

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**Micael Marcio Oliveira**

**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA  
POTÊNCIA (MPPT) SEM USO DE SENSORES  
MECÂNICOS PARA AEROGERADORES DE PEQUENO  
PORTE**

**Alegrete  
2018**



Micael Marcio Oliveira

**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA  
POTÊNCIA (MPPT) SEM USO DE SENSORES  
MECÂNICOS PARA AEROGERADORES DE PEQUENO  
PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

**Alegrete  
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

048e Oliveira, Micael Marcio  
Estratégia de rastreamento de máxima potência (MPPT) sem o uso de sensores mecânicos para aerogeradores de pequeno porte / Micael Marcio Oliveira.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto".

1. Conversor Sensorless. 2. Estratégia MPPT. 3. Lógica Fuzzy. 4. Aerogeradores de Pequeno Porte. I. Título.

MICAEL MARCIO OLIVEIRA

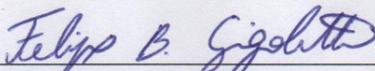
**ESTRATÉGIA DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) SEM USO DE SENSORES MECÂNICOS PARA AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência

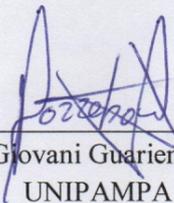
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 4 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:



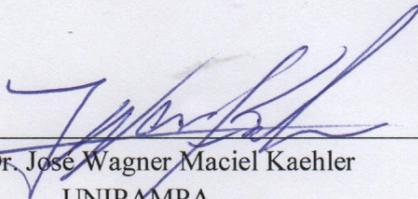
---

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto  
Orientador



---

Prof. Dr. Giovani Guarienti Pozzebon  
UNIPAMPA



---

Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler  
UNIPAMPA



*Aos meus pais Cleide e Joel pelo apoio e carinho dedicados a mim em toda minha trajetória acadêmica, sem os quais seria impossível a realização desse trabalho.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre presente na minha vida, me dando forças e me guiando através das dificuldades enfrentadas até o presente momento.

Aos meus pais, por todo esforço em me proporcionar condições para estudar, muitas vezes desistindo dos próprios sonhos em prol dos meus. Aos meus irmãos e familiares que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado.

À minha querida Francieli Dambros, pelo amor e amizade que cultivamos em todos esses anos, cuja presença tornou essa caminhada muito mais especial. Aos seus pais e familiares, que me acolheram e me ajudaram desde que me conheceram.

Ao meu orientador prof. Felipe Grigoletto por todo o auxílio prestado no decorrer deste trabalho. Ao prof. José Wagner, por disponibilizar o grupo de pesquisas Eire e pelo incentivo à pesquisa. Ao prof. John Jeffersson, pelo auxílio na elaboração da programação do controlador. Aos outros professores que ajudaram, direta ou indiretamente.

Às amizades feitas durante o curso, em especial ao João Paulo e Eduardo. Aos colegas do grupo Eire e do estágio, pela ajuda nos momentos de dificuldades acadêmicas e profissionais.



*“Persistence is the shortest path to success.”*

Charles Chaplin.



## RESUMO

A escassez de recursos naturais e o aquecimento global tem demandado o uso de fontes renováveis de energia, cenário este, que tem incentivado a geração de energia eólica em escala nacional e mundial. Com relação a geração em pequena escala, muitos dos sistemas não possuem mecanismos para manter pequenos aerogeradores em seu ponto ótimo, visto a natureza estocástica do vento que são submetidos. Neste contexto, são apresentadas duas estratégias de rastreamento do ponto de máxima potência (*maximum power point tracking* - *MPPT*) empregadas em aerogeradores de baixa potência. São abordadas as características físicas da conversão de energia eólica, além do desenvolvimento de um modelo para simulação do sistema de conversão, que engloba um emulador do aerogerador, um conversor *CC-CC Boost* para o processamento de energia e um circuito gerador de séries temporais de velocidade do vento. Primeiramente é apresentado um algoritmo de Perturbação e Observação (P&O) com incremento fixo. Posteriormente, é exposto um algoritmo MPPT baseado em lógica *Fuzzy*, desenvolvido no ambiente de simulação dos *software MATLAB Simulink*<sup>®</sup> e *PSIM*<sup>®</sup>, sendo este também implementado em linguagem *C*. Por fim, os resultados das simulações são apresentados para evidenciar as vantagens e desvantagens de cada estratégia MPPT.

**Palavras-chave:** Conversor *Sensorless*. Estratégia MPPT. Lógica *Fuzzy*. Aerogeradores de pequeno porte.



## ABSTRACT

The lack of natural resources and global warming has called for the use of renewable energy sources, a scenario that has encouraged the generation of wind energy on a national and global scale. Regarding small-scale generation, many of the systems do not have mechanisms to keep small wind turbines at their optimum, due the stochastic nature of the wind they are subjected to. In this context, two maximum power point tracking (MPPT) strategies are presented for low power wind turbines. The physical characteristics of the wind energy conversion are discussed, as well as the development of a model for the simulation of the conversion system, which includes a wind turbine emulator coupled to the generator, a Boost CC-CC converter for energy processing and a generator circuit of time series of wind speed. First, a perturbation and Observation algorithm (P&O) with fixed increment is presented. Afterwards, a MPPT algorithm based on Fuzzy logic was developed in the simulation environment of the MATLAB Simulink<sup>®</sup> and PSIM<sup>®</sup> software, and it is also implemented in C language. Lastly, simulation results are presented to show the advantages and disadvantages of each MPPT strategy.

**Keywords:** Sensorless Converter. MPPT strategy. Fuzzy Logic. Wind Turbines.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada mundial de geração de energia eólica.	27
Figura 2 – Evolução da capacidade instalada brasileira de geração de energia eólica.	28
Figura 3 – Distribuição de <i>Rayleigh</i> aplicada a diversas velocidades anuais de vento.	32
Figura 4 – Modelo teórico da extração de energia do vento. . . . .	34
Figura 5 – Curvas coeficientes de potência em função de TSR para vários modelos de pás eólicas. . . . .	37
Figura 6 – Potência mecânica em função da velocidade mecânica ( $\omega$ ) com variação da velocidade do vento. . . . .	38
Figura 7 – Diagrama de funcionamento do algoritmo PSF. . . . .	39
Figura 8 – Exemplo de uma rede neural artificial aplicada à métodos de busca MPPT. . . . .	40
Figura 9 – Lógica de funcionamento do algoritmo <i>P&amp;O</i> . . . . .	41
Figura 10 – Estágios da estratégia <i>Fuzzy</i> . . . . .	41
Figura 11 – Coeficientes a serem definidos na função de pertinência triangular. . . .	42
Figura 12 – Coeficientes a serem definidos na função de pertinência trapezoidal. . .	43
Figura 13 – Circuito convencional do Conversor <i>Boost</i> . . . . .	45
Figura 14 – Formas de onda nos principais componentes do Conversor <i>Boost</i> . . . . .	46
Figura 15 – Circuito emulador do coeficiente $C_p$ . . . . .	49
Figura 16 – Curva do coeficiente $C_p$ . . . . .	50
Figura 17 – Potência mecânica com a variação das velocidades do gerador e do vento, para o modelo equivalente da turbina. . . . .	50
Figura 18 – Circuito emulador da turbina eólica acoplado ao gerador PMSG. . . . .	53
Figura 19 – Diagrama do circuito gerador de séries temporais de velocidade do vento.	54
Figura 20 – Circuito emulador da estratégia <i>P&amp;O</i> . . . . .	54
Figura 21 – Esquema da estratégia <i>Fuzzy</i> . . . . .	55
Figura 22 – Circuito do controlador <i>Fuzzy</i> desenvolvido no <i>software MATLAB Simulink</i> <sup>®</sup> . . . . .	55
Figura 23 – Funções de pertinência entrada $P_{Erro}$ . . . . .	56
Figura 24 – Funções de pertinência entrada $V_{C_{Erro}}$ . . . . .	57
Figura 25 – Funções de pertinência de saída. . . . .	57
Figura 26 – Superfície <i>Fuzzy</i> . . . . .	58
Figura 27 – Circuito do controlador <i>Fuzzy</i> desenvolvido no <i>MATLAB Simulink</i> <sup>®</sup> para segunda estratégia MPPT. . . . .	59
Figura 28 – Funções de pertinência entrada $P_{Erro}$ , segunda estratégia MPPT. . . . .	59
Figura 29 – Funções de pertinência entrada $V_{C_{Erro}}$ , segunda estratégia MPPT. . . . .	60
Figura 30 – Funções de pertinência de saída, segunda estratégia MPPT. . . . .	60

Figura 31 – Superfície <i>Fuzzy</i> resultante da segunda estratégia MPPT. . . . .	61
Figura 32 – Sequência de funcionamento do controlador <i>Fuzzy</i> através de linha de código. . . . .	62
Figura 33 – Tensão de linha na saída do gerador. . . . .	63
Figura 34 – Corrente de linha na saída do gerador. . . . .	64
Figura 35 – Velocidade no eixo de acoplamento do sistema. . . . .	64
Figura 36 – Tensão sobre o capacitor na saída do retificador. . . . .	65
Figura 37 – Potência elétrica e mecânica do sistema. . . . .	65
Figura 38 – Potência gerada com amplitude de $V_{cont}$ igual a 5. . . . .	66
Figura 39 – Potência gerada com amplitude de $V_{cont}$ igual a 0,02. . . . .	66
Figura 40 – Potência gerada com ajuste de $T_i$ igual a 20. . . . .	67
Figura 41 – Potência gerada com ajuste de $T_i$ igual a 0,02. . . . .	67
Figura 42 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com algoritmo <i>Fuzzy</i> . . . . .	68
Figura 43 – Comportamento do sistema com variação da velocidade do vento, para estratégia P&O. . . . .	68
Figura 44 – Comportamento do sistema com variação da velocidade do vento, para estratégia <i>Fuzzy</i> . . . . .	69
Figura 45 – Perfil da velocidade do vento com $v_a = 7m/s$ . . . . .	70
Figura 46 – Perfil da velocidade do vento com $v_a = 10m/s$ . . . . .	70
Figura 47 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com $v_a = 7m/s$ . . . . .	71
Figura 48 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com $v_a = 10m/s$ . . . . .	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de $C_p$ para uma turbina horizontal de três pás. . . . .	37
Tabela 2 – Dados utilizados na configuração do bloco gerador PMSG. . . . .	52
Tabela 3 – Regras de relação das funções de pertinência. . . . .	56
Tabela 4 – Regras de relação das funções de pertinência adotadas para segunda estratégia MPPT. . . . .	59



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Nível Alto
B	Nível Baixo
<i>Boost</i>	Conversor elevador de tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
C-o-A	Centro-da-Área
C-o-M	Centro-do-Máximo
MA	Nível Médio Alto
MB	Nível Médio Baixo
MCC	Modo de condução contínuo
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
M-o-M	Média-do-Máximo
MME	Ministério de Minas e Energia
NA	Nível Negativo Alto
NB	Nível Negativo Baixo
PA	Nível Positivo Alto
PB	Nível Positivo Baixo
P&O	Perturbação e Observação
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PSF	<i>Power Signal Feedback</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
REN21	<i>Global Renewable Energy Policy Network</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
Zero	Nível Zero



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Desvio padrão de turbulência
$\beta$	Ângulo de passo
$\rho$	Densidade do ar
$\lambda$	<i>Tip Speed Ratio</i>
$\lambda_1$	Relação $\lambda$ e $\beta$
$\Theta$	Constante do teorema do valor final
$A$	Área de cobertura das turbinas
$B(x, y)$	Função beta de <i>Euler</i>
$c$	Fator de escala
$C$	Capacitância do capacitor do conversor <i>Boost</i>
$C_{Boost}$	Capacitor do conversor <i>Boost</i>
$C_p$	Coefficiente de potência
$C_1$ a $C_6$	Coefficientes construtivos da turbina eólica
$D$	Razão cíclica da chave do conversor <i>Boost</i>
$D_b$	Diodo do conversor <i>Boost</i>
$DT$	Período da chave semicondutora fechada
$d$	Distância da coluna de vento
$E$	Energia cinética
$\Delta E$	Variação da energia cinética
$f$	Frequência de chaveamento conversor <i>Boost</i>
$f_p$	Função de pertinência
$f_r$	Função distribuição de <i>Rayleigh</i>
$F_w$	Função densidade de probabilidade de <i>Weibull</i>
$G_{Karman}$	Função filtro <i>von Karman</i>

$h$	Altura da torre da turbina
$\Delta i_L$	Variação de corrente no indutor
$J_r$	Momento de inércia rotor da turbina
$J_g$	Momento de inércia gerador
$k$	Fator de forma
$K_F$	Ganho filtro <i>von Karman</i>
$k_\sigma$	Coefficiente de turbulência longitudinal
$L$	Indutância indutor do conversor <i>Boost</i>
$L_{Boost}$	Indutor do conversor <i>Boost</i>
$L_t$	Comprimento de turbulência
$L_d$	Indutância de eixo direto do gerador
$L_q$	Indutância de eixo de quadratura do gerador
$L_{min}$	Indutância mínima para modo de condução contínua
$m$	Massa do ar
$m_p$	Coefficiente função de pertinência
$m_g$	Elemento típico da função de pertinência gaussiana
$n_p$	Coefficiente função de pertinência
$P$	Potência mecânica da turbina eólica
$P_o$	Polos do gerador
$P_{Erro}$	Erro entre a potência o passo anterior e atual
$\Delta P$	Variação da potência
$r$	Raio das pás da turbina eólica
$r_1$ e $r_2$	Variáveis aleatórias
$r_a$	Variável aleatória
$r_{wn}$	Ruído gaussiano
$R$	Resistência do resistor do conversor <i>Boost</i>

$R_{Boost}$	Resistor do conversor <i>Boost</i>
$R_s$	Resistência série do gerador
$S$	Chave semicondutora
$T$	Período que a chave semicondutora permanece aberta
$T_i$	Constante de tempo do integrador
$T_F$	Constante de tempo
$T_s$	Frequência de discretização
$T_r$	Torque rotor da turbina
$T_g$	Torque rotor do gerador
$t$	Tempo
$u$	Centróide da área
$u_i$	Posição do centróide
$u_{OUT}$	Área de uma função de pertinência após a inferência
$v$	Velocidade do vento
$v_a$	Velocidade média anual do vento
$v_t$	Série temporal de turbulência
$\bar{v}$	Velocidade média do vento em 10 minutos
$v_{med}$	Velocidade média do vento entre as pás da turbina
$Vol$	Volume da massa de ar
$v_o$	Velocidade do vento antes da pá
$V_s$	Tensão elétrica na entrada do <i>Boost</i>
$V_o$	Tensão elétrica na saída do <i>Boost</i>
$\Delta V$	Variação da tensão elétrica
$V$	Tensão elétrica
$V_{pk}$	Tensão de pico de linha
$V_{C_{Erro}}$	Erro entre a tensão sobre o capacitor passo anterior e atual

$\omega$	Velocidade mecânica da turbina eólica
$\omega_m$	Velocidade mecânica do eixo do gerador
$x$	Coefficiente construtivo da turbina eólica
$x_p$	Coefficiente função de pertinência
$x_g$	Coefficiente função de pertinência gaussiana

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	Caracterização do problema	29
1.2	Justificativa	29
1.3	Objetivos	30
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>31</b>
2.1	Sistema de Conversão de Energia Eólica	31
2.1.1	Séries temporais de velocidade do vento	31
2.1.2	Energia extraída do vento	34
2.1.3	<i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) e ângulo de passo	36
2.1.4	Coefficiente $C_p$ em relação a $\lambda$ e $\beta$ .	37
2.2	Técnicas de Rastreamento do Ponto Máximo de Potência	38
2.2.1	Exemplos de algoritmos MPPT	38
2.2.2	Algoritmo MPPT por Perturbação e Observação ( <i>P&amp;O</i> )	40
2.2.3	Algoritmo MPPT por lógica <i>Fuzzy</i>	41
2.2.3.1	Funções de pertinência	42
2.2.3.2	Fuzzificação	43
2.2.3.3	Regras de inferência <i>Fuzzy</i>	44
2.2.3.4	Defuzzificação	44
2.3	Conversores Estáticos	45
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>49</b>
3.1	Modelo Equivalente da Turbina Eólica	49
3.2	Gerador de Séries Temporais de Velocidade do Vento	53
3.3	Estratégia MPPT com Algoritmo Perturbação e Observação	54
3.4	Estratégia MPPT com Lógica <i>Fuzzy</i> - Primeiro Método	55
3.5	Estratégia MPPT com Lógica <i>Fuzzy</i> - Segundo Método	58
3.6	Controlador <i>Fuzzy</i> em Linguagem <i>C</i>	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>63</b>
4.1	Resultados da Estratégia Perturbação e Observação	63
4.2	Resultados da Estratégia <i>Fuzzy</i>	67
4.3	Comparações entre as Estratégias <i>Fuzzy</i> e <i>P&amp;O</i>	68
4.4	Aplicação das Séries Temporais à Estratégia <i>Fuzzy</i>	69
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>73</b>
5.1	Trabalhos Futuros	73
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

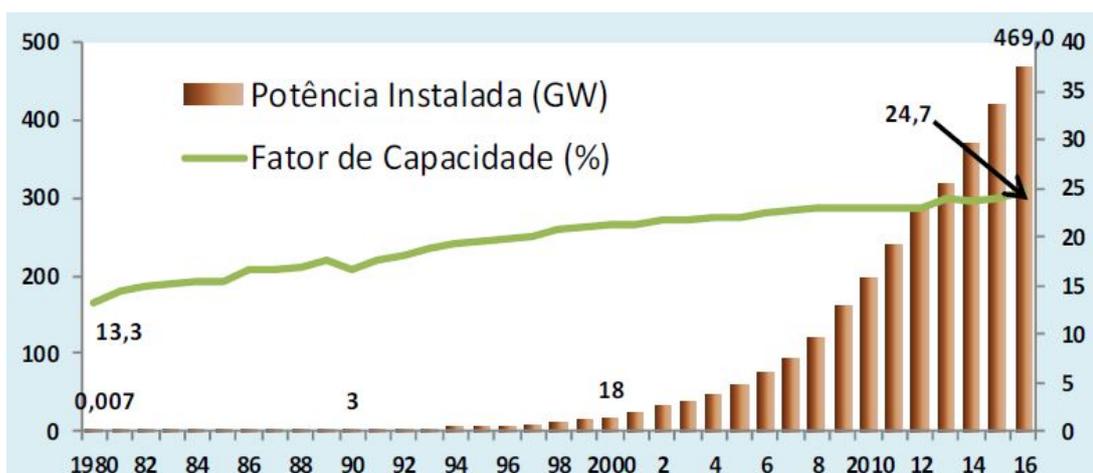
Anexos	79
ANEXO A Código fonte do Controlador <i>Fuzzy</i> desenvolvido no <i>block</i> <i>C</i> do <i>software PSIM</i> <sup>®</sup> . . . . .	81

## 1 INTRODUÇÃO

O impacto ambiental causado pela utilização de combustíveis fósseis tem preocupado tanto a comunidade científica quanto a população mundial. Temas contemporâneos como o aumento do aquecimento global, a escassez de recursos energéticos e aumento da demanda mundial de energia tem sido debatidos a exaustão. A opção pela energia gerada através de fontes nucleares acompanha um alto risco de acidentes com proporções catastróficas, além da complexidade do descarte do lixo radioativo gerado. Já o aproveitamento das fontes de energia hidráulicas esbarra no fato de que são necessárias grandes áreas para represamento, uma vez que, os maiores potenciais já foram explorados. Nesse cenário, as fontes de energias renováveis, como energia solar e eólica, têm despontado como alternativas viáveis para substituir fontes de energia altamente poluentes provenientes de combustíveis fósseis (REN21, 2017).

Em relação à energia eólica, a capacidade instalada deste tipo de geração incrementa-se gradualmente, sendo que, no ano de 2013, a capacidade global foi elevada em 354,67GW, chegando a um total de 318,117GW (MISHRA et al., 2015) e no ano de 2016 a um total de 469GW (MME, 2017). Atenta-se para um fator que corrobora seu uso, o fato de a mesma ser uma energia limpa, não produzindo gases como o  $CO_2$ , além de ser uma energia infinita e abundante no planeta, visto que, o vento está em constante fluxo. Uma síntese da evolução da capacidade instalada de energia eólica a nível mundial é demonstrada na Figura 1.

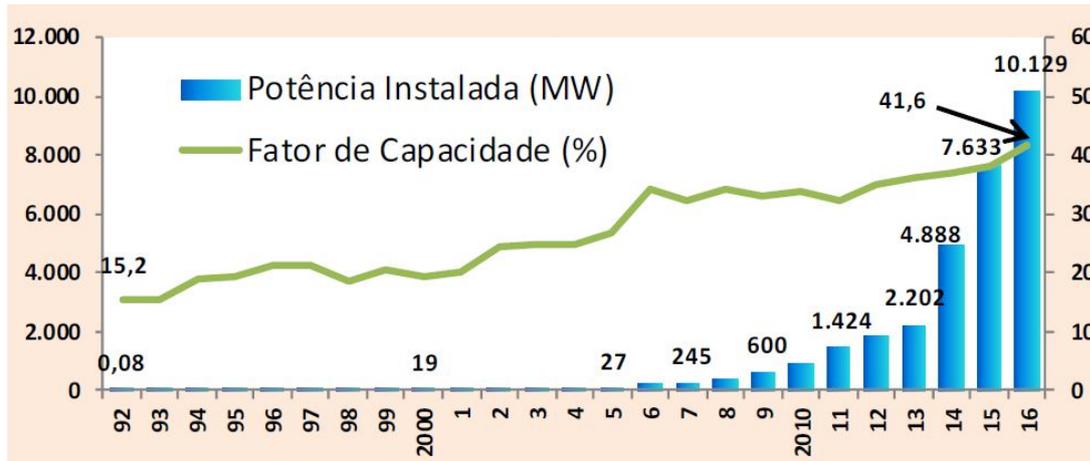
Figura 1 – Evolução da capacidade instalada mundial de geração de energia eólica.



Fonte – (MME, 2017).

No Brasil, o uso desse tipo de fonte de energia tem recebido incentivos por meio de leilões específicos e financiamentos governamentais (MME, 2017). A Figura 2 expõe a evolução da capacidade instalada entre os anos 1980 e 2016.

Figura 2 – Evolução da capacidade instalada brasileira de geração de energia eólica.



Fonte – (MME, 2017).

