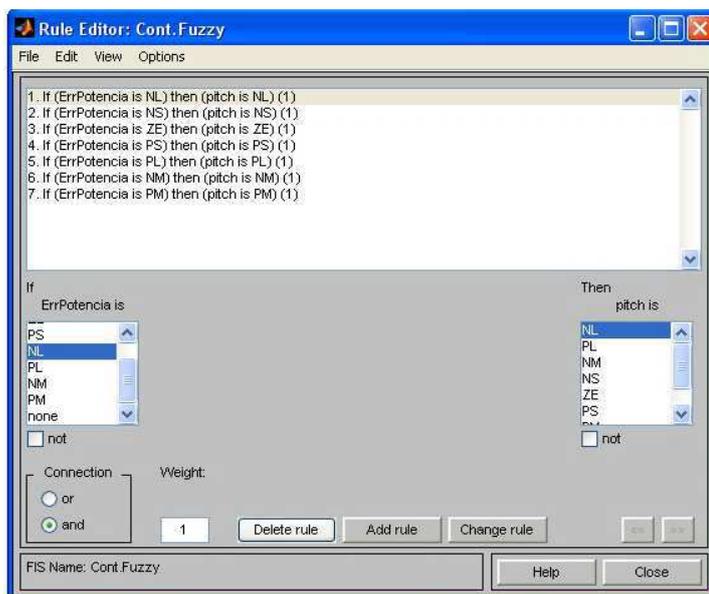


Figura 13 – Editor da base de regras

Finalizando, escolhemos as operações descritas na dissertação, como o método de implicação, agregação e a forma de defuzzificação.

**Escolha dos métodos de solução**

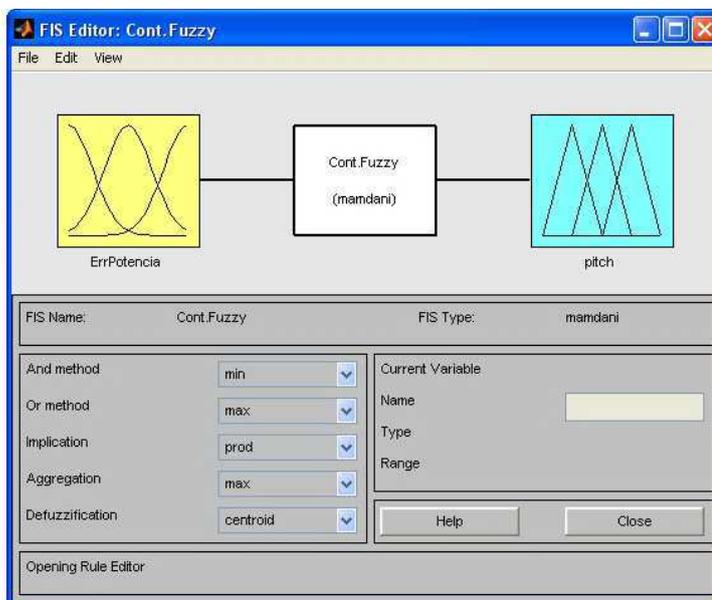


Figura 14 – Escolha dos métodos de solução

É possível fazer a visualização das regras e interagir colocando diferentes valores de entrada para ver quais regras são ativadas, é também possível ver a região final utilizada na defuzzificação.

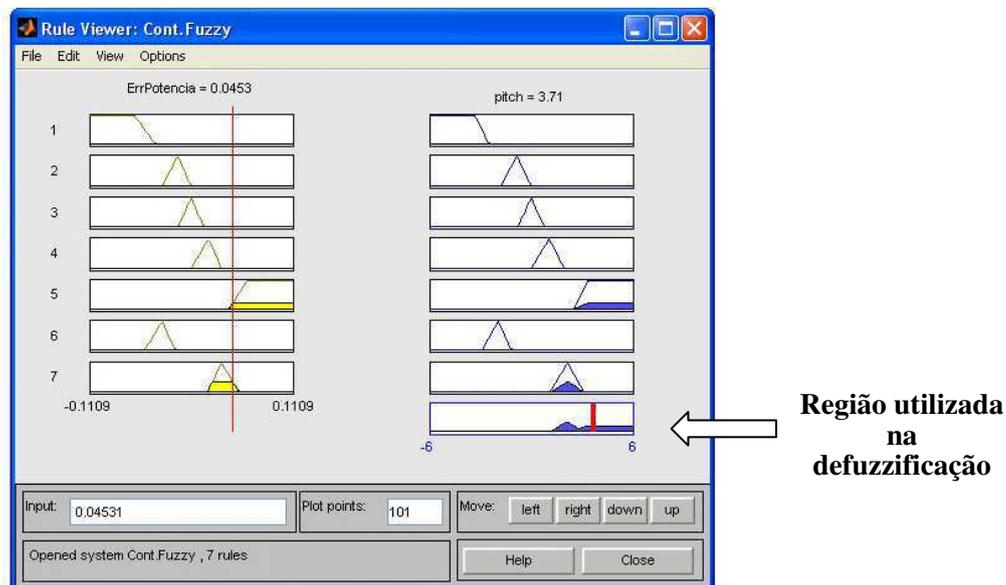


Figura 15 – Visualização das regras e sua interação com um determinado valor de entrada.

