

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE MPPT BASEADAS EM CONTROLADOR FUZZY E O ALGORITMO BETA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO CONVERSOR CC-CC SEPIC

SILAS MARTINS SOUSA*, GIOVANI GUIMARÃES RODRIGUES*, CAIO MEIRA AMARAL DA LUZ†, HEVERTON AUGUSTO PEREIRA‡

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

†*Universidade Federal de São João Del Rei
São João Del Rei, Minas Gerais, Brasil*

‡*Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Minas Gerais, Brasil*

Emails: silas-arcos@hotmail.com, giovani@des.cefetmg.br, caiomeiramara@hotmail.com, hevertonaugusto@yahoo.com.br

Abstract— This paper presents the comparison between the MPPT methods by Fuzzy Control and the classic Beta method. These methods are implemented in a DC-DC SEPIC converter to extract maximum efficiency from Photovoltaic Systems. This paper also proposes a solution to oscillation problem in output signal of Fuzzy Controller. The results showed that Fuzzy MPPT provided better performance in transient response allowing a shorter stabilization time. Control signal oscillations were attenuated inserting a first order filter without compromising Fuzzy Controller good performance.

Keywords— MPPT, Photovoltaic Systems, Fuzzy Control, Beta, SEPIC Converter.

Resumo— Este artigo apresenta uma comparação entre os métodos MPPT por controlador *Fuzzy* e o método clássico Beta. Esses métodos são implementados em um conversor CC-CC SEPIC para extrair a eficiência máxima de sistemas fotovoltaicos. Este artigo também propõe uma solução para o problema de oscilação no sinal de saída do Controlador *Fuzzy*. Os resultados mostraram que o MPPT *Fuzzy* proporcionou melhor desempenho em relação à resposta transitória, possibilitando um tempo de estabilização menor. As oscilações do sinal de controle foram atenuadas com a inserção de um filtro de primeira ordem sem comprometer o bom desempenho do Controlador *Fuzzy*.

Palavras-chave— MPPT, Sistemas Fotovoltaicos, Controle *Fuzzy*, Beta, Conversor SEPIC.

1 Introdução

Diante do aumento mundial do consumo de energia elétrica, em especial devido ao desenvolvimento tecnológico, faz-se necessária a utilização de fontes alternativas de energia para complementar a matriz energética mundial. Nesse contexto a energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque (Miranda, 2003).

A energia fotovoltaica tem algumas características que a torna uma das mais promissoras fontes de energias renováveis (Chiu, 2010): conversão direta da energia do sol em energia elétrica; como não há partes móveis gera pouca manutenção; além de não gerar poluição no processo de conversão de energia.

O Brasil é um país privilegiado em termos de radiação solar, principalmente a região Nordeste que possui irradiação (W/m^2) equiparável a regiões do deserto do Saara (ANEEL, 2008). A estrutura de um sistema fotovoltaico é composta por painel, conversor e a carga.

Para extrair a máxima eficiência dos painéis fotovoltaicos são utilizados métodos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (do inglês *Maximum Power Point Tracking* MPPT) que ras-

treiam a potência máxima para variações de radiação solar e temperatura.

Na literatura existem vários trabalhos comparando o método MPPT *Fuzzy* com o Perturbe e Observe (P&O) (Tavares, 2009) (Confessor and Villarreal, 2016) (Moçambique et al., 2011), porém esta última técnica é ineficiente frente às variações de radiação solar e temperatura e possui alto erro em regime permanente (inerentes à técnica) (Khateb et al., 2014).

A contribuição deste trabalho é projetar um MPPT utilizando controlador *Fuzzy* e compará-lo ao método MPPT Beta quanto à eficiência na extração de potência de painéis fotovoltaicos. Os testes foram realizados utilizando conversor CC-CC SEPIC (*Single-Ended Primary Inductor Converter*). Outra contribuição importante é a análise do sinal de controle do MPPT Fuzzy, o qual apresenta oscilações, abordagem essa não realizada nos trabalhos citados.

2 Sistemas Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos, ou do inglês *photovoltaic* (PV), são formados de arranjos de pequenas células solares constituídas de *wafer* de silício mono-

cristalino ou policristalino. A conversão de energia fotovoltaica acontece pelo efeito fotovoltaico, em que a incidência de fótons em um material de junção semicondutora pn é capaz de gerar corrente elétrica contínua (Stevenson, 2008).