Como o fluxo de vento é mais constante em certas regiões dependendo da geografia do local, os sistemas de geração eólica que usam geradores de grande porte, que são mais eficientes, são alocados em grandes centros de geração, denominados parques eólicos. Devido a grande incidência de ventos nesses locais, a energia é gerada em grande escala. Porém, com a popularização dos conceitos de geração distribuída e consumidores autossustentáveis, a geração por pequenos sistemas eólicos tem aumentado significativamente. Nesse modelo de geração são empregadas pequenas turbinas eólicas, que podem ser interligadas a rede de energia elétrica, chamado de modo *on grid*, ou alimentar a carga de forma independente, conhecido como modo *stand-alone*, onde a estocagem de energia elétrica é feita através de bancos de baterias. Outro fato que tem disseminado a implantação de pequenos geradores, especificamente no Brasil, é a possibilidade do consumidor repassar o excedente de geração para rede da concessionária de energia elétrica. A legislação vigente atual permite em certas situações que o consumidor repasse seus excedentes para consumir futuramente, fato que facilita o uso de uma fonte de energia não constante como a eólica (MME, 2017).

Outro aspecto para o aumento do uso da energia eólica são os novos materiais magnéticos utilizados nos geradores, com o aumento na produção de ímãs de terras raras, dentre eles o neodímio. Com isso, os geradores com ímãs permanentes (*Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG*) são largamente empregados em pequenas turbinas eólicas, pois, além de permitir a operação com velocidade variável, podem dispensar o emprego de caixas de engrenagens com a utilização de grande número de pólos no gerador. Isto reduz a manutenção e resulta em alta eficiência (HUSSEIN et al., 2010). Em sistemas mais modernos, os geradores síncronos com ímãs permanentes necessitam de conversores estáticos que processem a energia gerada. No sistema *on grid*, pode-se empregar um conversor CC-CC para o processamento da potência entregue pelo gerador, além de um conversor CC-CA, para conectar o sistema de geração com a rede elétrica.

## 1.1 Caracterização do problema

Apesar dos aspectos positivos relacionados aos sistemas eólicos, cabe notar que a potência disponível é variável devido a natureza estocástica do vento (PINTO, 2013). Isto gera a necessidade de se controlar variáveis associadas ao processamento de energia. A potência mecânica máxima entregue pela turbina é alcançada quando se tem uma relação ótima entre a velocidade na ponta da pá com a velocidade do vento, sendo esta relação conhecida como *Tip Speed Ratio (TSR)* (MUSUNURI; GINN, 2011). Contudo, para sistemas de pequeno porte, os ângulos de passo das pás são fixos, o que impossibilita essa variação. Como essa relação também depende da rotação do rotor, seria necessário estabelecer uma velocidade rotórica de acordo com a velocidade do vento para um determinado valor ótimo, que pode ser realizado com o controle da potência na saída do gerador. Porém, na maioria dos sistemas convencionais apenas uma ponte retificadora é utilizada para converter a tensão do gerador para uma tensão contínua, sendo a saída ligada diretamente a um banco de baterias. Este problema pode ser solucionado com a utilização de um conversor CC-CC, para realizar o gerenciamento da potência fornecida pelo gerador, que necessita de um controle para realizar a variação da tensão de saída. Neste controle são utilizadas técnicas de rastreamento do ponto máximo de potência, *maximum power point tracking (MPPT)*. Essas técnicas geralmente empregam sensores para realizar medições de velocidade, elevando muito o custo do sistema.

## 1.2 Justificativa

A geração de energia elétrica com máxima eficiência é fundamental para evitar desperdícios e diminuir os custos da implantação do sistema. Assim, o desenvolvimento de técnicas de conversão que aproveitem ao máximo a potência eólica disponível se torna imprescindível. Neste contexto, os principais sistemas utilizados atualmente para pequenas turbinas eólicas não dispõem destas técnicas, possibilitando o desenvolvimento de novas estratégias. Outro fator que deve ser explorado é o uso de novas metodologias para controle MPPT, utilizando técnicas de controle inteligente para solucionar os problemas de maximização, que podem ser úteis para uso nos conversores para geradores eólicos. A não utilização de sensores de velocidade também deve ser levada em consideração, conhecido como controle *sensorless*. Sensores mecânicos utilizados para medição de velocidade do vento, da rotação e posição do rotor do gerador, como anemômetros, *encoder* e sensores de efeito *hall* dentre outros, possuem valor elevado e muitas vezes não é fisicamente possível instalá-los em turbinas de pequeno porte. Também se deve ponderar que os estudos de maximização de potência se concentram na potência mecânica, que tem pontos de máximos diferentes da potência elétrica (TIBOLA, 2009). Estas premissas não são consideradas em muitos dos trabalhos já realizados sobre sistemas de conversão de energia eólica. Em (ECHCHAACHOUAI et al., 2016), a técnica de perturbação e observação é implementada,

porém necessita-se conhecer parâmetros específicos da turbina, limitando o conversor à um modelo específico. Já em (KUMAR; PARIMI; RAO, 2015) e (HUI; BAKHSHAI; JAIN, 2011), é utilizada a técnica MPPT *Fuzzy*, na qual é empregada a medição de velocidade do gerador, situação que em pequenas turbinas eólicas muitas vezes não é viável, pelos motivos já citados.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver as estratégias MPPT Perturbação e Observação e *Fuzzy*, com a simulação de um conversor CC-CC para turbinas eólicas de pequeno porte utilizando as duas estratégias.

Para tanto, será desenvolvido um modelo equivalente da turbina eólica para simulação, com a escolha da topologia de conversor CC-CC, desenvolvimento das técnicas de controle MPPT Perturbação e Observação e *Fuzzy*, além da simulação de cada uma das estratégias nos ambientes de simulação dos *software MATLAB Simulink*<sup>®</sup> e *PSIM*<sup>®</sup>, a fim de verificar as vantagens que cada uma delas pode proporcionar. Também será implementada a estratégia *Fuzzy* através de linguagem de programação em conjunto com a aplicação de uma série temporal de velocidade do vento, com todo o desenvolvimento no ambiente de simulação do *software PSIM*<sup>®</sup>.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistema de Conversão de Energia Eólica

O vento pode ser definido como ar em movimento. Esse movimento é proporcionado pelo aquecimento desigual do planeta, que provoca a circulação das camadas de ar (PINTO, 2013). As diferentes zonas de pressão que se originam devido a superfície irregular da Terra e as diferenças de temperatura fazem com que haja inversão entre ar quente e frio, criando assim um deslocamento de ar, que possui uma energia cinética que pode ser convertida para outros usos através de geradores eólicos. A seguir são explorados os principais fundamentos dessa conversão.

#### 2.1.1 Séries temporais de velocidade do vento

Devido a natureza estocástica do vento, que torna sua velocidade uma variável aleatória contínua, há variações em sua velocidade média em escalas diárias, mensais e anuais. Para análise do perfil da velocidade do vento é necessária a utilização de uma função densidade de probabilidade, sendo frequentemente usada a função densidade de probabilidade de *Weibull*, dada por (2.1):

$$F_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.1)$$

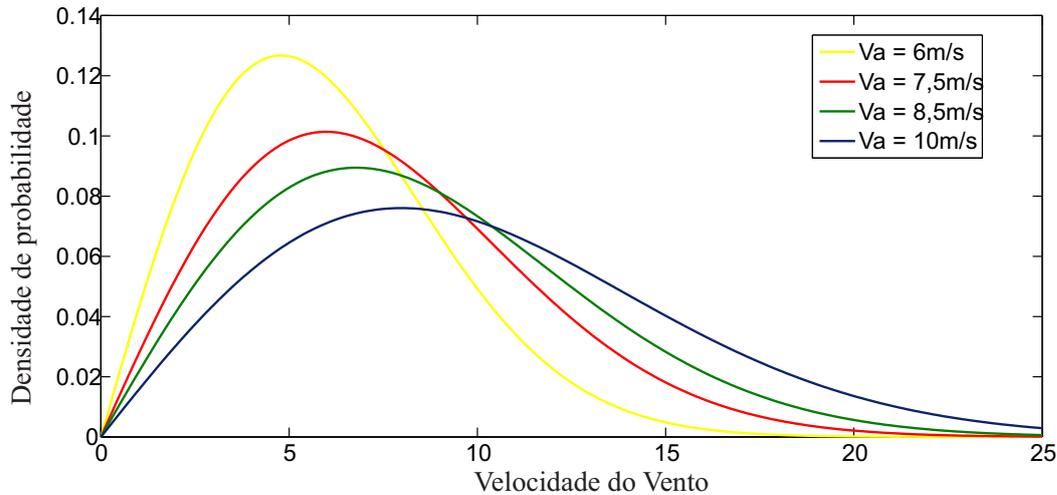
onde  $v$  é a velocidade do vento em  $\frac{m}{s}$ ,  $k$  é o fator de forma e  $c$  é o fator de escala. Uma simplificação dessa distribuição é obtida fazendo-se o fator de forma  $k = 2$ . Essa simplificação é conhecida como distribuição de *Rayleigh*. O fator de escala  $c$  está relacionado com a velocidade média anual ( $v_a$ ), através da equação (2.2).

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_a \quad (2.2)$$

Assim, é possível definir a distribuição de *Rayleigh* em termos da velocidade média anual e a velocidade do vento, conforme a equação (2.3).

$$F_r(v, v_a) = \frac{\pi v}{2v_a^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2} \quad (2.3)$$

A Figura 3 demonstra a distribuição de *Rayleigh* para várias velocidades médias anuais de vento  $v_a$ .

Figura 3 – Distribuição de *Rayleigh* aplicada a diversas velocidades anuais de vento.

Para efeitos de simulação, a velocidade do vento  $v$  pode ser relacionada com a velocidade média anual, aplicando a distribuição de *Rayleigh* para o cálculo da velocidade média com intervalos de 10 minutos. Utilizando a função de densidade de *Quantis*, considerando uma variável aleatória  $0 < r_a < 1$ , conforme expresso na equação (2.4) (MARTINS, 2010):

$$v = v_a \sqrt{-\frac{4}{\pi} \ln(1 - r_a)} \quad (2.4)$$

Considerando agora que através da equação (2.4),  $v$  disposto na equação (2.3), têm-se  $v = \bar{v}$ , onde  $\bar{v}$  é a velocidade média em 10 minutos (MARTINS, 2010). A variação de velocidade do vento dentre esse intervalo de 10 minutos é representado pelo modelo de turbulência, descrito na equação (2.5):

$$v(t) = \bar{v} + v_t(t) \quad (2.5)$$

onde  $v_t(t)$  é a série temporal de turbulência do vento em  $\frac{m}{s}$  e  $\bar{v}$  é a velocidade média do vento em 10 minutos.

A turbulência do vento está relacionada com a altitude e com a topografia do terreno, sendo que quanto mais próximo do solo maior será a sua influência na variação da velocidade. O desvio padrão de turbulência varia de acordo com o valor médio do vento,

como exposto pela equação (2.6):

$$\sigma(v_t) = k_\sigma \bar{v} \quad (2.6)$$

onde  $k_\sigma$  é o coeficiente de turbulência longitudinal, obtido através de medições de velocidade do vento. Da mesma forma é possível obter a constante de comprimento de turbulência  $L_t$ . Porém, essa pode ser aproximada pela equação (2.7):

$$L_t = 6,5h \quad (2.7)$$

onde  $h$  é a altura da torre da turbina em  $m$ . Através do filtro (2.8) é obtida a componente turbulenta  $v_t(t)$ , que é descrita pelo espectro de *von Karman*:

$$G_{karman}(s) = \frac{K_F}{(1 + sT_F)^{\frac{5}{6}}} \quad (2.8)$$

onde  $T_F$  é a constante de tempo e  $K_F$  é o ganho do filtro de *von Karman*. A constante  $T_F$  depende da velocidade média do vento e do comprimento da turbulência, como demonstrado na equação (2.9):

$$T_F = \frac{L_t}{\bar{v}} \quad (2.9)$$

Com relação ao ganho do filtro de *von Karman*  $K_F$ , utiliza-se a função beta de *Euler*  $B(x, y)$ , além da frequência de discretização  $T_s$  e a constante de tempo  $T_F$ . A equação (2.10) demonstra este cálculo:

$$K_F \approx \sqrt{\frac{2\pi T_F}{B(\frac{1}{2}, \frac{1}{3})T_s}} \quad (2.10)$$

O filtro descrito em (2.8) deve ser excitado por uma fonte de ruído gaussiano normalizado. Este ruído é uma síntese de duas variáveis aleatórias  $0 < r_1, r_2 < 1$ , descrito pela equação (2.11):

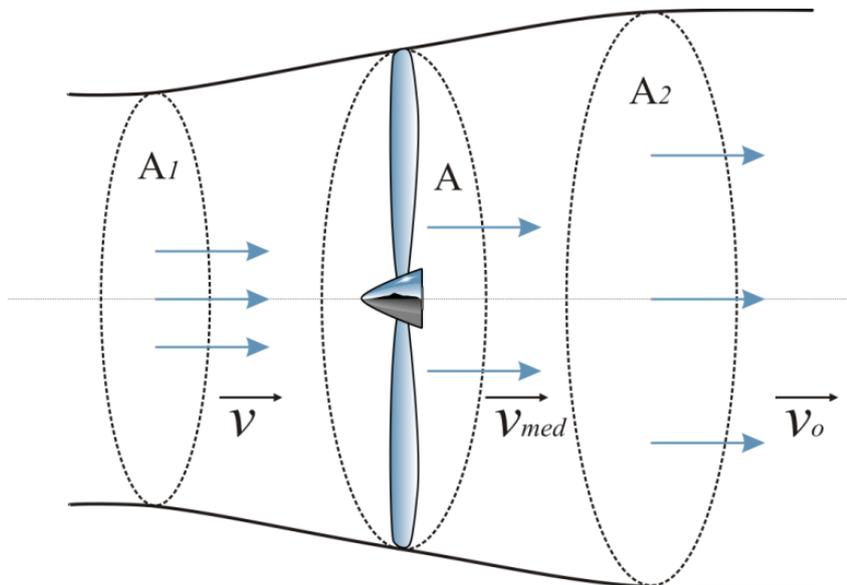
$$r_{wn} = \sqrt{-2 \ln(r_1)} \sin(2\pi r_2) \quad (2.11)$$

Com as equações da distribuição de *Rayleigh* e do filtro descrito pelo espectro de *von Karman*, pode-se gerar séries temporais de velocidade do vento, como base de tempo em segundos, por exemplo. Os efeitos da turbulência torna as simulações mais próximas das condições práticas nas quais as turbinas eólicas são submetidas.

### 2.1.2 Energia extraída do vento

Para compreender o efeito do vento sobre uma turbina eólica é necessário considerar a energia cinética de uma massa de ar em deslocamento. Observando-se um ponto anterior e posterior à pá da turbina, é possível perceber que a variação da energia cinética entre estes pontos é a energia cinética convertida em mecânica pelas pás, conforme demonstra a Figura 4.

Figura 4 – Modelo teórico da extração de energia do vento.



Fonte – (TIBOLA, 2009).

Considerando  $E$  a energia cinética da massa de ar anterior a pá, e  $E_o$  a energia cinética posterior a pá, temos  $\Delta E$  como:

$$\Delta E = E - E_o \quad (2.12)$$

Sendo a energia definida por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.13)$$

E a potência igual à variação de energia pelo tempo:

$$P = \frac{\Delta E}{t} \quad (2.14)$$

Aplica-se (2.13) e (2.14) à Figura 4, obtendo a equação (2.15):

$$P = \frac{1}{2} \frac{m}{t} (v^2 - v_o^2) \quad (2.15)$$

onde  $m$  é a massa do ar em  $kg$ ,  $t$  é o tempo em  $s$ ,  $v$  é a velocidade do vento antes das pás em  $\frac{m}{s}$ ,  $v_o$  é a velocidade do vento depois das pás em  $\frac{m}{s}$ .

Ainda considerando que a massa de um corpo pode ser expressa pela equação (2.16), o volume por (2.17) e a velocidade média por (2.18), é possível redefinir a equação (2.15) como demonstrado em (2.19):

$$m = \rho Vol \quad (2.16)$$

$$Vol = Ad \quad (2.17)$$

$$v_{med} = \frac{d}{t} = \frac{v + v_o}{2} \quad (2.18)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{A}{2} (v + v_o) (v^2 - v_o^2) \quad (2.19)$$

onde  $A$  é a área de cobertura das pás da turbina em  $m^2$ ,  $\rho$  é a densidade do ar em  $\frac{Kg}{m^3}$  e  $d$  é a distância da coluna de vento em  $m$ . Organizando matematicamente os termos da equação (2.19), obtêm-se a expressão (2.20):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{(1 + \frac{v_o}{v}) [(1 - (\frac{v_o}{v})^2)]}{2} \quad (2.20)$$

Analisando a equação (2.20), é possível observar que há um termo que define a parcela de potência absorvida pela turbina, o qual está relacionado com as velocidades do

vento antes e depois da pá. Este termo é conhecido como Coeficiente de Potência ( $C_p$ ) e está demonstrado em (2.21).

$$C_p = \frac{(1 + \frac{v_0}{v})(1 - (\frac{v_0}{v})^2)}{2} \quad (2.21)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p \quad (2.22)$$

Também é possível obter o valor máximo para  $C_p$ , assumindo um coeficiente para relação  $\frac{v_0}{v}$ , substituindo este em (2.21) e aplicando o teorema do valor final.

$$\Theta = \frac{v_0}{v} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial \Theta} = \frac{1 + \Theta - \Theta^2 + \Theta^3}{2} = 0 \quad (2.24)$$

Encontrando-se o valor de  $\Theta$  e substituindo esse valor em (2.21), obtém-se um valor máximo de  $C_p$  de 0,5926, sendo este o limite teórico de potência determinado pelo teorema de *Betz*. Este teorema diz que por mais sofisticada que a máquina eólica seja, ela nunca superará um coeficiente de potência maior que o limite de *Betz* (PINTO, 2013).

### 2.1.3 Tip Speed Ratio (TSR) e ângulo de passo

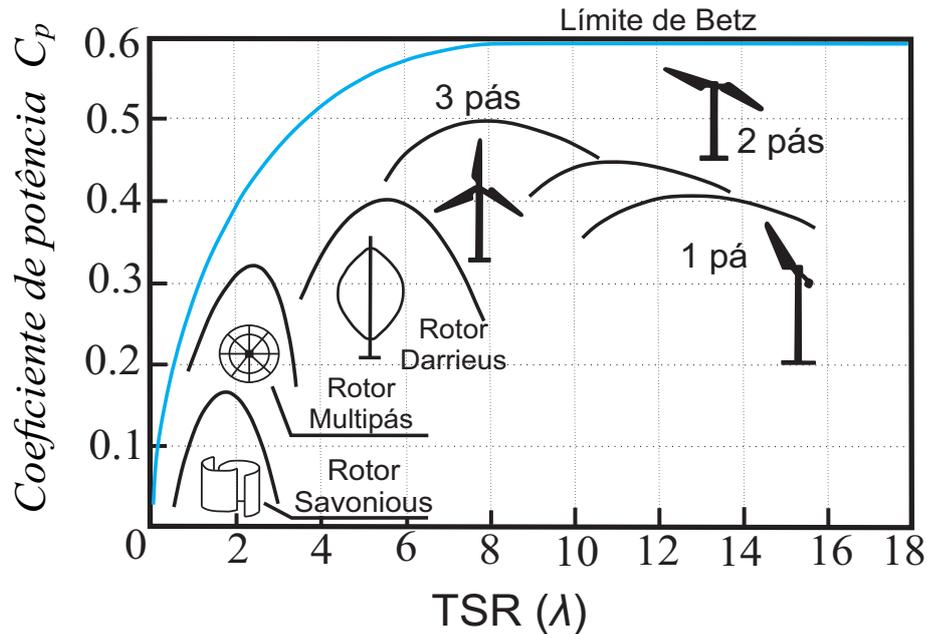
Conforme visto anteriormente, o coeficiente TSR relaciona a velocidade na ponta da pá com a velocidade do vento, sendo a velocidade na ponta da pá proporcional a velocidade no eixo da turbina. Este fator pode ser considerado como um coeficiente de rendimento entre a potência útil e a potência axial (PINTO, 2013). O TSR ( $\lambda$ ) também é representado por (2.25).

$$\lambda = \frac{r\omega}{v} \quad (2.25)$$

onde  $r$  é raio da turbina em  $m$ , e  $\omega$  é a velocidade angular da turbina em  $\frac{rad}{s}$ .

Já o ângulo de passo ( $\beta$ ) tem relação com o aspecto construtivo da pá (ECKSTEIN, 2012). Os coeficientes  $\lambda$  e  $\beta$  são extremamente importantes para determinar o coeficiente de potência  $C_p$ . Cada tipo de turbina apresentará várias curvas de potência e torque em relação ao TSR conforme a variação de  $\beta$ . A Figura 5 demonstra a variação do TSR para um  $\beta$  ótimo em vários modelos de turbinas eólicas.

Figura 5 – Curvas coeficientes de potência em função de TSR para vários modelos de pás eólicas.



Fonte – Adaptado de (WILSON; LISSAMAN, 1974).

Com relação a turbina de 3 pás, mais comumente usada em sistemas eólicos de pequeno porte, é possível observar o coeficiente  $C_p$  e seu comportamento característico, que deverá ser reproduzido na simulação do sistema eólico real.

#### 2.1.4 Coeficiente $C_p$ em relação a $\lambda$ e $\beta$ .

O coeficiente de potência na prática é função do TSR e do ângulo de passo. Esta relação pode ser aproximada para uma função não linear, demonstrado em (2.26) e (2.27).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2\lambda_1 - C_3\beta - C_4\beta^x - C_5)e^{-C_6\lambda_1} \quad (2.26)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.27)$$

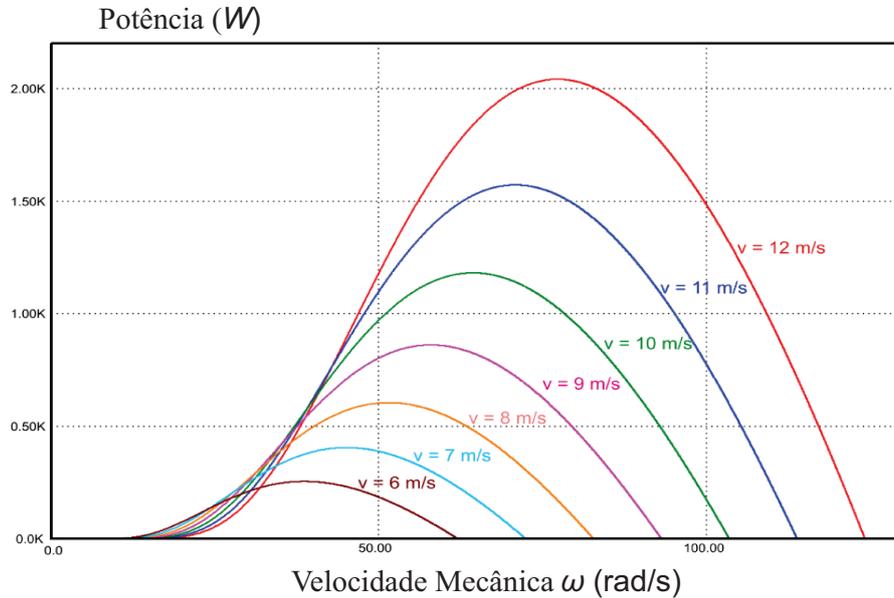
Os coeficientes  $C_1$  a  $C_6$  e  $x$  dependem das características construtivas da turbina. A Tabela 1 demonstra valores dos coeficientes para uma turbina de passo fixo e três pás (HEIER, 2006).