Salvar a estrutura como um arquivo .fis

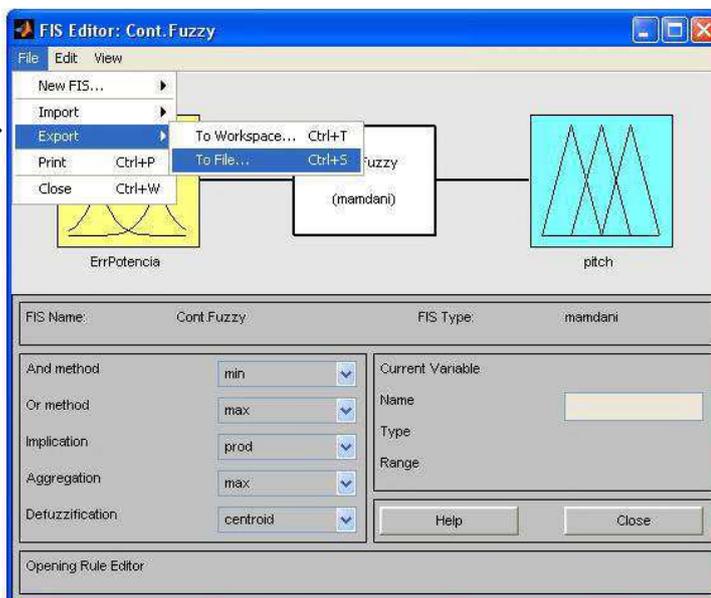
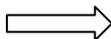


Figura 16 – Salvar o arquivo

O *Fuzzy Logic Toolbox™* gera um arquivo com extensão .fis que pode ser utilizado através do comando *readfis*.

No Programa de Simulação Dinâmica foram inseridos os comandos para que este avalie o controle *fuzzy* durante as simulações. Tais comandos foram:

- Carregar o arquivo .fis para utilização: `FIS = readfis('ContFuzzy.fis')`
- Avaliar o valor de entrada no controle *fuzzy*: `pitch = evalfis(erroPotencia, FIS)` para obter o ângulo de pitch.

Dessa forma, carrega-se o arquivo .fis apenas uma única vez, e a cada iteração do programa a avaliação do erro é feita, resultando no novo ângulo.

## ANEXO A – Dados do sistema teste

Valores Bases para o sistema de conversão em p.u.:

- Potência Base: 100 MVA
- Tensões Base: 0.69 kV para barramentos de baixa Tensão e 63 kV para barramentos de média tensão.

Tabela 1 – Parâmetros do Gerador de Indução convencional

$P_n(MW)$	$V_n(kV)$	$R_s(\Omega)$	$X_s(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	$X_r(\Omega)$	$X_m(\Omega)$
0.66	0.69	0.0067	0.03	0.0058	0.0506	2.3161

$N^\circ$ de polos	$H$ (p.u.)	cap (kVAR)	$\omega$ (r.p.m)
4	4	300	1500

Tabela 2 – Parâmetros da Turbina Eólica

$N^\circ$ de pás	Raio (m)	$N^\circ$ de turb.	Cx. de vel.
3	22	17	1:55

Vel. de cut in (m/s)	Vel. de cut off (m/s)	Dens. do ar
4	25	1.225

Tabela 3 – Dados da rede do sistema simulado

Barra DE	Barra PARA	$R(p.u.)$	$X(p.u.)$	$B(p.u.)$
1	4	0.04312	0.1864	0.05557
1	6	0.06198	0.26102	0.07860
2	14	0	0.1250	-
3	4	0.0779	0.1970	-
3	7	0.07302	0.10471	-
3	14	0.3642	0.52910	-
4	6	0.04889	0.20509	0.060339
5	6	0.0730	0.1047	-
5	14	0.1421	0.3224	-
6	15	0.0779	0.1970	-
7	8	0	0.3922	-
9	15	0	0.1000	-
10	11	0.04046	0.12558	-
10	14	0.1421	0.3224	-
10	15	0.0967	0.2506	-
11	12	0.07302	0.10471	-
12	13	0	0.3922	-

Tabela 4 – Resultados da resolução do problema do fluxo de carga inicial para a rede teste utilizada (condições iniciais para simulação dinâmica)

<i>Número</i>	<i>Nome</i>	<i>Tensão (p. u.)</i>	<i>Tensão (V)</i>	<i>ângulo (deg)</i>	<i>Carga</i>		<i>Geração</i>	
					<i>MW</i>	<i>Mvar</i>	<i>MW</i>	<i>Mvar</i>
1	1	1.05	66.15	0			48.71	2.96
2	2	1.05	14.49	-0.48			25	12.72
3	3	1.00462	63.291	-3.4	27.5	10.5		
4	4	1.03176	65.001	-2.24				
5	5	1.00817	63.514	-3.86	25	9		
6	6	1.0242	64.525	-3.27	39	7		
7	7	1.01083	63.682	-2.95				
8	8	1.01304	0.699	-1.19			8	-3
9	9	1.05	14.49	0.63			36	10.66
10	10	1.00585	63.369	-3.09	35	12.6		
11	11	1.00977	63.615	-2.31				
12	12	1.01741	64.097	-1.66				
13	13	1.01761	0.702	0.73			11	-5
14	14	1.03528	65.223	-2.12				
15	15	1.04041	65.546	-1.26				

Os dados dos demais controladores se encontram em (Lopes e Almeida, 2004b).