A modelagem matemática do painel fotovoltaico é realizada por meio de um circuito elétrico equivalente composto por componentes eletrônicos, obtendo assim a curva I-V. A abordagem utilizada é o modelo de um diodo, conforme mostrado na Figura 1 (Moçambique et al., 2011).

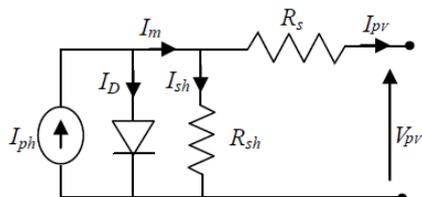


Figura 1: Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica de um diodo. Adaptado de (Confessor and Villarreal, 2016).

O circuito equivalente do modelo de um diodo, Figura 1, é muito utilizado pois garante bom compromisso entre simplicidade e precisão. Este circuito permite escrever a seguinte relação entre a corrente I_{pv} e a tensão de saída V_{pv} de uma célula fotovoltaica, Equação 1:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q}{nKT}(V_{pv} + R_s I)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{sh}}{R_{sh}} \quad (1)$$

Sendo:

- I_{pv} : Corrente de saída do painel fotovoltaico;
- I_{ph} : Corrente do fotodiodo;
- I_o : Corrente de saturação reversa (diodo);
- q : Carga Eletrônica;
- n : Fator de idealidade (diodo);
- K : Constante de Boltzmann;
- T : Temperatura da Célula;
- V_{pv} : Tensão de saída do painel fotovoltaico;
- R_s : Resistência Série;
- I_{sh} : Corrente na Resistência paralelo;
- R_{sh} : Resistência Paralelo;

Na saída do painel fotovoltaico há um conversor CC-CC que será apresentado a seguir.

2.1 Conversores CC-CC

A potência fornecida pelo painel fotovoltaico depende das condições ambientais (temperatura e radiação solar) e também de sua carga. Os conversores CC-CC são utilizados para controlar a carga dinâmica por meio do ciclo de trabalho, alterando assim a tensão e a corrente drenada do painel.

Existe na literatura vários tipos de conversores de potência CC-CC. Alguns deles são: conversor abaixador de tensão (Buck), conversor elevador de tensão (Boost) e os conversores abaixadores

e elevadores de tensão: Buck-Boost, Zeta, Cuk e SEPIC (Britto, 2009). A Figura 2 mostra o circuito do conversor SEPIC.

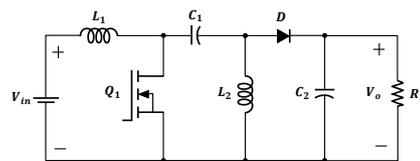


Figura 2: Circuito do conversor CC-CC SEPIC. Adaptado de (Confessor and Villarreal, 2016).

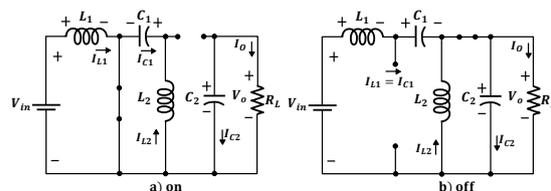


Figura 3: Estágios de funcionamento do conversor SEPIC, com chave: a) ligada e b) desligada.

O princípio de funcionamento do conversor SEPIC, no modo de condução contínua, consiste de dois estágios. No primeiro estágio (Figura 3a) a chave (MOSFET) é acionada e é representada como um curto-circuito, o diodo é bloqueado e é representado por um circuito aberto. O indutor L_1 armazena a energia da fonte, assim, as correntes nos indutores crescem e o capacitor C_2 alimenta a carga. No segundo estágio, Figura 3b, a chave abre e o diodo conduz, isso faz com que os indutores transfiram a energia armazenada para o capacitor C_2 e para a carga (Britto, 2009).

O sinal de controle que aciona o MOSFET do conversor SEPIC é enviado por um controlador mostrado a seguir.

3 Sistemas Fuzzy

Na teoria dos conjuntos clássicos um número pertence ou não a aquele conjunto. Nos conjuntos *fuzzy* (chamados também de difusos ou nebulosos) um número pertence ao conjunto com certo grau de pertinência. As principais operações entre conjuntos *fuzzy* são a União (o mesmo que obter o máximo de cada sinal ponto a ponto) e a Interseção (o mesmo que obter o mínimo).