Tabela 1 – Coeficientes de  $C_p$  para uma turbina horizontal de três pás.

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$x$	$\beta$
0.5	116	0.4	0	5	21	1.5	10

Utilizando esses valores de coeficientes, foi realizado em (TIBOLA, 2009) uma simulação da variação da potência em relação a velocidade angular do rotor para vários valores de velocidade do vento, que pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Potência mecânica em função da velocidade mecânica ( $\omega$ ) com variação da velocidade do vento.



Fonte – Adaptado de (TIBOLA, 2009).

Pelas curvas vistas na Figura 6, é possível observar que para cada valor de velocidade, há um valor máximo de potência mecânica, sendo este o ponto de máxima potência mecânica que o sistema pode operar.

## 2.2 Técnicas de Rastreamento do Ponto Máximo de Potência

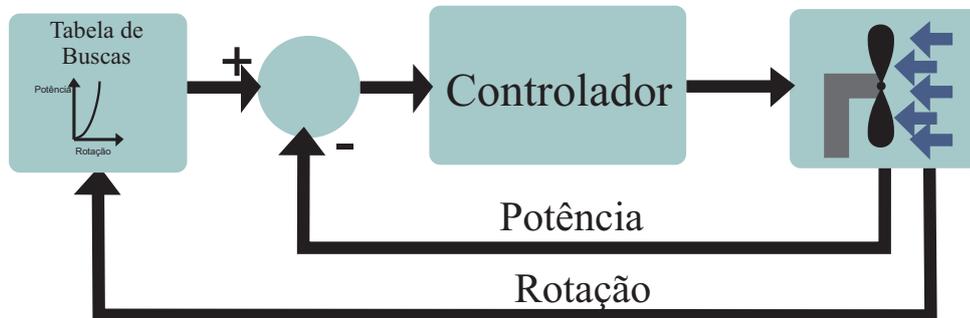
Conforme já analisado, é preciso atingir o TSR ótimo para a máxima potência ser obtida. Assim, deve-se controlar a velocidade do rotor da turbina com auxílio de algoritmos de rastreamento do ponto máximo de potência. Os algoritmos baseados em sensores mecânicos realizam a medição das variáveis velocidade do vento e do rotor por meio destes sensores, e assim, atingem o valor máximo de potência. Já os algoritmos *sensorless*, que não utilizam sensores de medição de velocidade, se baseiam em métodos matemáticos para estimar os parâmetros da turbina e assim encontrar o valor máximo de potência, sendo estes abordados nessa seção.

### 2.2.1 Exemplos de algoritmos MPPT

Os algoritmos de resposta do sinal de potência, *Power Signal Feedback (PSF)*, utilizam as informações da curva potência por velocidade do rotor, previamente obtidas por testes ou simulações, como sinal de referência. Sendo assim, o controle faz uma comparação

entre esses valores e os valores reais da turbina em funcionamento e aplica as correções necessárias. Um esquemático de seu funcionamento pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de funcionamento do algoritmo PSF.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Esse método tem a desvantagem de necessitar um alto conhecimento dos parâmetros da turbina a ser utilizada (MISHRA et al., 2015).

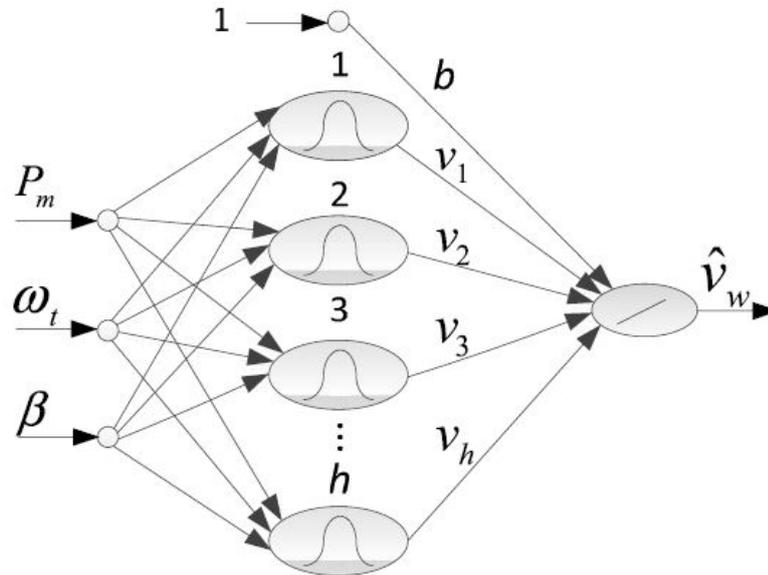
Outro método que pode ser utilizado é a estratégia *Theoretical*, que consiste em criar conexões teóricas entre as variáveis de controle e encontrar o ponto de máxima potência. Em (AMEI et al., 2002) a potência do gerador e a tensão de saída são funções da razão cíclica do conversor CC-CC, assim como a frequência rotacional do gerador, de modo a obter-se o ponto de máxima potência.

Também são utilizados controles adaptativos, que usualmente estimam alguns parâmetros, em associação com outros métodos de busca MPPT. Em (MULLANE; LIGHTBODY; YACAMINI, 2001) é exposto um método de linearização de resposta para estimar parâmetros de um gerador de indução com rotor do tipo gaiola de esquilo. Já em (HUI; BAKHSHAI, 2008) um controle adaptativo é usado em conjunto com um algoritmo de perturbação e observação, uma tabela de buscas e vetor programável, treinados para atualizar as referências de velocidade.

Já as redes neurais artificiais são constituídas por neurônios artificiais que são programados para simular o funcionamento do neurônio humano. São usualmente compostas de três camadas: entrada, camada escondida e camada de saída, porém existem casos de duas ou uma única camada compor a rede. As camadas escondidas podem conter um número diverso de neurônios interligados por pesos sinópticos, que são responsáveis pelo grau de atuação da rede. A Figura 8 apresenta um exemplo de uma rede neural artificial.

O processo de treinamento da rede consiste em ajustar os pesos sinápticos a tal ponto que a rede adquira a capacidade de generalizar suas ações, podendo assim tomar decisões, separar padrões, etc. As variáveis de entrada para uma rede neural usada em controle MPPT de sistemas eólicos, podem ser: a velocidade do vento, velocidade do rotor, tensão terminal, dentre outras. A variável de saída normalmente é usada como sinal de referência, como velocidade do vento, velocidade do rotor, ciclo de chaveamento para o conversor, etc (BHANDARE; BANDEKAR; MANE, 2013).

Figura 8 – Exemplo de uma rede neural artificial aplicada à métodos de busca MPPT.



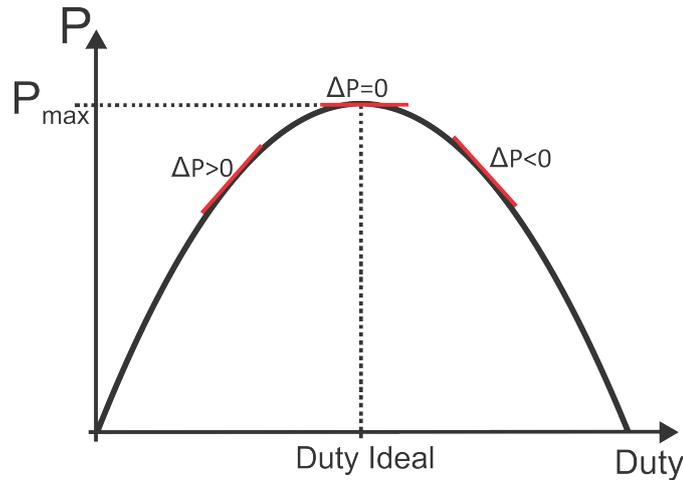
Fonte – (ZHAO et al., 2013).

### 2.2.2 Algoritmo MPPT por Perturbação e Observação (P&O)

O método Perturbação e Observação (P&O), provoca a perturbação de uma variável (por ex. razão cíclica) e analisa se houve um aumento ou decréto da variável controlada. Esta estratégia atua através da variação da velocidade ou a tensão terminal do gerador em pequenos degraus. Por exemplo, se a variação da potência  $\Delta P$  e a variação da tensão  $\Delta V$ , na relação  $\Delta P/\Delta V$  tiver o mesmo sinal que  $\Delta V$ , indica que o a potência está em direção ao ponto de máximo, então continua-se incrementando  $V$ , caso o sinal seja negativo, decrementa-se  $V$ . Quando a relação  $\Delta P/\Delta V$  é aproximadamente zero, têm-se o ponto de máxima potência (BHANDARE; BANDEKAR; MANE, 2013). Este funcionamento é ilustrado na Figura 9.

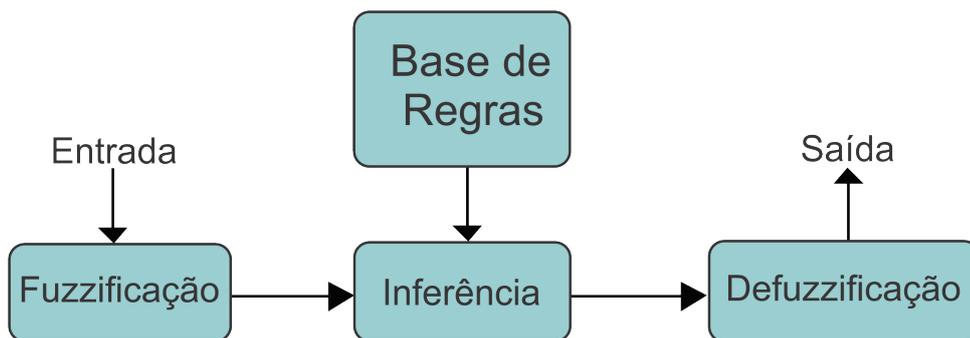
Esta estratégia possui um algoritmo de rápida implementação, contudo possui a desvantagem de não conseguir chegar ao ponto máximo de potência quando a inércia do sistema é elevada ou haja mudanças abruptas na velocidade do vento (MISHRA et al., 2015). Em (HUSSEIN et al., 2010), (TIBOLA, 2009) e (LAHFAOUI et al., 2015), são utilizados algoritmos P&O com incremento fixo, que apesar de apresentar um dinâmica mais lenta, são os métodos menos complexos.

Para acelerar a convergência do algoritmo, são utilizados coeficientes que variam o incremento, como realizado por (DALALA et al., 2013) e (KOTTI; JANAKIRAMAN; SHIREEN, 2014). Nestas abordagens, a variação de  $\Delta V$  também é considerada, além da variação da corrente. A estas variações são associados coeficientes, que aumentam o passo longe do ponto máximo, e diminuem este nas proximidades do ponto de máxima potência.

Figura 9 – Lógica de funcionamento do algoritmo *P&O*.

### 2.2.3 Algoritmo MPPT por lógica *Fuzzy*

O avanço tecnológico associado ao desenvolvimento de processadores digitais de sinais possibilitou a utilização de métodos de inteligência artificial para aplicar algoritmos MPPT em sistemas eólicos (MISHRA et al., 2015). Desta forma, a utilização de algoritmos MPPT baseados em lógica *Fuzzy* para controlar sistemas não lineares tem aumentado consideravelmente (MUSUNURI; GINN, 2011). O controlador *Fuzzy* possui basicamente três estágios: fuzzificação da entrada, tabela de regras bases, e defuzzificação, representados na Figura 10.

Figura 10 – Estágios da estratégia *Fuzzy*.

No primeiro estágio, as entradas são convertidas em variáveis linguísticas com base em funções de pertinência. No segundo estágio, uma tabela de regras base é configurada a partir do conhecimento da resposta do sistema a vários estímulos. No último estágio acontece a defuzzificação, convertendo-se as variáveis linguísticas em numéricas, com base em outra função de pertinência. A principal vantagem deste método deve-se a razão de não ser necessário conhecimento das equações que regem o sistema, apenas seu comportamento.

Porém, a definição das regras bases pode ser complexa, e o sistema poderá se tornar lento quando cálculos são realizados *online* (MISHRA et al., 2015).

As variáveis de entrada normalmente usadas no controle *Fuzzy* são erro de potência  $\Delta P$ , e a variação nesse erro ou  $\Delta P$  e  $\Delta V$ . Em (KUMAR; PARIMI; RAO, 2015),  $\Delta P$  e a variação de  $\Delta P$ , fornecidos por um estágio P&O, são utilizados por um algoritmo *Fuzzy* para obter-se o ponto máximo de potência. A variação da tensão  $\Delta V$ , por exemplo, foi utilizada por (ZENG; CHANG; SHAO, 2008) para obter-se a potência máxima. As principais etapas do algoritmo são descritas detalhadamente a seguir.

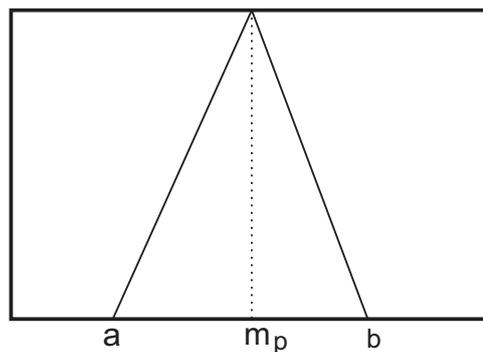
### 2.2.3.1 Funções de pertinência

As funções de pertinência refletem as informações mais relevantes sobre as ações do sistema *Fuzzy*. Estas podem ser definidas como funções numéricas, que têm como objetivo conferir valores de pertinência *Fuzzy* para valores discretos provenientes das variáveis de entrada, dentre o intervalo numérico que essa possa assumir (SHAW; SIMOES, 1999). Quanto maior o número de funções utilizado, maior a precisão, porém maior é a demanda por capacidade computacional. Os formatos das funções mais comumente utilizados são triângulos e trapézios, de simples implementação. Contudo, quando se deseja um desempenho suave, pode-se adotar funções do tipo gaussiana, sigmoide, dentre outras. Os rótulos linguísticos por estas usados podem ser definidos de uma maneira intuitiva para cada tipo de controle. Para uma função triangular, pode-se expressá-la através de (2.28) (PEDRYCZ; GOMIDE, 2007):

$$f_p(x_p) = \begin{cases} 0, & \text{se } x_p \leq a \\ \frac{x_p - a}{m_p - a}, & \text{se } x_p \in [a, m_p) \\ \frac{b - x_p}{b - m_p}, & \text{se } x_p \in [m_p, b] \\ 0, & \text{se } x_p \geq b \end{cases} \quad (2.28)$$

A ilustração dos termos da equação (2.28) podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Coeficientes a serem definidos na função de pertinência triangular.



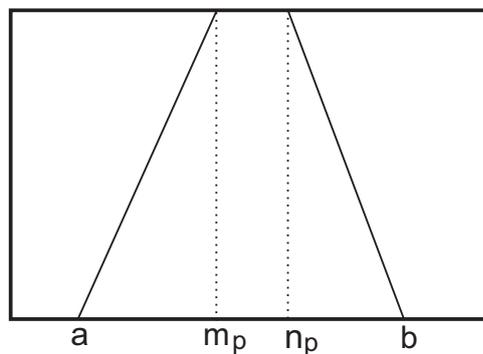
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Já para as funções de pertinência do tipo trapezoidal, têm-se a seguinte expressão (2.29):

$$f_p(x_p) = \begin{cases} 0, & \text{se } x_p < a \\ \frac{x_p - a}{m_p - a}, & \text{se } x_p \in [a, m_p) \\ 1, & \text{se } x_p \in [m_p, n_p) \\ \frac{b - x_p}{b - n_p}, & \text{se } x_p \in [n_p, b] \\ 0, & \text{se } x_p > b \end{cases} \quad (2.29)$$

A Figura 12 ilustra os termos que compõem a equação (2.29).

Figura 12 – Coeficientes a serem definidos na função de pertinência trapezoidal.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Com relação às funções de pertinência com desempenho suave, uma das mais frequentemente utilizadas é a do tipo gaussiana, que tem sua expressão exposta em (2.30):

$$f_p(x_g, m_g, \sigma) = e^{\left(-\frac{(x_g - m_g)^2}{\sigma^2}\right)} \quad (2.30)$$

onde  $m_g$  representa o elemento típico de  $f_p$  e  $\sigma$  a distribuição de  $f_p$ .

### 2.2.3.2 Fuzzificação

A fuzzificação consiste em transferir para o domínio *Fuzzy* o mapeamento de números reais pertencentes às variáveis de entrada. Para essas variáveis há atribuições de valores linguísticos e descrições qualitativas, que são definidas através de funções de pertinência aplicadas às elas. Pode ser considerado também uma pré-seleção de classes ou categorias dos sinais de entrada, o que reduz os dados a serem processados (SHAW; SIMOES, 1999).

A fuzzificação pode ser realizada por meio de vetores de possibilidades, onde um único valor discreto gera um conjunto *Fuzzy* e este através das funções de pertinência gera vetores de possibilidades. Outro método de fuzzificação consiste em acelerar o processo por meio de uma tabela armazenada na memória.

### 2.2.3.3 Regras de inferência *Fuzzy*

As regras de inferência são as regras utilizadas para realizar a implicação *Fuzzy*, podendo ser do modo afirmativo (*modus ponens*) ou modo negativo (*modus tollens*). A inferência *Fuzzy* relaciona conjuntos *Fuzzy* com a utilização do modo afirmativo, para os conjuntos linguísticos de entrada, conforme expresso em (2.31):

$$\text{SE } \langle \text{condições} \rangle \text{ ENTÃO } \langle \text{conclusão} \rangle \quad (2.31)$$

A inferência também pode ser expressa por (2.32):

$$\text{SE } \langle \text{antecedente} \rangle \text{ ENTÃO } \langle \text{consequente} \rangle \quad (2.32)$$

A implicação ou inferência *Fuzzy* é aplicada a todo conjunto de regras e usualmente é do tipo máx-mín ou máx-produto. No modelo máx-mín, o processo de agregação, onde são combinados os conjuntos *Fuzzy* de entrada, o operador mín utiliza o conectivo  $E$ , com o truncamento do conjunto resultante. Já o operador máx-produto também utiliza o conectivo  $E$ , porém com o escalonamento da saída.

Na operação de combinação, que realiza a composição das saídas, ambos os métodos utilizam o operador máx, com a aplicação do conectivo  $OU$ , combinando os máximos valores obtidos nos conjuntos *Fuzzy* de saída.

### 2.2.3.4 Defuzzificação

O processo de defuzzificação visa produzir um único valor discreto *Fuzzy* de saída, resultado do processo de fuzzificação e inferência. Esse valor origina-se de uma variável linguística inferida, podendo ser interpretado como o valor que melhor representa a distribuição de possibilidades. Os métodos de defuzzificação mais utilizados são: Centro-da-Área (C-o-A), Centro-do-Máximo (C-o-M) e Média-do-Máximo (M-o-M).

Com relação ao método Centro-da-Área, que será utilizado posteriormente nesse trabalho, este tem como base o cálculo do centróide da área que representa o termo *Fuzzy*, que é uma composição das contribuições de todas as regras de saída. Esse cálculo é realizado através de seguinte equação:

$$u = \frac{\sum_{j=1}^N u_i u_{OUT}(u_i)}{\sum_{j=1}^N u_{OUT}(u_i)} \quad (2.33)$$

onde  $u_{OUT}(u_i)$  é a área de uma função de pertinência após a inferência e  $u_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual.

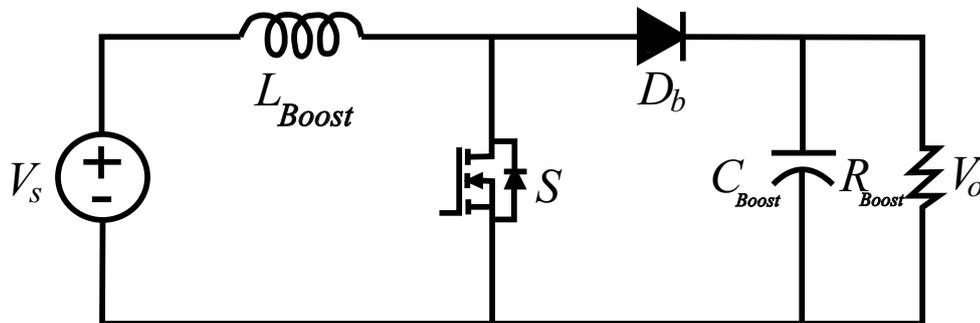
Esse método tem a desvantagem de necessitar de uma integração numérica, que requer uma maior capacidade computacional.

Na próxima seção serão abordadas as etapas necessárias para o processamento da energia proveniente do gerador.

### 2.3 Conversores Estáticos

Como a saída do gerador de ímã permanente possui uma saída trifásica alternada, é necessário acoplar ao circuito elétrico uma ponte retificadora, para obter-se uma tensão contínua que possa ser estocada em baterias. Porém, para aplicar a estratégia MPPT e melhorar a eficiência do sistema, são necessários conversores corrente contínua (Conversores *CC-CC*). Como a saída do gerador tem uma característica de fonte de corrente, um conversor mais simples que possa realizar o controle da tensão na saída da ponte retificadora é o conversor elevador *Boost*. Com o intuito de utilizar a tensão gerada para alimentar um inversor conectado na rede, a tensão de saída do sistema eólico necessitará ser elevada, tornando-se o conversor *Boost* a melhor opção dentre os conversores *CC-CC*. Além disso, operando em modo de condução contínua (MCC), o conversor apresenta corrente de entrada contínua e frequência de operação constante (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007). O circuito equivalente deste conversor pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Circuito convencional do Conversor *Boost*.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

A operação do conversor *Boost* pode ser dividida em duas etapas no MCC, sendo que, na primeira etapa, a chave  $S$  está conduzindo, e o diodo  $D_b$  está bloqueado. Isto leva o indutor  $L_{Boost}$  armazenar a energia da fonte de tensão  $V_s$ , visto que a corrente neste indutor é a mesma que circula pela chave  $S$ . Já o diodo  $D_b$  está reversamente polarizado com a tensão  $V_s - V_0$ . Para esta situação têm-se a expressão (2.34) (HART, 2016):

$$(\Delta i_L)_{fechada} = \frac{V_s DT}{L} \quad (2.34)$$

onde  $\Delta i_L$  é a variação da corrente no indutor,  $V_s$  é a tensão sobre a chave  $S$ ,  $DT$  é o período que a chave permanece fechada e  $L$  é a indutância do indutor  $L_{Boost}$ .

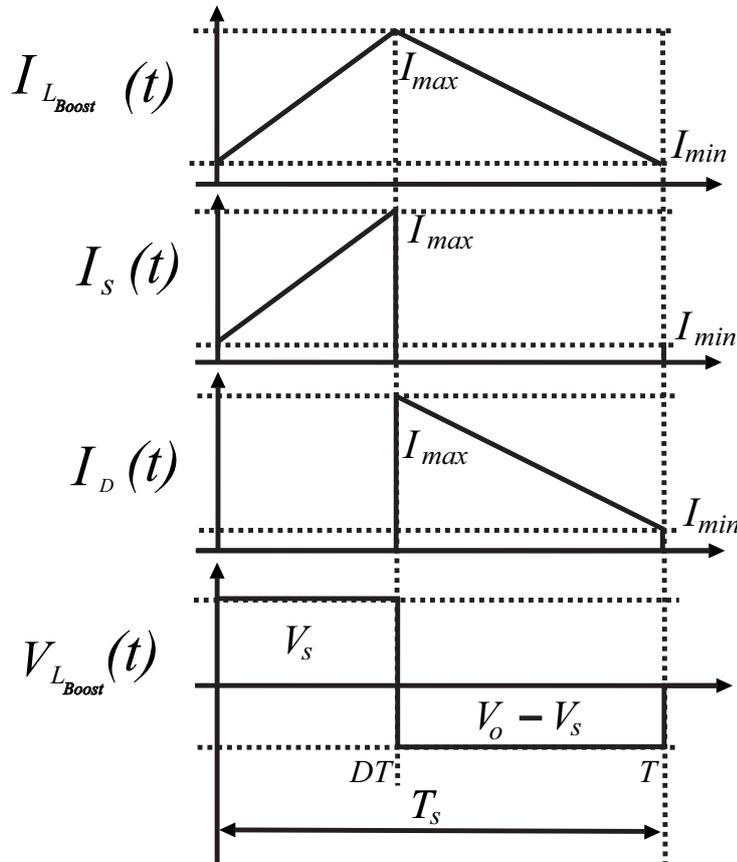
A segunda etapa começa quando a chave  $S$  é bloqueada e se comporta como um circuito aberto. Nessa etapa, a energia armazenada no indutor é entregue à saída  $V_0$ , a tensão sobre a chave  $S$  é igual a  $V_0$  e circula a mesma corrente sobre o diodo  $D_b$  e o indutor  $L_{Boost}$ . Esta etapa termina quando a chave  $S$  é comandada a voltar a conduzir, reiniciando o processo. Para esta situação têm-se a expressão (2.35) (HART, 2016):

$$(\Delta i_L)_{aberta} = \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.35)$$

onde  $T$  é o período que a chave permanece aberta e  $D$  é a razão cíclica de chaveamento da chave  $S$ , também chamada de *Duty Cycle*.

O gráfico que demonstra estas etapas pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Formas de onda nos principais componentes do Conversor *Boost*.



Fonte – Adaptado de (HART, 2016).

Com a análise das formas de onda sobre cada componente da Figura 14 é possível determinar os valores máximos por eles suportados, além de seus valores nominais. Para o

funcionamento estável do circuito, a variação de corrente líquida sobre o indutor necessita ser zero. Portanto, utilizando as equações (2.34) e (2.35), obtêm-se:

$$(\Delta i_L)_{aberta} + (\Delta i_L)_{fechada} = 0 \quad (2.36)$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{(V_s - V_o)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.37)$$

Resolvendo para  $V_o$ , têm-se a relação entre a tensão de entrada  $V_s$  e a tensão de saída  $V_o$ , dada por (2.38).

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.38)$$

A relação apresentada na equação (2.38) demonstra que uma vez mantida a tensão na saída do conversor, obtêm-se a tensão de entrada em função de  $D$ . Essa característica é fundamental para controle da potência elétrica fornecida pelo gerador.

Também é possível obter as equações para o projeto dos componentes que compõe o *Boost*. A indutância mínima para atuação no modo de condução contínua é expressa por (HART, 2016):

$$L_{min} = \frac{D(1 - D)^2 R}{2f} \quad (2.39)$$

Em termos de  $\Delta i_L$ , a indutância pode ser expressa também por:

$$L = \frac{V_s D}{\Delta i_L f} \quad (2.40)$$

Outro aspecto a ser observado é a ondulação de tensão na saída do conversor *Boost*. Esta pode ser relacionada com a forma de corrente do capacitor e assim com sua própria capacitância, conforme expresso a seguir (HART, 2016):

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (2.41)$$

Assim, manipulando a equação (2.41), é possível obter a capacitância  $C$  necessária para um certo nível de ondulação de saída desejado.

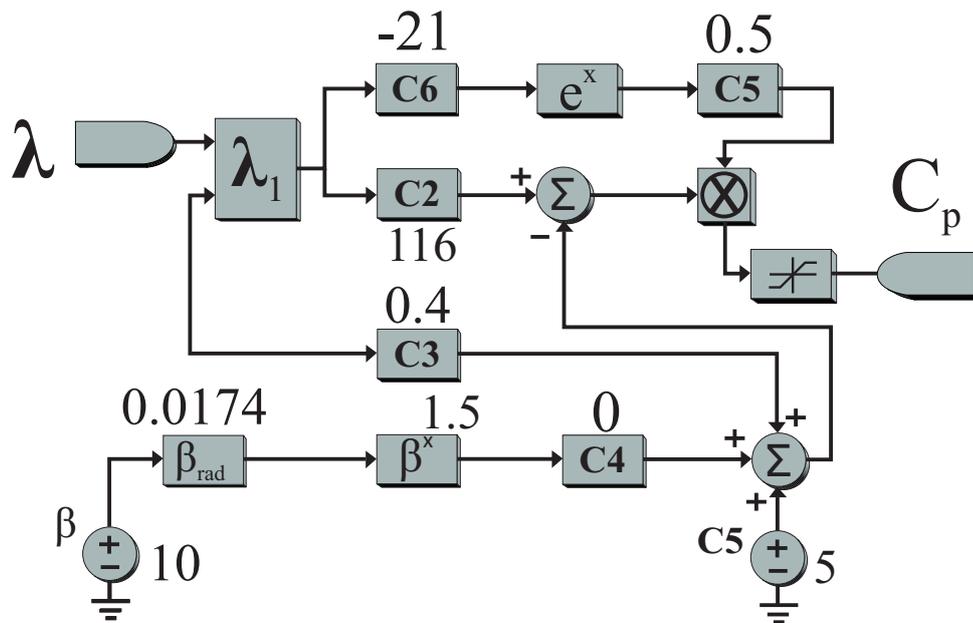


### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Modelo Equivalente da Turbina Eólica

Para a simulação das estratégias MPPT, inicialmente é necessário obter-se um circuito que emule o funcionamento e as características do sistema eólico real. Esse processo foi realizado por (TIBOLA, 2009) no ambiente de simulação do *software PSIM*<sup>®</sup> e também será aplicado neste trabalho. A modelagem desse circuito inicia-se pelo coeficiente de potência  $C_p$ , que deve ter seu circuito equivalente em conformidade com a equação (2.26). Os valores dos coeficientes  $C_1$  a  $C_6$  foram escolhidos baseados nos coeficientes para turbinas de passo fixo e três pás, conforme a Tabela 1. O circuito montado no *software PSIM*<sup>®</sup> pode ser visualizado na Figura 15.

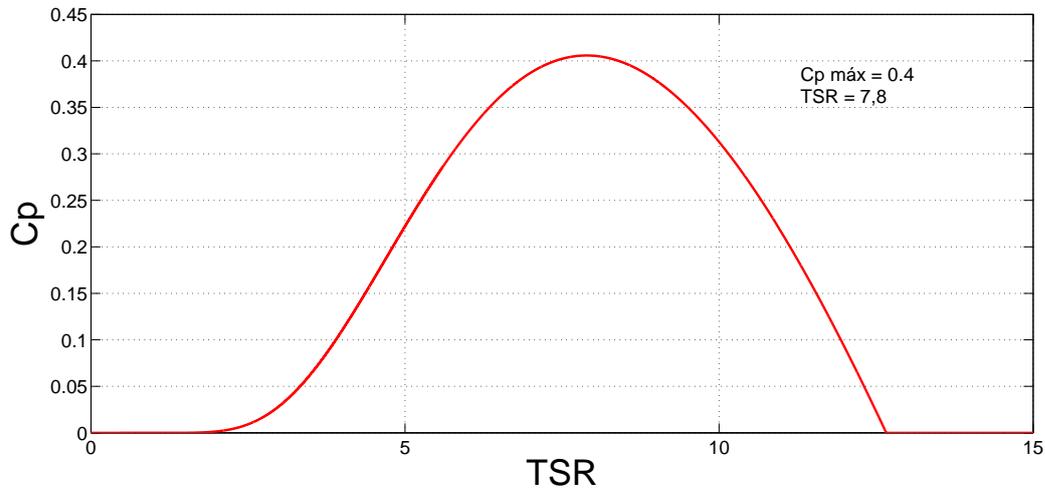
Figura 15 – Circuito emulador do coeficiente  $C_p$ .



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Para verificar se o funcionamento do circuito está de acordo com a teoria estudada, foi conectado a entrada do bloco uma fonte de tensão interligada a um integrador, a fim de simular a variação do TSR ( $\lambda$ ) e verificar a curva do coeficiente  $C_p$ . O resultado é apresentado pela Figura 16, com o valor máximo de  $C_p$  prático de 0,40, para um TSR de 7,8. Esse valor é bem menor do que o limite teórico de *Betz*, que não considera as perdas práticas.

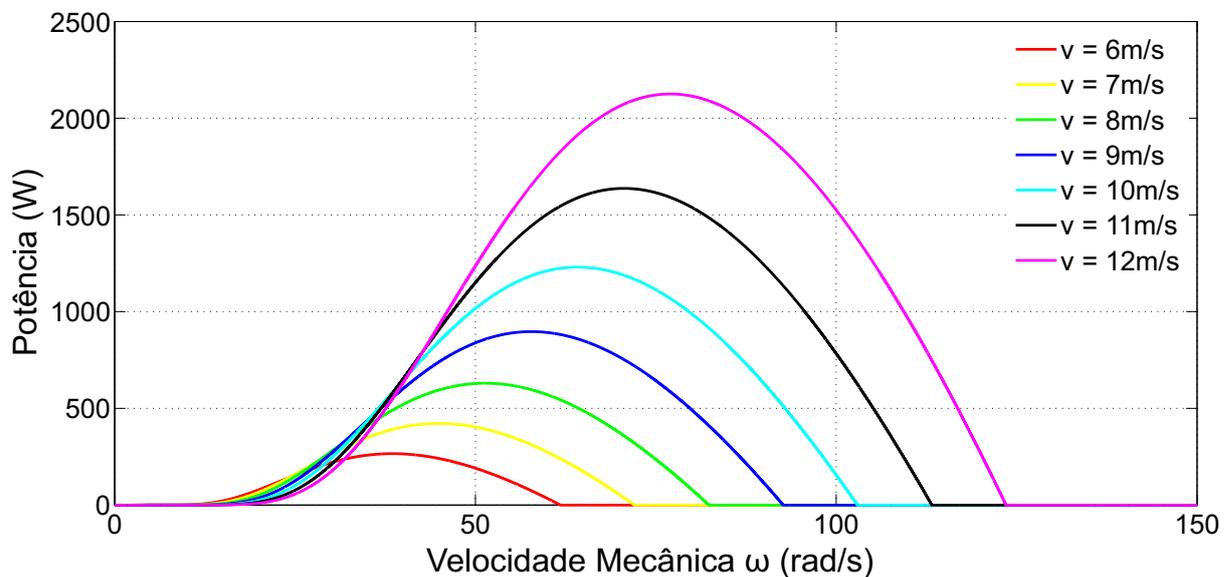
Com a obtenção do bloco para emulador do coeficiente  $C_p$ , é necessário agora adequar o circuito à equação (2.22), para obter-se a potência mecânica fornecida pela turbina em função da velocidade do vento e da rotação do eixo do gerador. Para tanto, foram utilizados componentes elétricos e lógicos do *software*.

Figura 16 – Curva do coeficiente  $C_p$ .

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Como citado anteriormente, existe um valor de rotação para cada valor de velocidade do vento que será obtido o TSR ótimo, também demonstrado pela equação (2.25). Para essa verificação foi conectado a entrada de velocidade mecânica uma fonte de tensão conectada a um integrador, responsável pela variação da faixa de velocidade do gerador. Este procedimento possibilitou obter-se as curvas de potência em função da velocidade do gerador, para algumas velocidades de vento. As curvas resultantes estão expostas na Figura 17.

Figura 17 – Potência mecânica com a variação das velocidades do gerador e do vento, para o modelo equivalente da turbina.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

As curvas apresentadas são similares as curvas da Figura 6 e possuem a dinâmica esperada pelos conceitos teóricos iniciais. Porém, o sistema real apresenta sua saída de potência como uma função de torque e velocidade, portanto o sinal de potência mecânica é dividido pela referência de velocidade, obtendo-se assim um torque proporcional a dinâmica do sistema. Além disso, é necessário acoplar o circuito emulador da turbina ao gerador PMSG, que possui algumas particularidades no *software* utilizado.

Para realizar o acoplamento entre circuito e gerador, é necessário utilizar um bloco de interface elétrica-mecânica. Também é necessário considerar o momento de inércia da turbina, que é dado pela equação (3.1).

$$T_r - T_g = (J_r + J_g) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.1)$$

onde  $T_r$  é o torque do rotor da turbina,  $T_g$  é o torque do gerador elétrico,  $J_r$  é o momento de inércia do rotor da turbina,  $J_g$  é o momento de inércia do gerador elétrico e  $\omega_m$  é a velocidade mecânica no eixo que os unem.

O sistema mecânico mencionado pode ser representado por fontes de corrente em paralelo com capacitores, com a corrente da fonte representando o torque, e o valor da capacitância, o momento de inércia. Como a saída do circuito desenvolvido até o momento possui um sinal de corrente emulando o sinal de torque, é necessário adicionar um resistor à saída, para obter-se características de fonte de corrente. Conforme mencionado em (POWERSIM, 2010), o gerador PMSG presente no *software* já possui essas características de torque e momento de inércia, sendo apenas necessário o acoplamento entre os dois blocos. É adicionado ainda um sensor de velocidade para realimentar a malha, atrelando as características de torque entre gerador e turbina, além de um sensor de torque para medições.

Este sistema representa bem o funcionamento do sistema eólico em regime permanente, porém o capacitor necessita de uma tensão inicial para se obter os primeiros sinais de torque. No círculo realizado nesse trabalho, o valor da tensão inicial é de 30V, ajustado por meio de simulações. Outra limitação está no fato de que se o vento cessar, não há como reiniciar o sistema. Também são desconsideradas as perdas mecânicas na turbina, que são proporcionais ao quadrado da velocidade. Todavia, para simular os efeitos das mudanças de velocidade do vento, parte principal deste trabalho, o sistema é adequado.

Além das características da turbinas, também é preciso configurar o bloco gerador. Para tanto seriam necessários ensaios elétricos em um gerador real, que ainda não foi realizado por esta pesquisa. Portanto, serão utilizados os valores dos ensaios realizados em (TIBOLA, 2009).

A Tabela 2 apresenta os valores utilizados na configuração. Pode-se destacar os ajustes de resistência série ( $R_s$ ), indutância de eixo direto ( $L_d$ ) e em quadratura ( $L_q$ ), o número de pólos do estator ( $P_o$ ), razão entre a tensão de pico de linha em *kilovolts* e a

velocidade da máquina em *kilorpm* e o momento de inércia ( $J_g$ ).

Tabela 2 – Dados utilizados na configuração do bloco gerador PMSG.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência série	$R_s$	0,9	$\Omega$
Indutância de eixo direto	$L_d$	3,5	mH
Indutância de eixo de quadratura	$L_q$	3,5	mH
Número de polos	$P_o$	14	
Razão tensão/velocidade	Vpk/krpm	157,232	kV/krpm
Momento de inércia	$J_g$	0.06	Nm

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Com estas etapas concluídas, têm-se um circuito capaz de emular o comportamento dinâmico do sistema de geração de energia eólica, sendo necessário agora voltar-se para a conversão de energia. Como o intuito é desenvolver um sistema que possa operar no modo *on grid*, optou-se pela utilização de um conversor estático CC-CC *Boost* junto com uma ponte retificadora na saída dos terminais do gerador, para elevação da tensão e posterior conexão à rede de alimentação elétrica. A teoria de funcionamento e equações bases para o cálculo de seus componentes foram discutidas na seção 2.3.

Sobre o cálculo do valor mínimo do indutor  $L_{Boost}$ , para manter o conversor no MCC, primeiramente foi calculada a razão cíclica mínima, valor para o qual o  $L_{Boost}$  tem seu ponto crítico, considerando a tensão de entrada  $V_s = 92,1V$  e a tensão de saída  $V_o = 100V$ . Esta cálculo é expresso em (3.2), (3.3) e (3.4):

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.2)$$

$$\frac{92,1}{100} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.3)$$

$$D_{min} = 0,08 \quad (3.4)$$

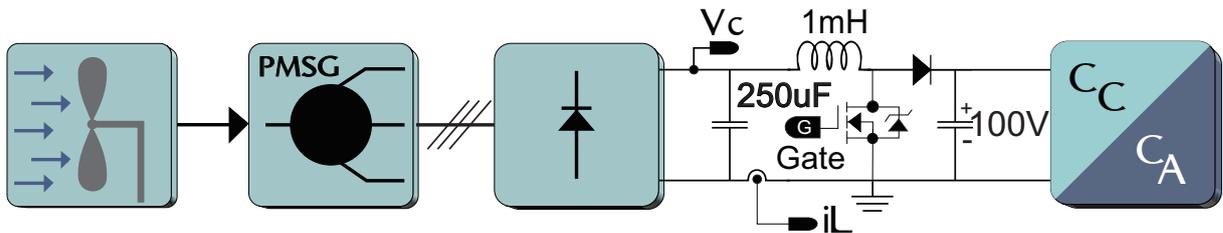
Considerando a variação da corrente no indutor  $\Delta i_L = 0,2A$  e a frequência de chaveamento  $f = 50kHz$ , pode-se obter a indutância mínima  $L_{min}$  para operação no MCC, aplicando a equação (2.40), conforme demonstrado em (3.5) :

$$L_{Boost} = \frac{(92,1)(0,08)}{(0,2)(50000)} \quad (3.5)$$

obtendo-se  $L_{min}$  0,8 mH. Adotou-se então o valor de indutância  $L$  de 1mH. Atenta-se para o fato que o capacitor e resistor de saída foram substituídos por uma fonte ideal de tensão, não havendo estes componentes no circuito. O capacitor de entrada teve seu valor adotado conforme valor obtido em (TIBOLA, 2009), através de simulações.

O circuito final acoplado ao gerador e conversor é demonstrado na Figura 18. A etapa de conversão CC-CA é apenas ilustrativa e não será implementada nesse trabalho.

Figura 18 – Circuito emulador da turbina eólica acoplado ao gerador PMSG.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Com esse circuito emulado, têm-se todos os componentes da parte mecânica e o circuito de potência que compõe uma turbina eólica no ambiente de simulação, restando tratar da fonte de velocidade do vento e do circuito de controle e busca da máxima potência.

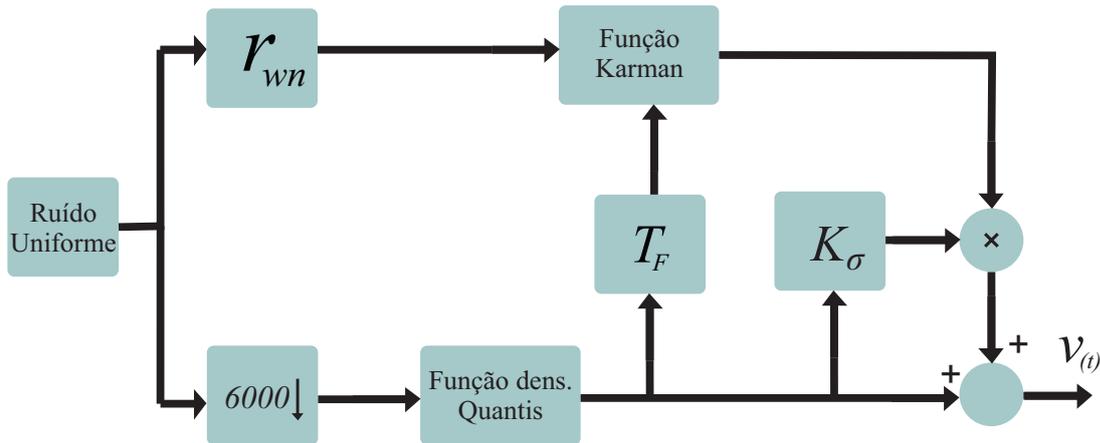
### 3.2 Gerador de Séries Temporais de Velocidade do Vento

Para uma simulação mais próxima das condições reais a que são submetidas as turbinas eólicas, faz-se necessária a aplicação de um sinal de referência de velocidade do vento que possua suas características estocásticas. Como visto na seção 2.1.1, aplicações que necessitam das características do comportamento do vento em curtos períodos de tempo podem utilizar as series temporais que complementam a velocidade média do vento em 10 minutos com um modelo de turbulência. Dessa maneira, foi desenvolvido no *software PSIM*<sup>®</sup> um circuito que forneça esse sinal. Foram utilizados os blocos de componentes do próprio *software*, com as expressões que regem o sistema implementas no bloco de funções *DLL* em linguagem de programação.

O ruído gaussiano necessário, descrito pela equação (2.11), a velocidade média em termos de 10 minutos obtida através de (2.4), o filtro (2.8) e as equações que o compõe, assim como a equação da distribuição de *Rayleigh* (2.3) foram utilizadas. A Figura 19 demonstra o diagrama do circuito montado.

A partir desse circuito é possível aplicar uma situação prática ao emulador da turbina eólica e verificar o comportamento dos circuitos de controle na busca pelo ponto de máxima potência.

Figura 19 – Diagrama do circuito gerador de séries temporais de velocidade do vento.

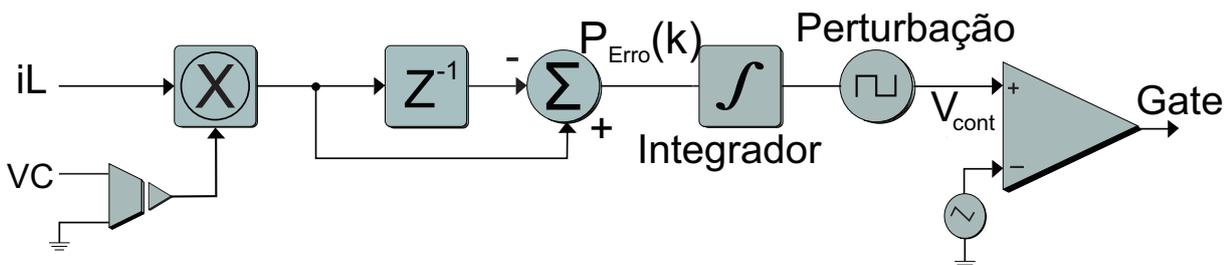


Fonte – Elaborado pelo Autor.

### 3.3 Estratégia MPPT com Algoritmo Perturbação e Observação

Inicialmente, foi utilizado o algoritmo P&O como estratégia MPPT. Em virtude das simulações serem apenas para verificar a controlabilidade do sistema e as suas vantagens, os parâmetros foram adotados tais como (TIBOLA, 2009). O circuito utilizado é demonstrado na Figura 20.

Figura 20 – Circuito emulador da estratégia P&O.



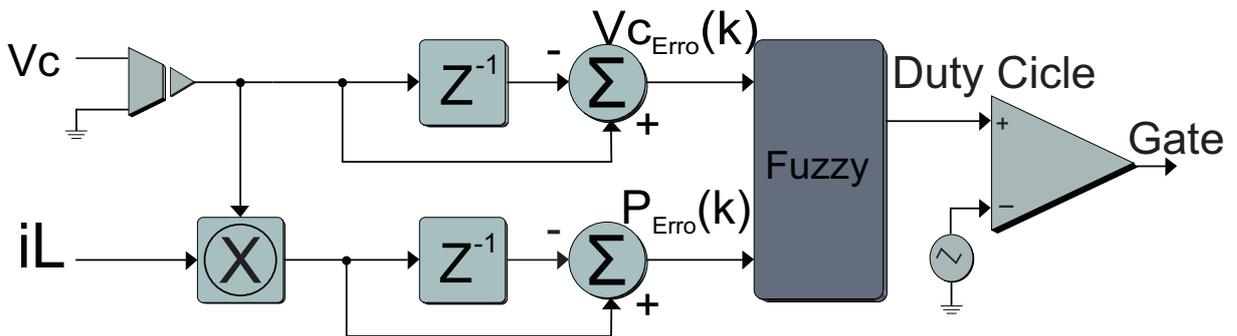
Fonte – Elaborado pelo Autor.

O circuito realiza a medição de tensão e corrente através de sensores, e faz a multiplicação dos sinais para obter-se a potência elétrica. Após isso, dois amostradores defasados 180 graus registram duas amostras do sinal, que são comparadas para se verificar houve mudança na potência. Por último essa variação é enviada ao circuito de perturbação, baseado em modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), que faz uma perturbação do sinal positiva ou negativa. Essa perturbação muda a razão cíclica do chaveamento do conversor *Boost*, que regula a tensão na saída do retificador, rastreamento assim seu valor ótimo.

### 3.4 Estratégia MPPT com Lógica Fuzzy - Primeiro Método

Pelas limitações do algoritmo P&O discutidas na seção 2.2, foi desenvolvida uma estratégia MPPT alternativa, empregando lógica Fuzzy. Para tanto, foram retirados os componentes responsáveis pela busca do P&O, e conectado o circuito do controlador Fuzzy. A estratégia Fuzzy foi desenvolvida no software *MATLAB Simulink*<sup>®</sup>, interligado ao circuito já existente no software *PSIM*<sup>®</sup>, através da função *SimCoupler* (POWERSIM, 2009). O esquema do circuito simulado é apresentado na Figura 21.

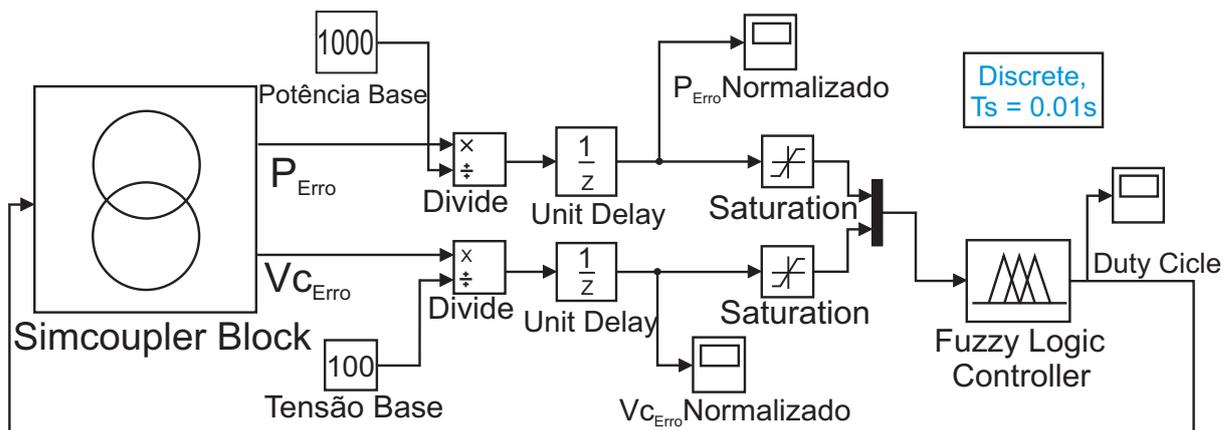
Figura 21 – Esquema da estratégia Fuzzy.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

A parcela do circuito desenvolvido no software *MATLAB Simulink*<sup>®</sup> pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Circuito do controlador Fuzzy desenvolvido no software *MATLAB Simulink*<sup>®</sup>.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

O controle do circuito é realizado através das informações de variação de potência elétrica ( $P_{Erro}$ ) e variação da tensão sobre o capacitor ( $V_{C_{Erro}}$ ). Esses valores são amostrados conforme realizado no método P&O, e são normalizados através dos valores de potência e tensão base. A saída do bloco do controlador Fuzzy é referente ao nível de tensão do regulador do *Duty Cycle*, que retorna para o circuito principal, controlando o interruptor semicondutor de potência através do comparador PWM. Os valores dos ajustes e as regras

bases foram determinadas através de simulações, com frequência de amostragem de  $100Hz$  e a frequência da portadora de  $1kHz$ .

Com relação as funções de pertinência, foram determinados 4 níveis para as entradas, sendo negativo alto (NA), negativo baixo (NB), positivo baixo (PB) e positivo alto (PA). A entrada  $V_{C_{Erro}}$  também possui o nível zero (Zero). Já a saída foi definida nos níveis baixo (B), baixo médio (MB), alto médio (MA) e alto (A). As regras são demonstradas na Tabela 3.

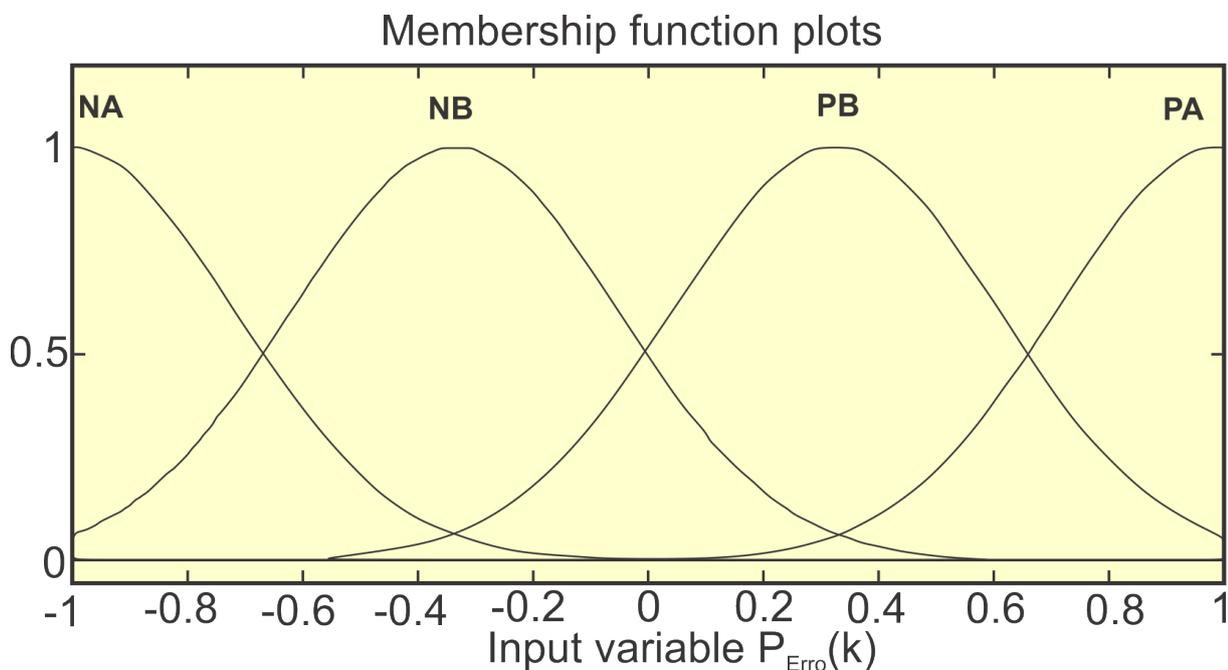
Tabela 3 – Regras de relação das funções de pertinência.

$\Delta V_c \setminus \Delta P$	NA	NB	PB	PA
NA	A	MA	B	B
NB	MA	MA	MB	MB
PB	MB	MB	MA	MA
PA	B	MB	A	A
Zero	B	B	A	A

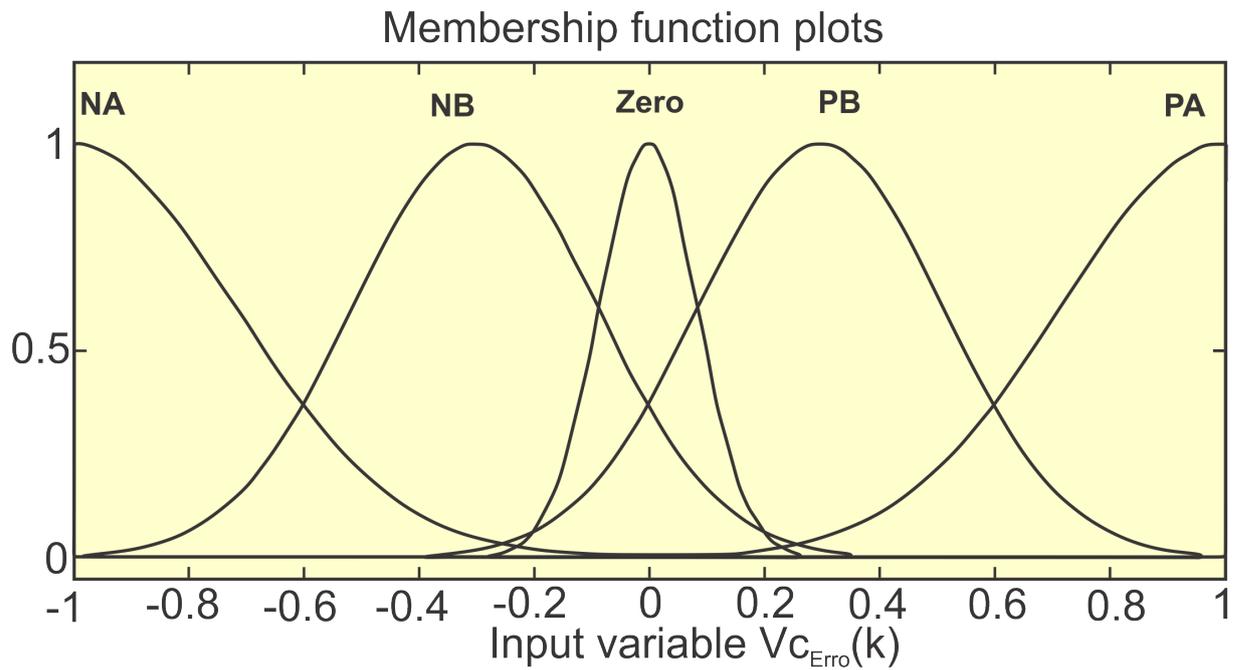
Fonte – Elaborado pelo Autor.

O controlador utilizado é do tipo *mamdani*, com método de inferência máx-mín e defuzzificação do tipo centroide. As funções de pertinência são demonstradas nas Figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 – Funções de pertinência entrada  $P_{Erro}$ .

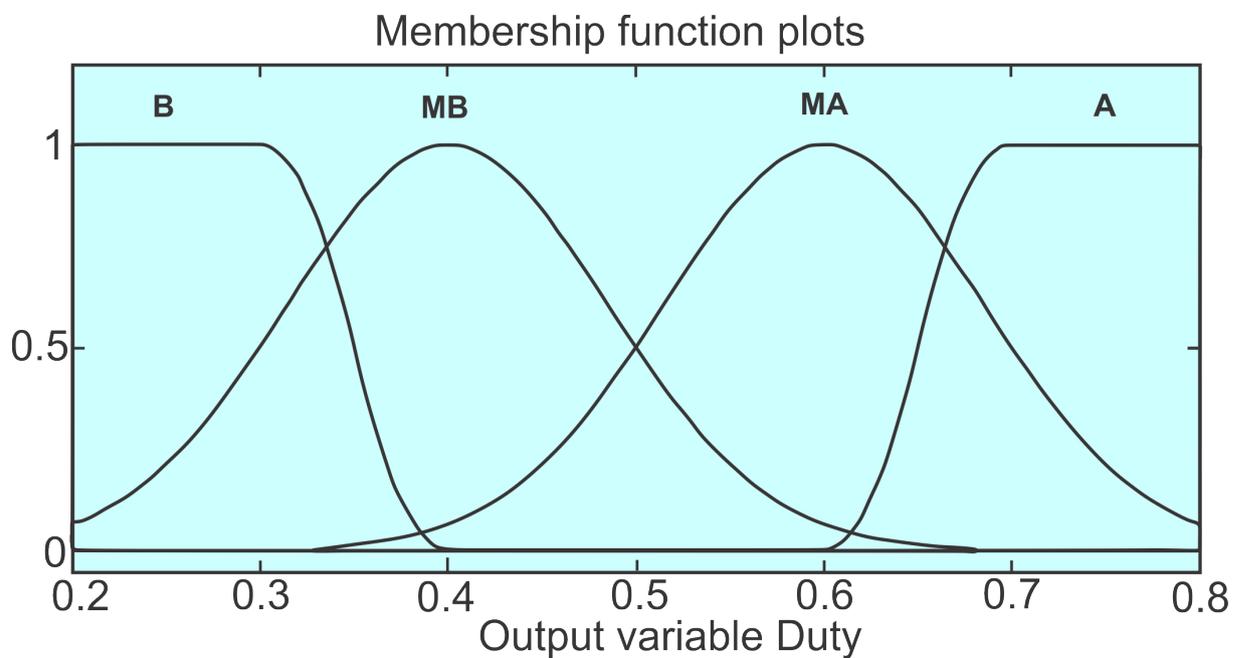


Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 24 – Funções de pertinência entrada  $V_{c_{Erro}}$ .

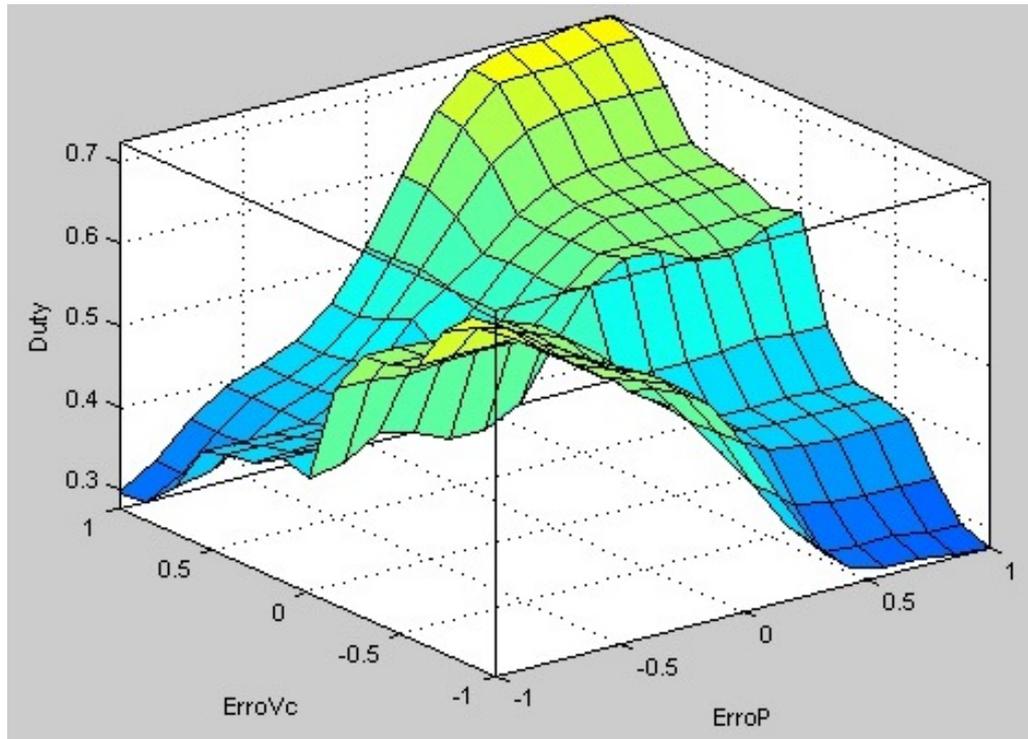
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 25 – Funções de pertinência de saída.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Já a superfície *Fuzzy* resultante é demonstrada na Figura 26.

Figura 26 – Superfície *Fuzzy*.

Fonte – Elaborado pelo Autor.

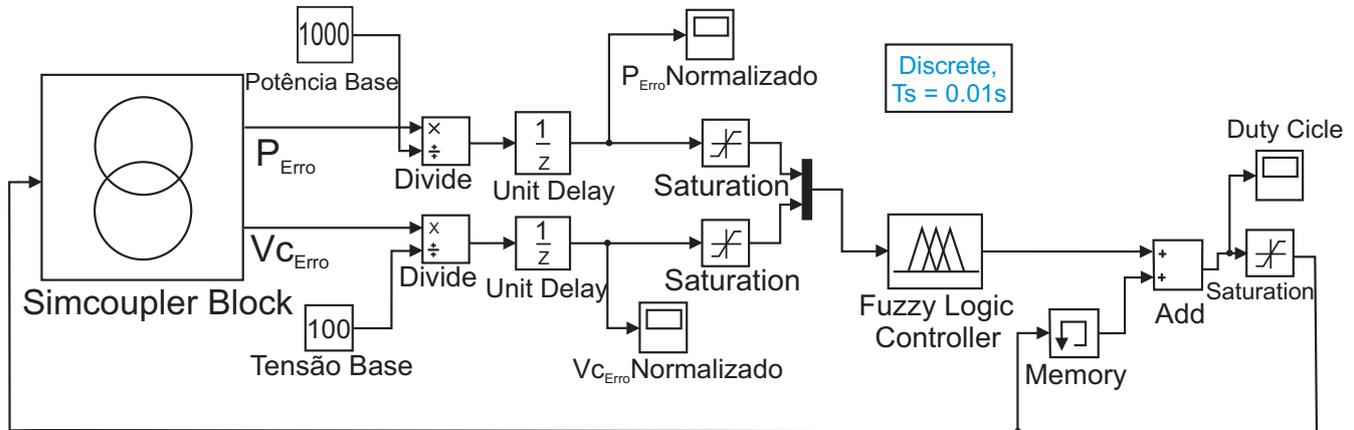
### 3.5 Estratégia MPPT com Lógica *Fuzzy* - Segundo Método

Na primeira estratégia MPPT implementada, o sinal da razão cíclica provém diretamente da variável de saída do controlador *Fuzzy*. Uma segunda abordagem proposta é utilizar essa saída como um sinal de referência, que será somado ao sinal da razão cíclica do passo anterior. Dessa maneira, evita-se de que o sinal enviado para o comparador que aciona a chave semicondutora do conversor *Boost* estacione sempre no mesmo valor quando as variáveis de entrada se aproximam de zero. O novo circuito proposto pode ser observado na Figura 27. O circuito desenvolvido no ambiente *PSIM*<sup>®</sup> permanece como disposto na Figura 21.

Em adição ao novo circuito, foram modificadas as funções de pertinência e a base de regras. Foram determinados 5 níveis para as entradas e a saída, sendo negativo alto (NA), negativo baixo (NB), positivo baixo (PB) e positivo alto (PA) e zero (Zero). Todas as funções de pertinência utilizadas são da forma gaussiana, para facilitar a implementação via programação do controlador. A nova base de regras está exposta na Tabela 4.

O tipo do controlador foi mantido como *mamdani*, o método de inferência máximo e desfuzzificação do tipo centroide. Os valores dos ajustes e as regras bases foram novamente determinadas através de simulações, com frequência de amostragem de  $100\text{Hz}$ , e a frequência da portadora de  $10\text{kHz}$ . As novas funções de pertinência são demonstradas nas Figuras 28, 29 e 30.

Figura 27 – Circuito do controlador Fuzzy desenvolvido no MATLAB Simulink® para segunda estratégia MPPT.



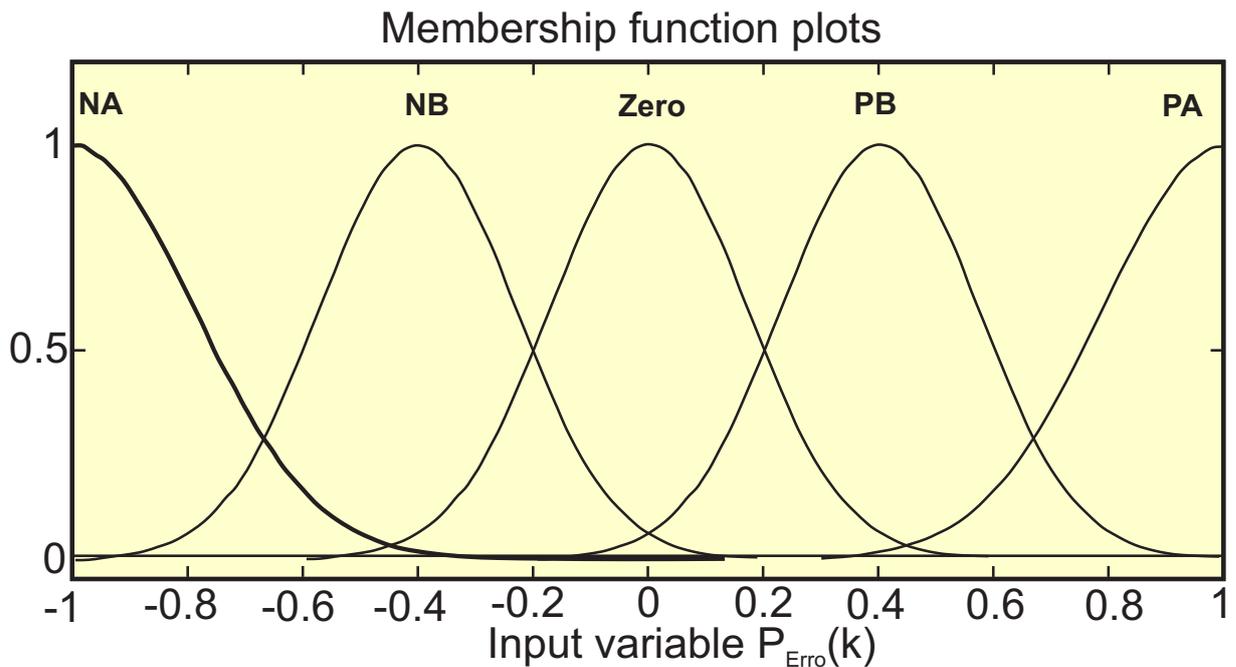
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Tabela 4 – Regras de relação das funções de pertinência adotadas para segunda estratégia MPPT.

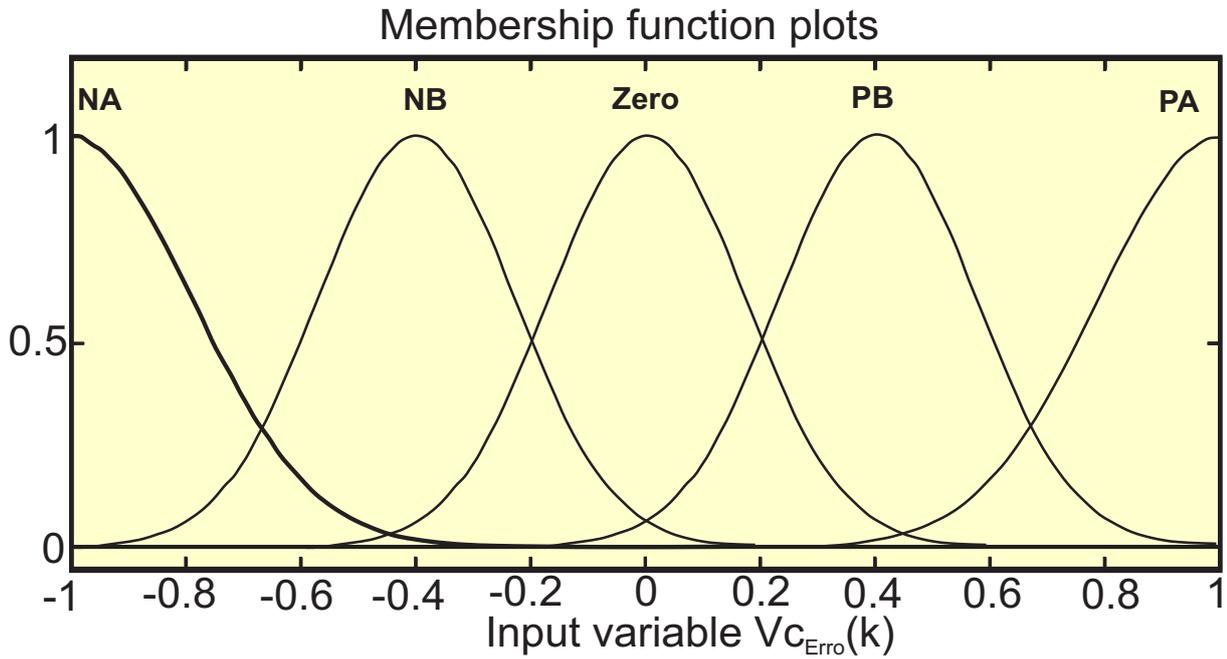
$\Delta V_c \setminus \Delta P$	NA	NB	Zero	PB	PA
NA	Zero	Zero	PB	NB	NA
NB	Zero	NB	Zero	NB	NA
PB	PA	PB	Zero	NB	NA
PA	PA	PB	Zero	PB	Zero
Zero	PA	PB	NB	Zero	Zero

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 28 – Funções de pertinência entrada  $P_{Erro}$ , segunda estratégia MPPT.

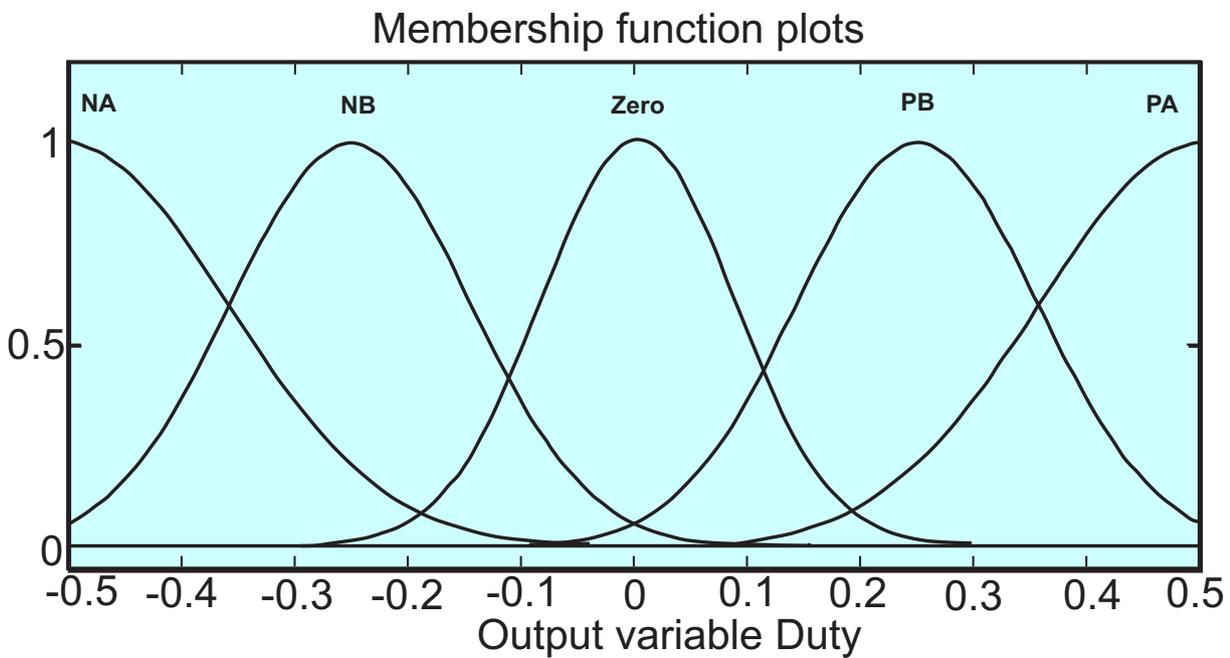


Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 29 – Funções de pertinência entrada  $V_{C_{Erro}}$ , segunda estratégia MPPT.

Fonte – Elaborado pelo Autor.

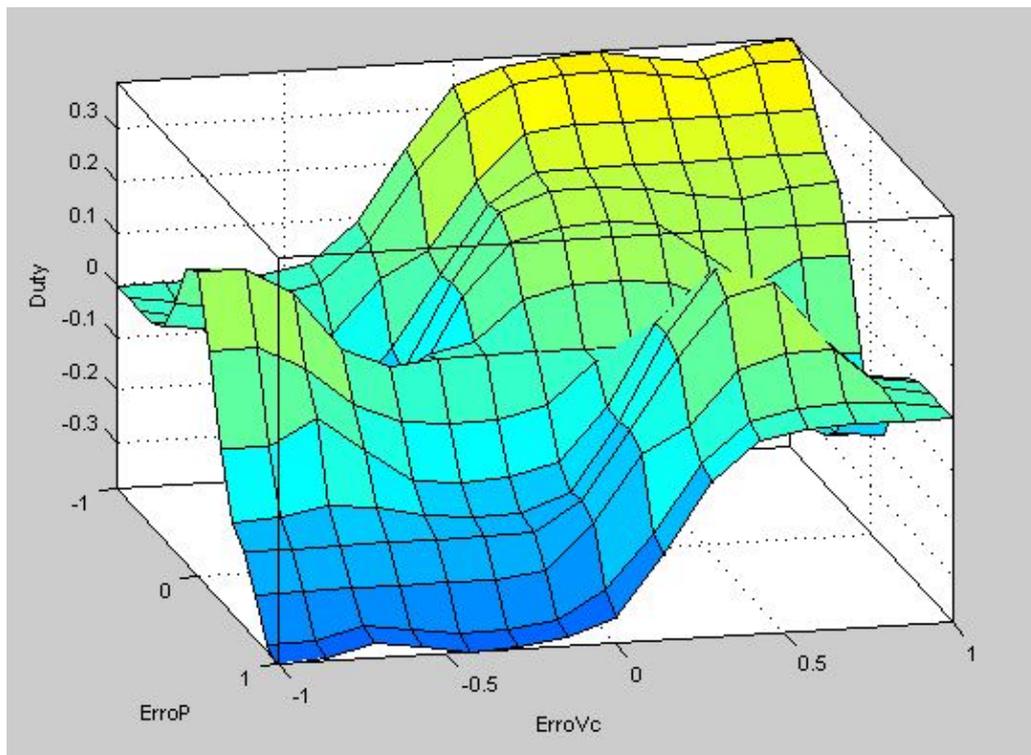
Figura 30 – Funções de pertinência de saída, segunda estratégia MPPT.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

A superfície *Fuzzy* resultante dessa nova estratégia é demonstrada na Figura 31.

Figura 31 – Superfície Fuzzy resultante da segunda estratégia MPPT.



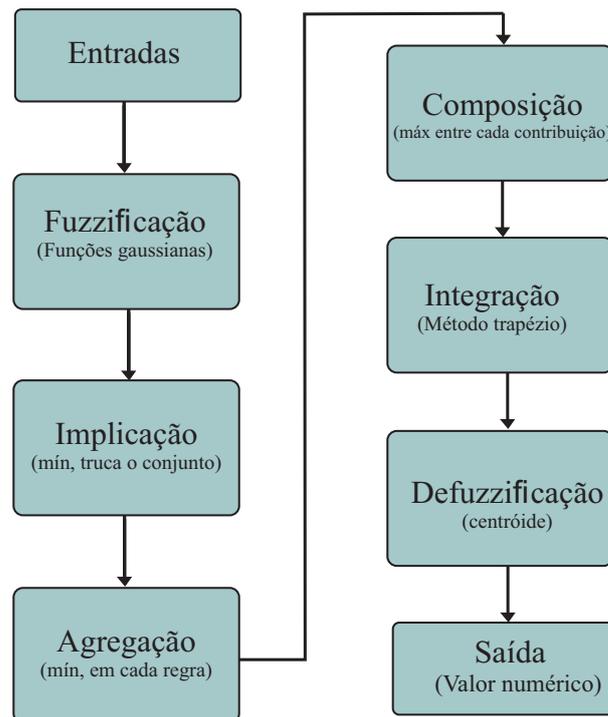
Fonte – Elaborado pelo Autor.

### 3.6 Controlador Fuzzy em Linguagem C

A co-simulação entre os *software MATLAB Simulink*<sup>®</sup> e *PSIM*<sup>®</sup> possui o inconveniente de não permitir que se trabalhe com períodos de amostragem diferentes em cada ambiente de simulação. Além disso, o bloco do controlador Fuzzy realiza suas iterações conforme o passo de simulação, que possui um valor reduzido devido ao chaveamento do circuito principal. Portanto, para propiciar mais opções de ajustes, realizou-se a implementação do controlador Fuzzy através de linha de código, utilizando o componente *block C* do *software PSIM*<sup>®</sup>.

A construção do código baseou-se no funcionamento do bloco do controlador Fuzzy presente no *software MATLAB Simulink*<sup>®</sup>. Além disso, as etapas de fuzzificação, regras de inferência, funções de pertinência e defuzzificação também se basearam nas premissas descritas na seção 2.2.3. Um diagrama dos estágios que compõem o controlador é exposto na Figura 32

Com relação aos ajustes, os parâmetros do circuito de potência foram mantidos. Já as regras bases foram utilizadas conforme descrito na segunda estratégia Fuzzy. A frequência de amostragem adotada foi de  $1kHz$ , e a frequência da portadora de  $50kHz$ . O passo de simulação foi mantido em  $1\mu s$  e o passo para cada iteração do controlador Fuzzy no *block C*  $5ms$ , através de uma rotina de contagem.

Figura 32 – Sequência de funcionamento do controlador *Fuzzy* através de linha de código.

Fonte – Elaborado pelo Autor.

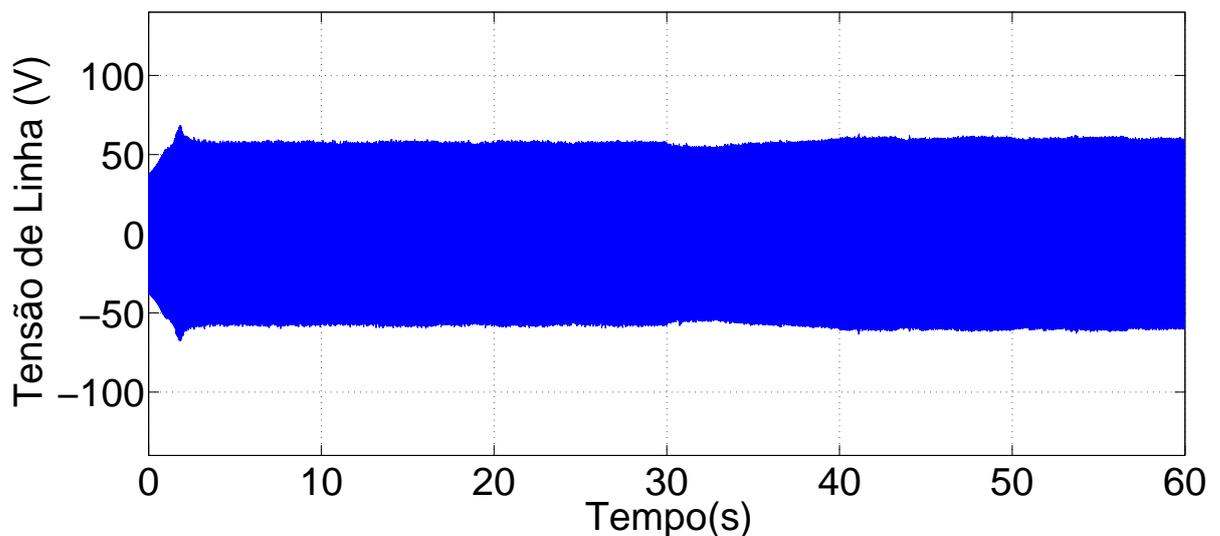
Com a utilização desse controlador, é possível realizar as simulações da estratégia *Fuzzy* apenas no ambiente do *software PSIM<sup>®</sup>*, além da facilidade em modificar a constante de tempo das iterações do controlador. O código fonte encontra-se no anexo A.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados da Estratégia Perturbação e Observação

Com o circuito emulador agora completo foram realizadas simulações a fim de verificar as vantagens de se utilizar as técnicas de MPPT na conversão de energia. Os valores dos parâmetros do circuito de MPPT foram inicialmente ajustados de maneira similar aos ajuste de (TIBOLA, 2009), e em seguida alterados para verificação da influência destes no circuito. A potência da turbina é de  $1kW$  com velocidade nominal do vento de  $12m/s$ . O gerador tem como parâmetros tensão de linha de  $75V$  e 14 pólos. A simulação foi realizada com um tempo total de 60 segundos, com velocidade inicial do vento de  $9m/s$ , e em 30 segundos foi aplicado um degrau de vento de  $1m/s$ . As formas de onda de tensão e corrente na saída do gerador são expostas das Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Tensão de linha na saída do gerador.



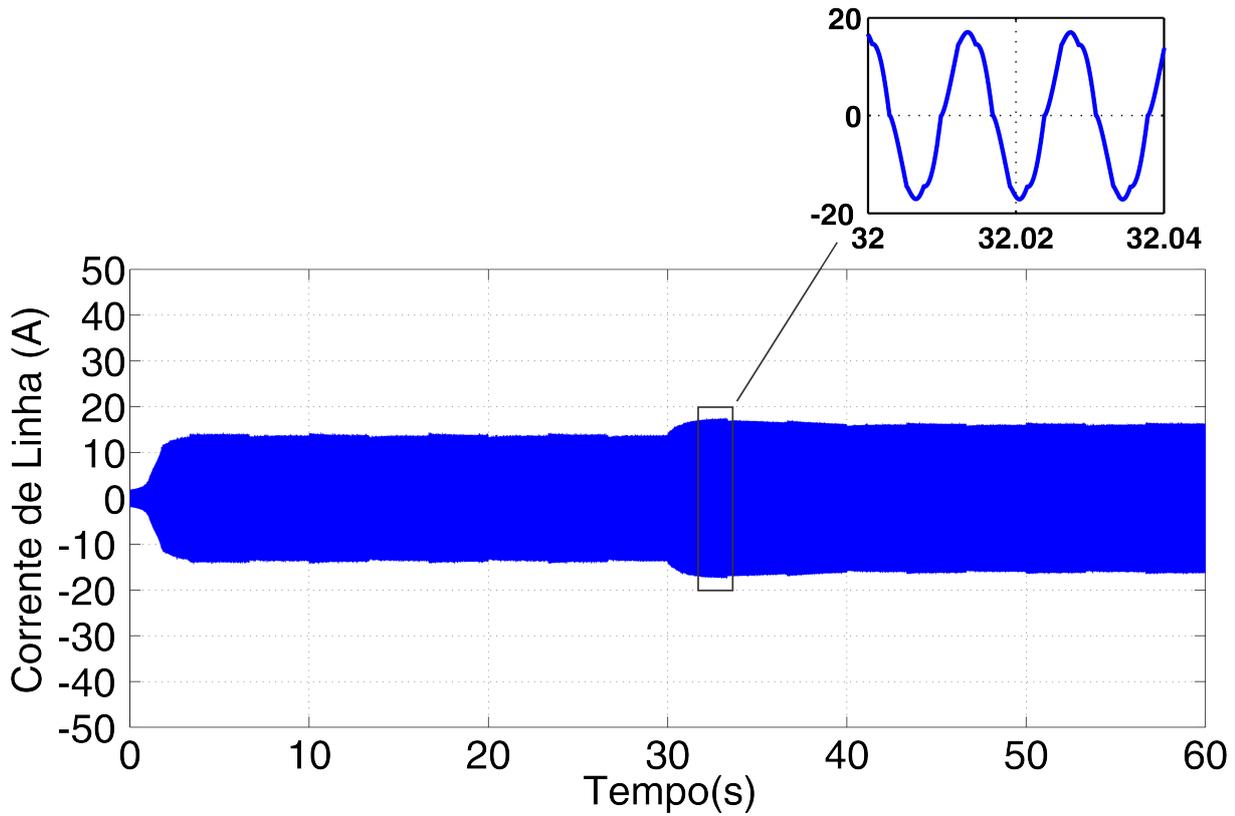
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Observa-se um pequeno afundamento na forma de onda de tensão quando é imposto o degrau de velocidade do vento ao sistema. Já a forma de onda da corrente não apresenta distorções, apresentando uma forma de onda esperada para o funcionamento no modo MCC.

O gráfico da rotação, representado pela Figura 35, demonstra algumas oscilações na velocidade mecânica provenientes da constante perturbação do sistema.

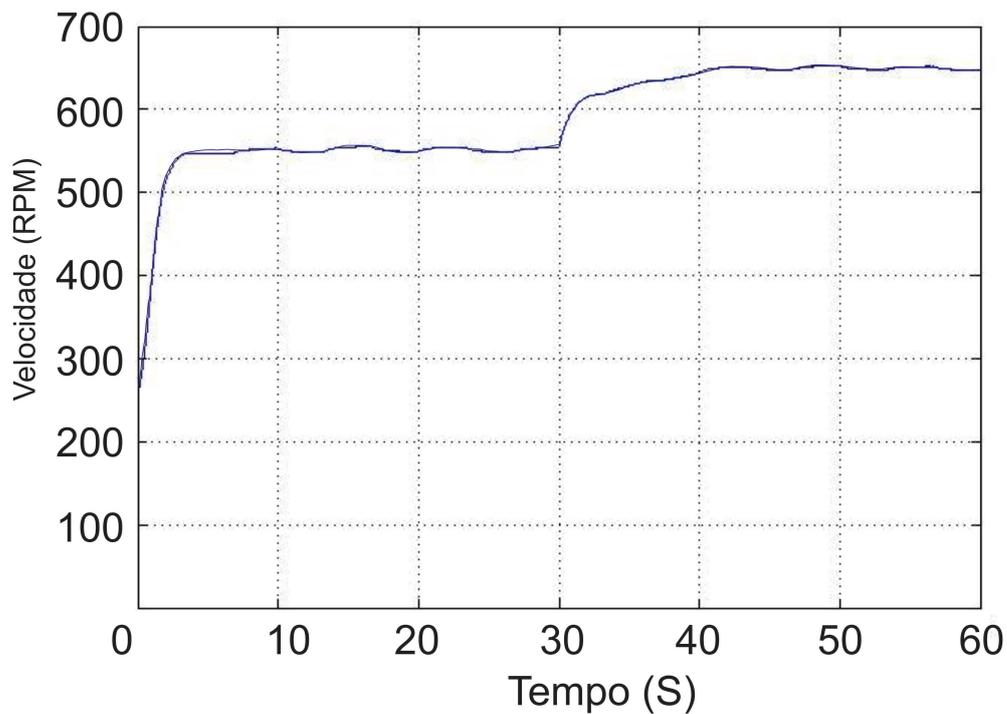
Já a forma de onda da tensão sobre o capacitor da entrada do *Boost*, demonstra o esforço do controle para manter uma tensão correspondente ao ponto de máxima potência na entrada do conversor, quando há mudança de velocidade do vento.

Figura 34 – Corrente de linha na saída do gerador.



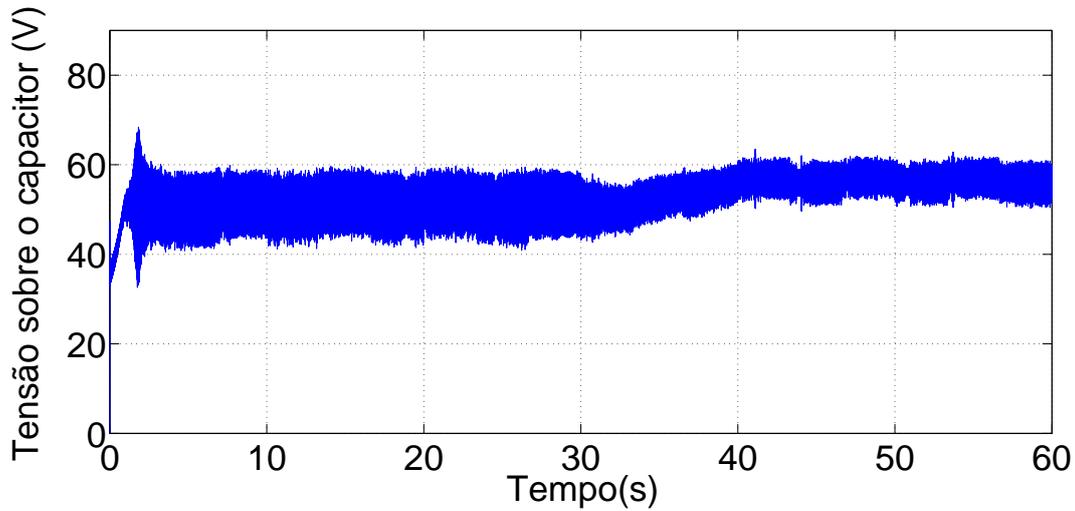
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 35 – Velocidade no eixo de acoplamento do sistema.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

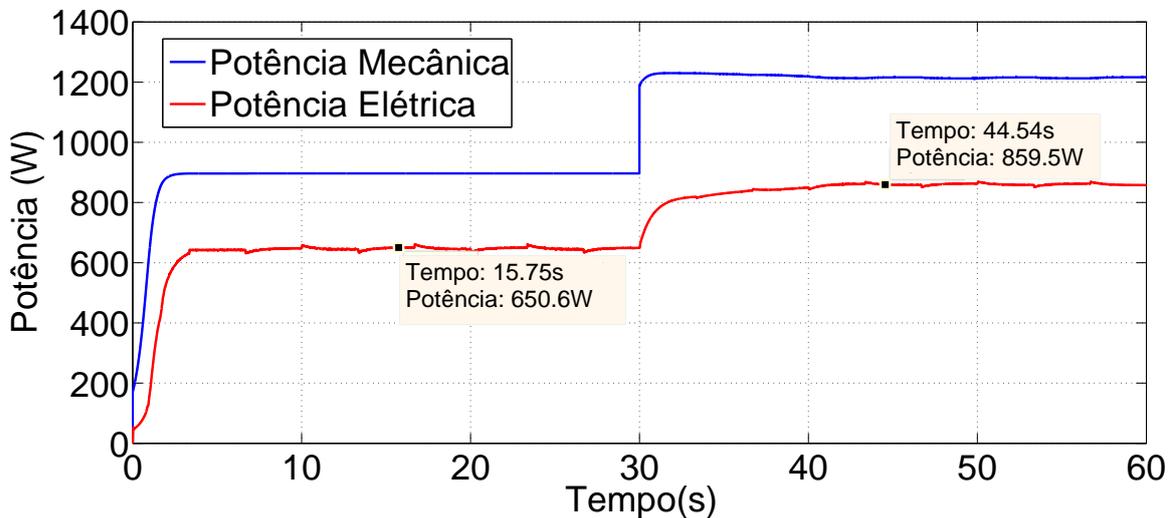
Figura 36 – Tensão sobre o capacitor na saída do retificador.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Também é possível analisar a potência mecânica e elétrica geradas pelo sistema, que é o parâmetro principal a ser maximizado. Para tanto, foram obtidas estas curvas em função do tempo, demonstrando sua resposta ao degrau de velocidade do vento imposto. O resultado é demonstrado na Figuras 37.

Figura 37 – Potência elétrica e mecânica do sistema.

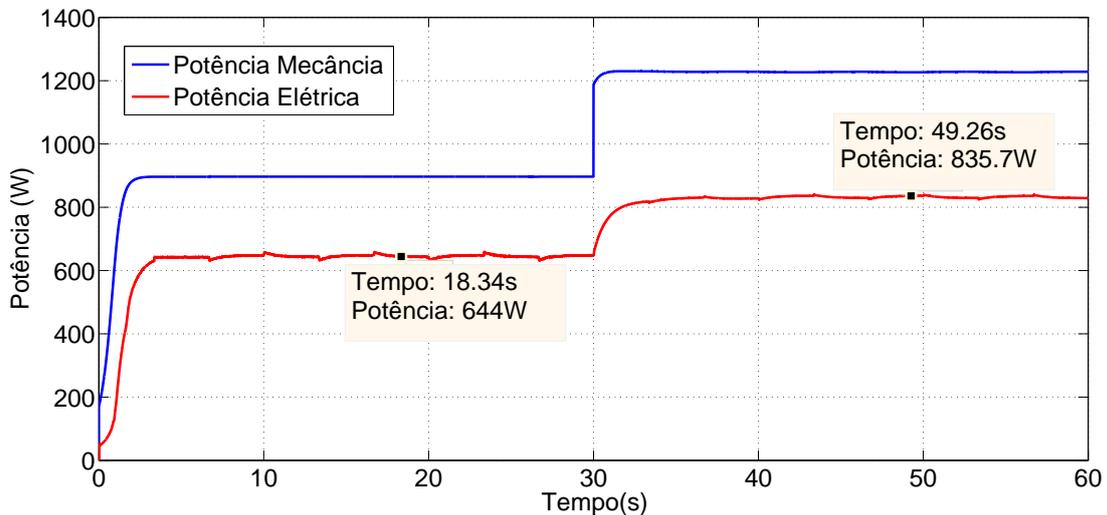


Fonte – Elaborado pelo Autor.

A partir dessas medições, foram modificados os parâmetros de constante de tempo do integrador ( $T_i$ ) e da amplitude da perturbação ( $V_{cont}$ ), para verificar sua influência no comportamento do controle realizado pelo MPPT. O valor inicial de  $T_i$  e  $V_{cont}$  eram respectivamente 1 e 0,2, sendo determinados inicialmente através de simulações. As variáveis verificadas são: potência elétrica na saída do retificador e potência mecânica na turbina. A tensão de saída do conversor foi mantida em 100V através do bloco de fonte de

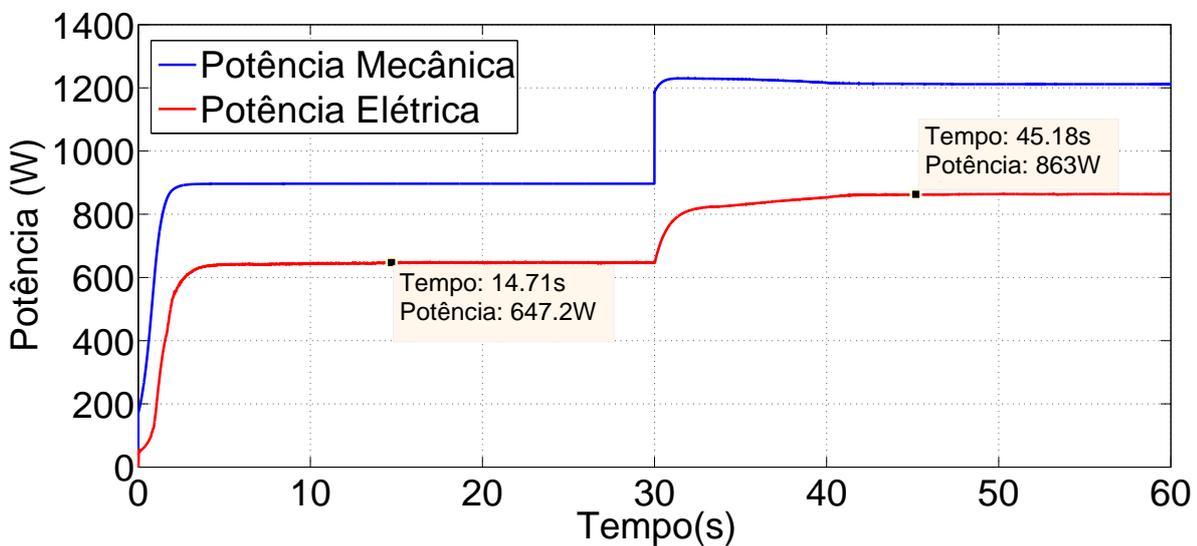
tensão com características de bateria, similar a atuação do inversor que será utilizado para conectar o sistema de geração a rede de energia elétrica (sistema *on grid*). Os resultados estão expostos nas Figuras 38, 39, 40 e 41.

Figura 38 – Potência gerada com amplitude de  $V_{cont}$  igual a 5.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

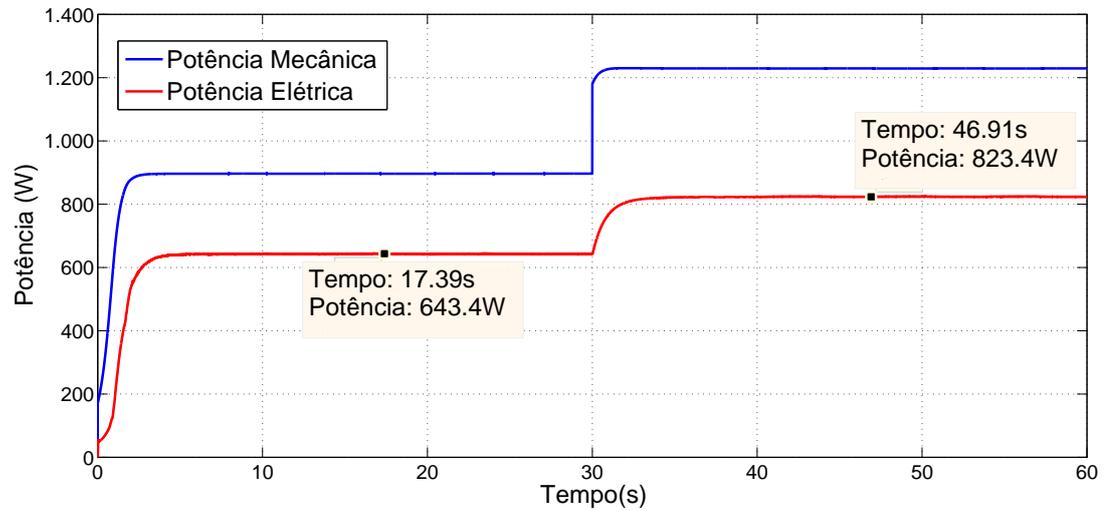
Figura 39 – Potência gerada com amplitude de  $V_{cont}$  igual a 0,02.



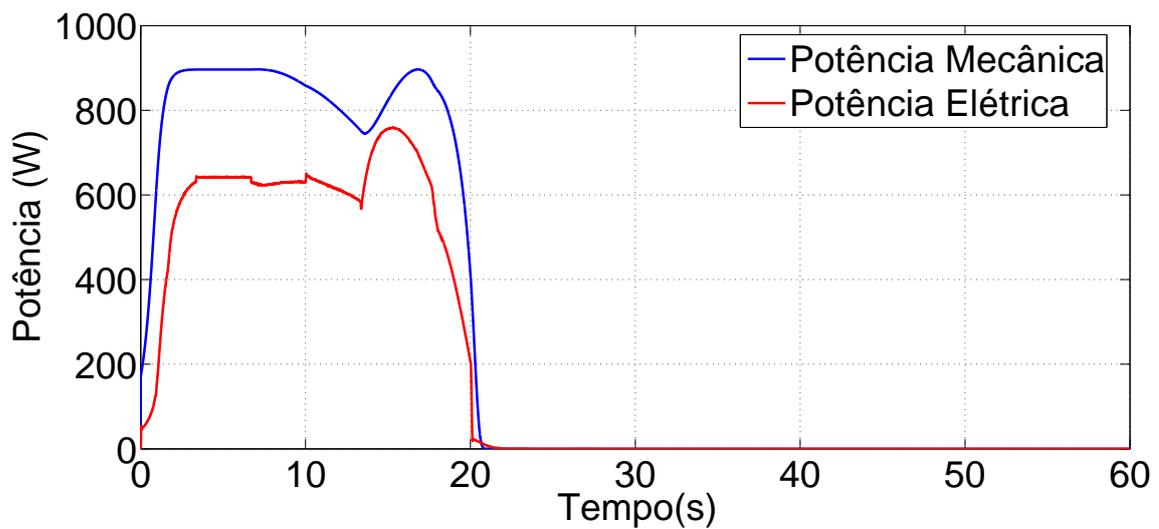
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Com relação a amplitude de perturbação  $V_{cont}$ , percebe-se que um menor valor resulta em um sistema com menor oscilação de potência elétrica, o que diminui o efeito de harmônicas no gerador, porém para degraus maiores de velocidade do vento o sistema pode demorar mais a se estabilizar.

Ao analisar as constantes de tempo, pode-se observar o descontrole do sistema quando seu valor é muito baixo. Isso pode ser um problema quando se tiver sistemas com

Figura 40 – Potência gerada com ajuste de  $T_i$  igual a 20.

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 41 – Potência gerada com ajuste de  $T_i$  igual a 0,02.

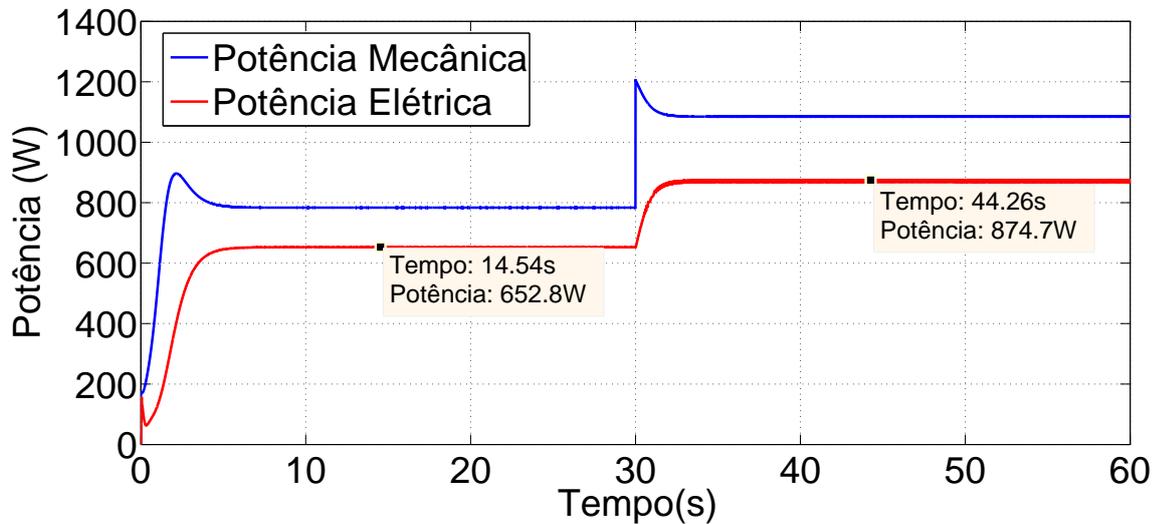
Fonte – Elaborado pelo Autor.

dinâmicas diferentes das utilizadas nessas simulações, e deverá ser motivo de estudo na etapa de escolha do tipo de controle MPPT a ser utilizado.

## 4.2 Resultados da Estratégia Fuzzy

Após o desenvolvimento da estratégia MPPT Fuzzy na seção 3.3, foram realizadas simulações semelhantes as realizadas na estratégia P&O, e foram obtidas novas curvas de potência mecânica e elétrica, para uma velocidade do vento inicial de  $9m/s$  e degrau unitário de  $1m/s$ . O resultado é demonstrado na Figura 42.

Analisando a Figura 42, observa-se uma menor amplitude de oscilação na potência

Figura 42 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com algoritmo *Fuzzy*.

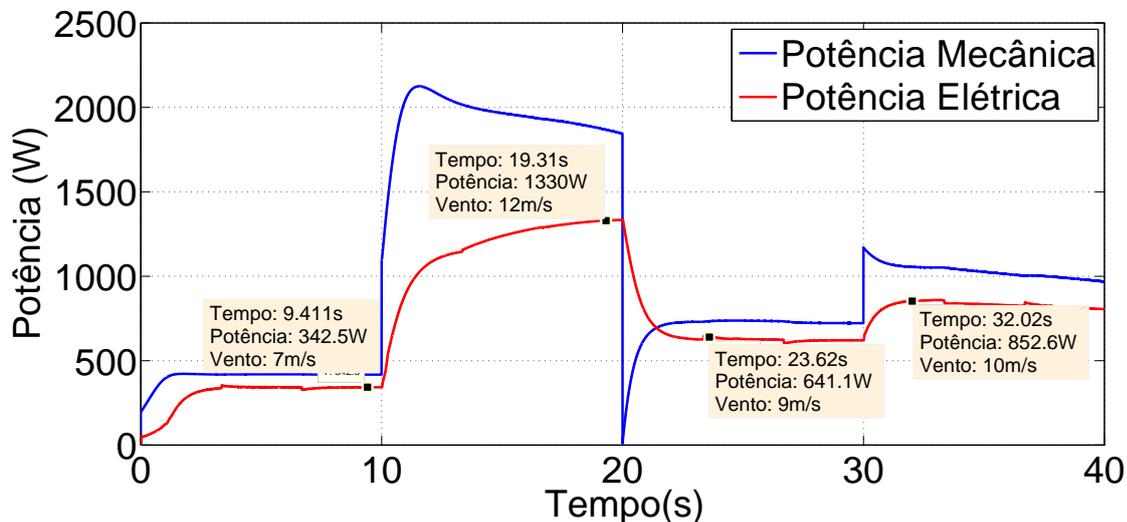
Fonte – Elaborado pelo Autor.

elétrica quando utilizada a estratégia *Fuzzy*, em virtude de não haver uma perturbação constante no sistema, necessária na estratégia P&O.

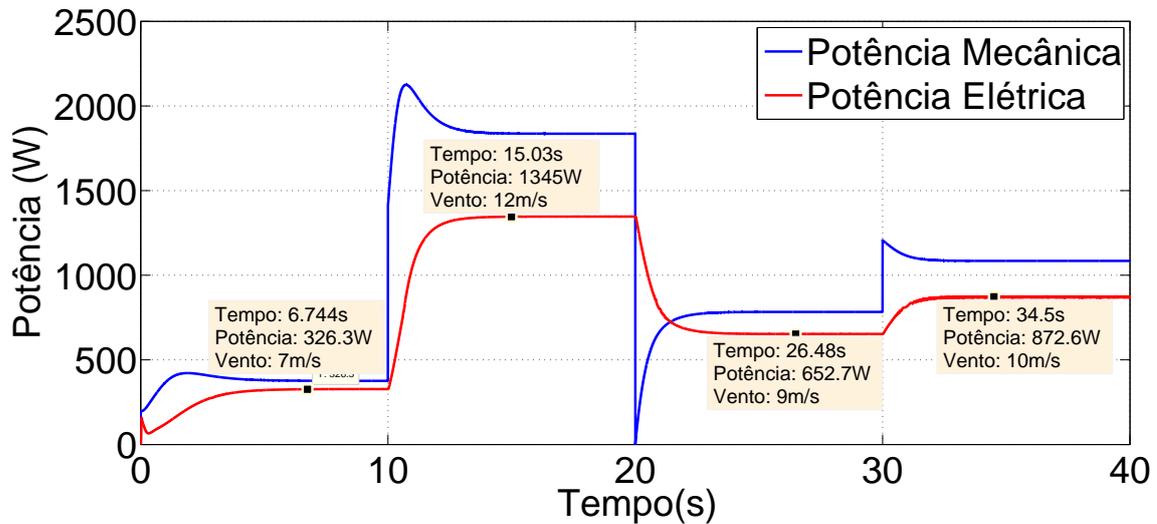
### 4.3 Comparações entre as Estratégias *Fuzzy* e P&O

Para uma melhor análise das estratégias P&O e *Fuzzy*, foram realizadas simulações com vários níveis de velocidade do vento para ambos os casos. Apesar de que em situações prática não existirem degraus de velocidade do vento, essas simulações demonstram a estabilidade das estratégias com a variação desse parâmetro, que pode ser visto nas Figuras 43 e 44.

Figura 43 – Comportamento do sistema com variação da velocidade do vento, para estratégia P&amp;O.



Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 44 – Comportamento do sistema com variação da velocidade do vento, para estratégia *Fuzzy*.

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Os degraus de velocidade do vento foram aplicados aos 10, 20 e 30 segundos. Os resultados demonstram um menor tempo de convergência quando utilizada a estratégia *Fuzzy*, além de uma amplitude de potência sem as oscilações observadas na estratégia P&O, pela ausência da perturbação constante no sistema.

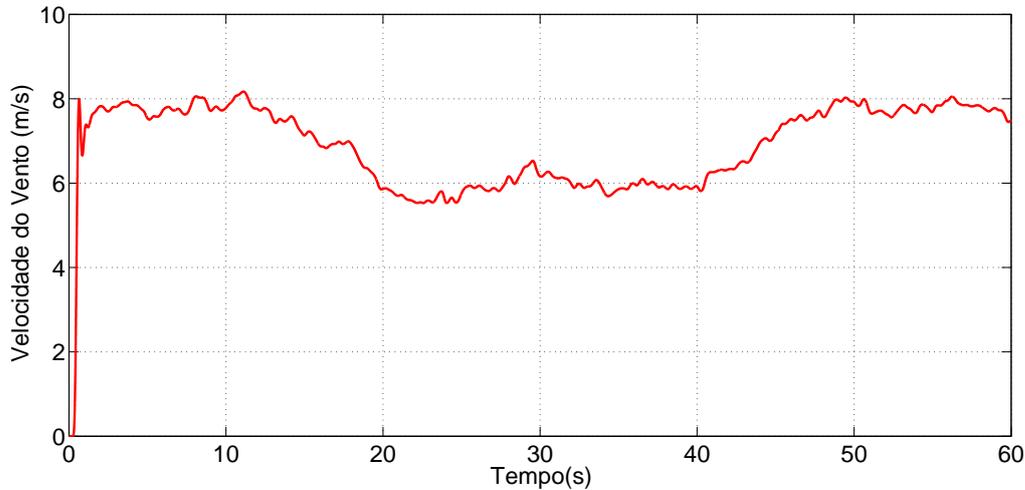
#### 4.4 Aplicação das Séries Temporais à Estratégia *Fuzzy*

Visto as vantagens da estratégia *Fuzzy*, e com o intuito de aproximar as simulações dessa estratégia para uma situação real de funcionamento da turbina eólica, a fonte constante utilizada como sinal de velocidade do vento, foi substituída pelo circuito gerador de séries temporais de velocidade do vento. Este foi conectado ao circuito de controle que possui o controlador implementado em código *C*.

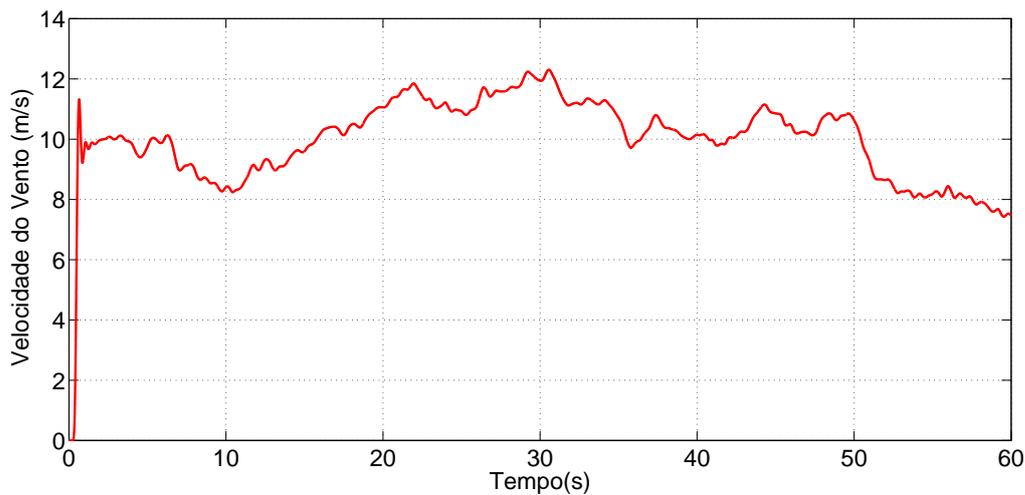
Os parâmetros de entrada para o circuito emulador das séries temporais foram comprimento de turbulência  $L_t = 100$ , considerando uma altura máxima da turbina de  $15m$ , com coeficiente de turbulência longitudinal  $k_\sigma = 12$ . Para a velocidade média anual, o valor adotado foi maior que o normalmente registrado no país (MME, 2017), para o perfil de velocidade atingir os níveis já simulados anteriormente. Foram realizadas simulações com  $v_a = 7m/s$  e  $v_a = 10m/s$ . O perfil de velocidade de vento obtido com  $v_a = 7m/s$  pode ser observado na Figura 45:

Para a velocidade anual de vento  $v_a = 10m/s$ , o perfil resultante é demonstrado na Figura 46.

Com a aplicação dessas velocidades como sinal de entrada do circuito emulador da turbina eólica, a estratégia MPPT *Fuzzy* com o controlador programado através de linha de código foi simulada. Para velocidade anual do vento de  $v_a = 7m/s$ , a potência elétrica e mecânica resultantes estão dispostas na Figura 47.

Figura 45 – Perfil da velocidade do vento com  $v_a = 7m/s$ .

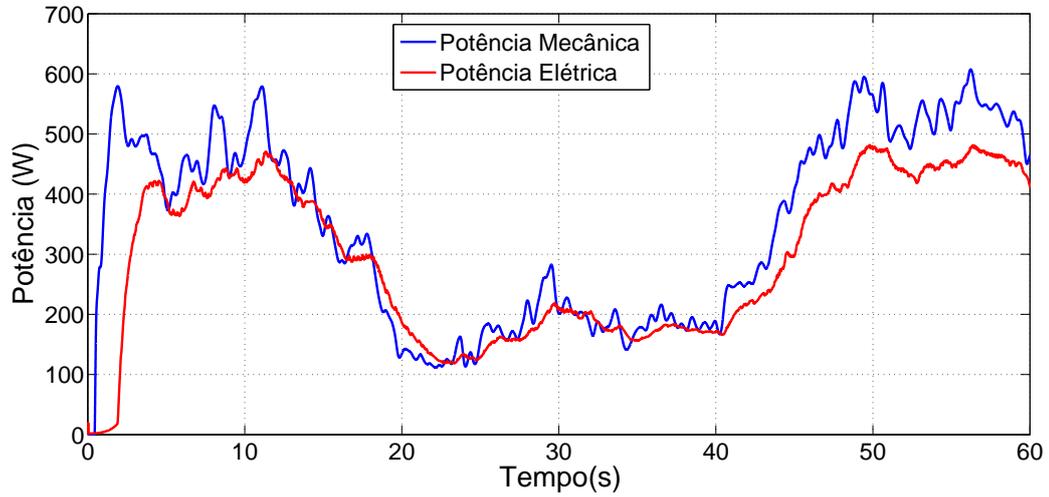
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 46 – Perfil da velocidade do vento com  $v_a = 10m/s$ .

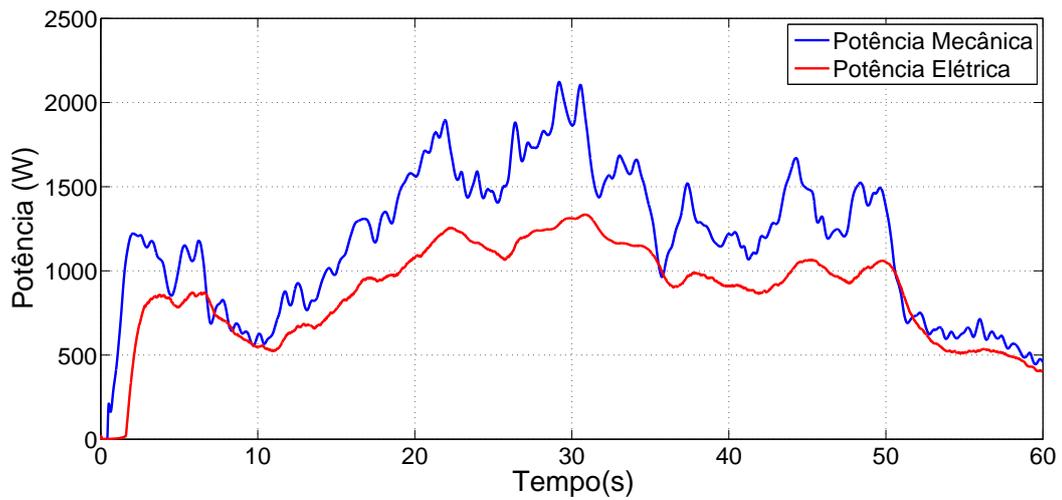
Fonte – Elaborado pelo Autor.

Modificando a velocidade do vento anual para  $v_a = 10m/s$ , e realizando novamente a simulação, as potências elétrica e mecânica obtidas são demonstradas na Figura 48.

Analisando os resultados quando aplicadas as duas séries temporais de velocidade do vento, percebe-se que a potência elétrica resultante possui uma oscilação mais elevada comparada aos resultados quando aplicado degraus de velocidade do vento. Isso se deve ao reflexo das variações da velocidade na potência mecânica e por consequência na potência elétrica. Contudo, a estratégia *Fuzzy* mostra-se capaz de buscar o ponto de máxima potência mesmo nessas condições, que são similares a situações reais de um sistema de conversão de energia eólica.

Figura 47 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com  $v_a = 7m/s$ .

Fonte – Elaborado pelo Autor.

Figura 48 – Potência elétrica e mecânica do sistema, com  $v_a = 10m/s$ .

Fonte – Elaborado pelo Autor.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento das estratégias de controle MPPT P&O e *Fuzzy* para aerogeradores de pequeno porte. A partir das premissas teóricas expostas, foi possível perceber a natureza não estável do fluxo dos ventos devido à sua característica estocástica, que acarreta em uma busca constante pelo ponto ótimo do TSR. Para essa busca, necessita-se utilizar estratégias MPPT aplicadas ao controle de um conversor estático CC-CC, porém, muitos sistemas convencionais não possuem este conversor ou se possuem, utilizam técnicas MPPT rudimentares.

A implementação do sistema de conversão de energia forneceu um circuito que emula um sistema real do conjunto da turbina eólica, além do desenvolvimento de um gerador de séries temporais de vento, fornecendo um perfil prático de velocidade de vento ao sistema. Quanto ao sistema de controle, a co-simulação entre os *software MATLAB Simulink*<sup>®</sup> e *PSIM*<sup>®</sup>, através da função *SimCoupler* foi de grande valia, possibilitando a implementação da estratégia *Fuzzy* com mais agilidade. Porém o desenvolvimento do controlador *Fuzzy* através de linha de código proveu maiores possibilidades de ajustes, além de facilitar a montagem prática do circuito posteriormente.

Com relação aos resultados obtidos com aplicação das estratégias MPPT, estes evidenciam a importância da busca pelo ponto de máxima potência, e a superioridade da estratégia *Fuzzy* sobre a estratégia P&O, que por não perturbar constantemente o sistema, apresenta menor oscilação na amplitude da potência elétrica e tempo de convergência reduzido, com ajustes que melhor adaptam-se a mudanças no sistema. Abordando a simulação da estratégia *Fuzzy* com a aplicação da série temporal de velocidade do vento, o controle se mostrou dinâmico, respondendo as oscilações abruptas e mantendo a busca pelo ponto de máxima potência.

Estes resultados em conjunto com as metodologias desenvolvidas para simulação e a implementação do controlador *Fuzzy* em código *C*, proporcionam uma base para simulação efetiva de um sistema real, atendendo aos objetivos propostos nesse trabalho.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Para continuação das atividades desenvolvidas até o momento atual, sugere-se as seguintes ações:

- Refinamento das funções de pertinência e regras bases da estratégia *Fuzzy*;
- Realizar outras comparações entre as duas estratégias MPPT propostas;
- Simulação das séries temporais de velocidade do vento para outras velocidades anuais;

- Montagem prática do conversor *Boost* e programação do controle em um dispositivo de processamento de sinais digitais.

## REFERÊNCIAS

- AMEI, K. et al. A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit. In: *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 3, p. 1447–1452 vol.3. Citado na página 39.
- BHANDARE, A. M.; BANDEKAR, P. J.; MANE, S. S. Wind energy maximum power extraction algorithms: A review. In: *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 495–5009. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.
- DALALA, Z. M. et al. Design and analysis of an mppt technique for small-scale wind energy conversion systems. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion*. [S.l.: s.n.], 2013. (3, v. 28), p. 756–767. Citado na página 40.
- ECHCHAACHOUAI, A. et al. Low-cost maximum power point tracking structure of a grid connected wind conversion chain based on a pmsg. In: *2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 93–98. Citado na página 29.
- ECKSTEIN, R. H. *Simulador de Turbinas Eólicas de Velocidade Variável*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Citado na página 36.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics*. 2. ed. Massachusetts, USA: Springer Science & Business Media, 2007. Citado na página 45.
- HART, D. *Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos*. [s.n.], 2016. ISBN 9788580550474. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-b5TDQAAQBAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 45, 46 e 47.
- HEIER, S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. 2. ed. UK: John Wiley and Sons, 2006. Citado na página 37.
- HUI, J.; BAKHSHAI, A. A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems. In: *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 4003–4007. ISSN 0275-9306. Citado na página 39.
- HUI, J.; BAKHSHAI, A.; JAIN, P. K. An adaptive approximation method for maximum power point tracking (mppt) in wind energy systems. In: *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2664–2669. Citado na página 30.
- HUSSEIN, M. M. et al. Simple sensorless control technique of permanent magnet synchronous generator wind turbine. In: *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 512–517. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 40.
- KOTTI, R.; JANAKIRAMAN, S.; SHIREEN, W. Adaptive sensorless maximum power point tracking control for pmsg wind energy conversion systems. In: *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–8. Citado na página 40.

- KUMAR, A. V. P.; PARIMI, A. M.; RAO, K. U. Implementation of mppt control using fuzzy logic in solar-wind hybrid power system. In: *2015 IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 42.
- LAHFAOUI, B. et al. Experimental study of p&o mppt control for wind pmsg turbine. In: *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado na página 40.
- MARTINS, M. *Avaliação da Qualidade de Energia e Performace de Potência de Turbinas Eólicas Conectadas a Rede*. 170 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010. Citado na página 32.
- MISHRA, S. et al. Comprehensive review on maximum power point tracking techniques: Wind energy. In: *2015 Communication, Control and Intelligent Systems (CCIS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 464–469. Citado 5 vezes nas páginas 27, 39, 40, 41 e 42.
- MME. *Energia Eólica no Brasil e Mundo: Ano de referência - 2016*. [S.l.]: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 69.
- MULLANE, A.; LIGHTBODY, G.; YACAMINI, R. Adaptive control of variable speed wind turbines. In: *Rev. Energ. Ren.: Power Engineering*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 101–110. Citado na página 39.
- MUSUNURI, S.; GINN, H. L. Comprehensive review of wind energy maximum power extraction algorithms. In: *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 41.
- PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. *Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing*. Wiley, 2007. (Wiley - IEEE). ISBN 9780470168950. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=VIFUBIMDqLsC>>. Citado na página 42.
- PINTO, M. de O. *Fundamentos de energia eólica*. Grupo Gen - LTC, 2013. ISBN 9788521621607. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xrK9NAEACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 36.
- POWERSIM. *PSIM Software: Tutorial on how to use the simcoupler module*. [S.l.], 2009. Disponível em: <[www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com)>. Citado na página 55.
- POWERSIM. *Psim User's Guide*. [S.l.], 2010. Disponível em: <[www.powersimtech.com](http://www.powersimtech.com)>. Citado na página 51.
- REN21. *Renewables 2017 global status report*. [S.l.]: REN21 Secretariat, 2017. Citado na página 27.
- SHAW, I.; SIMOES, M. *Controle e modelagem fuzzy*. Edgard Blucher, 1999. ISBN 9788521202486. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=T3NgPwAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- TIBOLA, G. *Sistema Eólico de Pequeno Porte Para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2009. Citado 9 vezes nas páginas 29, 34, 38, 40, 49, 51, 53, 54 e 63.

WILSON, R. E.; LISSAMAN, P. B. S. *Applied Aerodynamics of Wind Power Machine*. Oregon: [s.n.], 1974. Citado na página 37.

ZENG, Q.; CHANG, L.; SHAO, R. Fuzzy-logic-based maximum power point tracking strategy for pmsg variable-speed wind turbine generation systems. In: *2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 405–410. Citado na página 42.

ZHAO, Y. et al. A review on position/speed sensorless control for permanent-magnet synchronous machine-based wind energy conversion systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 1, n. 4, p. 203–216, Dec 2013. ISSN 2168-6777. Citado na página 40.



## **Anexos**



**ANEXO A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLADOR *FUZZY*  
DESENVOLVIDO NO *BLOCK C* DO *SOFTWARE PSIM*®**

```

// Declaração das Variáveis//
// Vetores das Funções de Pertinência, entradas e Regras//
double MFent1 [5][2];
double MFent2 [5][2];
double MFSaida [5][2];
double entradas [2];
double Regras [25][3];
// Auxiliares de Contagem//
int m = 25;
int n = 3;
int a;
int b;
double p;
int i;
int j;
int nument = 2; //Define entradas como 2
// Auxiliares Fuzzificação//
double sigma;
double c;
double fuzzificacao [25][2];
double acum1;
double acum2;
double opfuzzy [25];
// Auxiliares Implicação//
double int1saida = -0.1;
double int2saida = 0.1;
double npontos = 101; // Numero de pontos para implicação
double h;
double V[101];
int tamV = 101;
double invalue = -0.1;
int sizeV = 101;
double implicacao [25][101];
// Auxiliar Composição Saídas//
double agreg [101];

```

```

// Auxiliares Método Centróide defuzzificação//
double numerador [101];
double denominador [101];
double soma;
double In;
double Id;
double  $X_{defuzzy}$ ;
// Auxiliar contagem e razão cíclica//
static int contador = 0;
double Duty;
int Tempo = 50000; // iteração a cada 5ms
// Define as Funções de Pertinência Entrada 1//
 $MF_{ent1}$  [0][0] = 0.2123;
 $MF_{ent1}$  [1][0] = 0.1699;
 $MF_{ent1}$  [2][0] = 0.1699;
 $MF_{ent1}$  [3][0] = 0.1699;
 $MF_{ent1}$  [4][0] = 0.2123;
 $MF_{ent1}$  [0][1] = -1;
 $MF_{ent1}$  [1][1] = -0.4;
 $MF_{ent1}$  [2][1] = 0;
 $MF_{ent1}$  [3][1] = 0.4;
 $MF_{ent1}$  [4][1] = 1;
// Define as Funções de Pertinência Entrada 2//
 $MF_{ent2}$  [0][0] = 0.2123;
 $MF_{ent2}$  [1][0] = 0.1699;
 $MF_{ent2}$  [2][0] = 0.1699;
 $MF_{ent2}$  [3][0] = 0.1699;
 $MF_{ent2}$  [4][0] = 0.2123;
 $MF_{ent2}$  [0][1] = -1;
 $MF_{ent2}$  [1][1] = -0.4;
 $MF_{ent2}$  [2][1] = 0;
 $MF_{ent2}$  [3][1] = 0.4;
 $MF_{ent2}$  [4][1] = 1;
// Define as Funções de Pertinência Saida//
 $MF_{Saida}$  [0][0] = 0.02828;
 $MF_{Saida}$  [1][0] = 0.02122;
 $MF_{Saida}$  [2][0] = 0.01699;
 $MF_{Saida}$  [3][0] = 0.02122;
 $MF_{Saida}$  [4][0] = 0.02832;

```

---

```
MFSaida [0][1] = -0.1;
MFSaida [1][1] = -0.05;
MFSaida [2][1] = 0;
MFSaida [3][1] = 0.05;
MFSaida [4][1] = 0.1;
// Define as regras bases//
Regras [0][0] = 0;
Regras [1][0] = 0;
Regras [2][0] = 0;
Regras [3][0] = 0;
Regras [4][0] = 0;
Regras [5][0] = 1;
Regras [6][0] = 1;
Regras [7][0] = 1;
Regras [8][0] = 1;
Regras [9][0] = 1;
Regras [10][0] = 2;
Regras [11][0] = 2;
Regras [12][0] = 2;
Regras [13][0] = 2;
Regras [14][0] = 2;
Regras [15][0] = 3;
Regras [16][0] = 3;
Regras [17][0] = 3;
Regras [18][0] = 3;
Regras [19][0] = 3;
Regras [20][0] = 4;
Regras [21][0] = 4;
Regras [22][0] = 4;
Regras [23][0] = 4;
Regras [24][0] = 4;
Regras [0][1] = 0;
Regras [1][1] = 1;
Regras [2][1] = 2;
Regras [3][1] = 3;
Regras [4][1] = 4;
Regras [5][1] = 0;
Regras [6][1] = 1;
Regras [7][1] = 2;
```

Regras [8][1] = 3;  
Regras [9][1] = 4;  
Regras [10][1] = 0;  
Regras [11][1] = 1;  
Regras [12][1] = 2;  
Regras [13][1] = 3;  
Regras [14][1] = 4;  
Regras [15][1] = 0;  
Regras [16][1] = 1;  
Regras [17][1] = 2;  
Regras [18][1] = 3;  
Regras [19][1] = 4;  
Regras [20][1] = 0;  
Regras [21][1] = 1;  
Regras [22][1] = 2;  
Regras [23][1] = 3;  
Regras [24][1] = 4;  
Regras [0][2] = 2;  
Regras [1][2] = 2;  
Regras [2][2] = 4;  
Regras [3][2] = 4;  
Regras [4][2] = 4;  
Regras [5][2] = 2;  
Regras [6][2] = 1;  
Regras [7][2] = 3;  
Regras [8][2] = 3;  
Regras [9][2] = 3;  
Regras [10][2] = 3;  
Regras [11][2] = 2;  
Regras [12][2] = 2;  
Regras [13][2] = 2;  
Regras [14][2] = 1;  
Regras [15][2] = 1;  
Regras [16][2] = 1;  
Regras [17][2] = 1;  
Regras [18][2] = 3;  
Regras [19][2] = 2;  
Regras [20][2] = 0;  
Regras [21][2] = 0;

```
Regras [22][2] = 0;
Regras [23][2] = 2;
Regras [24][2] = 2;
// Início da Rotina do Controlador !!!!//
entradas [0] = in [0]; // recebe entrada 1
entradas [1] = in [1]; // recebe entrada 2
// Saturação das Entradas//
if (entradas [0] > 1)
{
entradas [0] = 1;
}
if (entradas [1] > 1)
{ entradas [1] = 1; }
if (entradas [0] < -1)
{
entradas [0] = -1;
}
if (entradas [1] < -1)
{
entradas [1] = -1;
}
// Recebe Razão ciclica//
Duty = in [2];
// Inicia Razão Cíclica em 0.5//
if (t < 0.3)
{ contador = 0;
Duty = 0.5;
out[0] = Duty;
}
else if ( contador > Tempo) // Rotina aplicação das regras//
{
for (i=0; i<m; i++)
{
for (j=0; j< nument; j++)
{
p =entradas [j];
a= Regras [i] [0];
b= Regras [i] [1];
if ( j==0)
```

```

{
sigma = MFent1 [a][0];
c = MFent1 [a][1];
}
else
{
sigma = MFent2 [b][0];
c = MFent2 [b][1];
}
fuzzificacao [i][j] = exp(-pow((p-c),2)/(2*pow(sigma,2)));
}
}
// Implicação, método min//
for (i=0; i<m; i++)
{
acum1 = fuzzificacao [i][0];
acum2 = fuzzificacao [i][1];
if (acum1 > acum2) // Operador Fuzzy
{
opfuzzy [i]= acum2;
}
else
{
opfuzzy [i]= acum1; }
}
// Agregação e truncamento//
h = (int2saida - int1saida)/npontos;
for (i=0; i<tamV; i++)
{
V[i]= invalue;
invalue = invalue +h;
}
for (i=0; i<m; i++)
{
a= Regras [i] [2];
for (j=0; j<tamV; j++)
{
p = V[j];
sigma = MFSaida [a][0];

```

---

```

c = MFSaida [a][1];
implicacao [i][j] = exp(-pow((p-c),2)/(2*pow(sigma,2)));
if ( implicacao [i][j] >= opfuzzy [i])
{
implicacao [i][j] = opfuzzy [i];
}
}
}
// Composição, máx//
for (j=0; j<tamV; j++)
{
acum1 = implicacao [0][j];
for (i=0; i<m-1; i++)
{
if (acum1 > implicacao [i+1][j])
{
agreg [j]= acum1;
}
else
{
agreg [j]= implicacao [i+1][j];
}
acum1 = agreg [j];
}
}
//Aplicação Centróide//
for (j=0; j<tamV; j++)
{
numerador [j] = agreg [j] * V[j];
}
for (j=0; j<tamV; j++)
{ denominador[j] = agreg [j];
}
// Integração, Método Trapézio//
soma = 0;
for (i=1; i<tamV-1; i++) {
soma = soma + numerador [i];
}
In = (h/2) * (numerador[1]+ 2* soma + numerador[tamV-1] );

```

```
soma = 0;
for (i=1; i<tamV-1; i++) {
soma = soma + denominador [i];
}
Id = (h/2) * (denominador[1]+ 2* soma + denominador[tamV-1] );
 $X_{defuzzy} = In / Id$ ; // Calculo Centróide
// D +  $\Delta D$ //
Duty = Duty +  $X_{defuzzy}$ ;
contador =0;// Zera Contagem
// Saturação da Saida//
if (Duty < 0.1)
{
Duty = 0.1;
out[0] = Duty;
}
else if (Duty > 0.85)
{
Duty = 0.85;
out[0] = Duty;
}
// Saída não Saturada//
else
{
out[0] = Duty; }
}
// Saída fora do período de amostragem, contínua //
else
{
out[0] = Duty;
}
contador ++;// Incrementa Contagem
```