As variáveis linguísticas *fuzzy* (ex.: Temperatura) podem ser expressas na forma de termos linguísticos como: “Baixa”, “Média” e “Alta”. As funções de pertinência podem ser de vários formatos como triangular, trapezoidal e gaussiana (Silva, 2011). Na Figura 4 é possível observar os termos linguísticos, alguns tipos de função de pertinência e também operações de máximo e mínimo.

O sistema completo do Controlador Fuzzy é composto pela Fuzzificação, Máquina de Inferência (com a Base de Regras) e a Defuzzificação. A

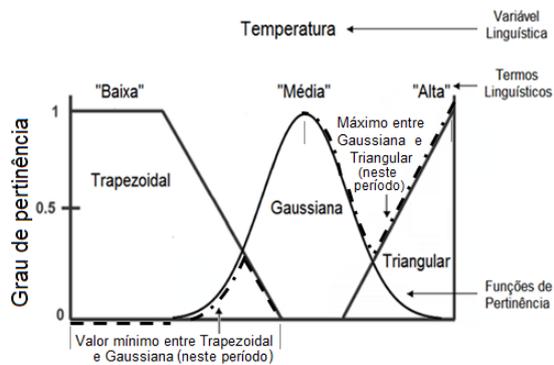


Figura 4: Variável linguística, termos linguísticos, funções de pertinência e operações de união (máximo) e interseção (mínimo).

Fuzzificação consiste em representar o problema real nos conjuntos *fuzzy*. Assim, surge a necessidade de um especialista para estabelecer os seguintes parâmetros: regras *fuzzy*, variáveis linguísticas, termos linguísticos e funções de pertinência.

O método de inferência de Mamdani é baseado na composição máximo-mínimo. Primeiro obtém-se o mínimo (interseção) entre os valores das entradas (antecedentes). Para obter a saída *fuzzy* (consequente) é feita a operação de união (máximo) dos valores encontrados anteriormente, conforme a Figura 5.

Um exemplo de regras *fuzzy* do método de Mamdani é mostrado na Equação 2:

$$\begin{cases} R_1 : \text{Se } x_0 \text{ é } A_1 \text{ e } y_0 \text{ é } B_1 \text{ Então } z \text{ é } C_1 \\ \text{ou} \\ R_2 : \text{Se } x_0 \text{ é } A_2 \text{ e } y_0 \text{ é } B_2 \text{ Então } z \text{ é } C_2 \end{cases} \quad (2)$$

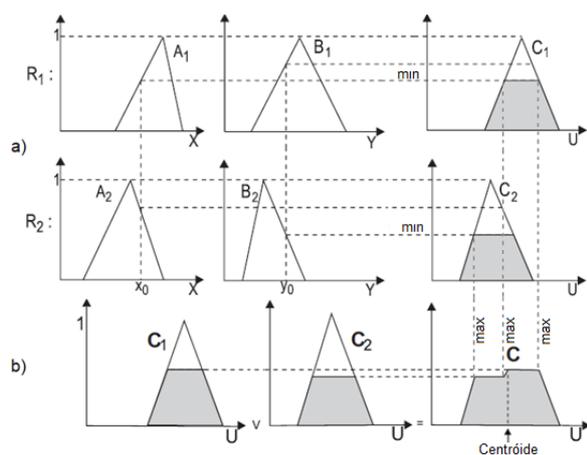


Figura 5: Representação gráfica de: a) regras *fuzzy*, expressões de inferência (Mamdani) e b) Defuzzificação. Adaptado de (Silva, 2011).

A Figura 5a mostra a inferência de Mamdani para duas entradas (x_0 e y_0), operação de interseção (mínimo). Na Figura 5b é realizado o processo de Defuzzificação, em que “C” é obtido por meio do centro de gravidade da área (ou centróide).

3.1 Métodos MPPT

O Rastreador do Ponto de Máxima Potência é um sistema que procura manter o painel trabalhando no Ponto de Máxima Potência (PMP). No módulo fotovoltaico o PMP varia durante o dia, pois depende da radiação solar e da temperatura. O objetivo do MPPT é obter a maior geração de potência para variações instantâneas de radiação e temperatura.

Os principais requisitos para um MPPT são (CEPEL et al., 2014):

- Rápida resposta dinâmica (ex.: variações de radiação devido às nuvens passageiras) e,
- Pequeno erro em regime permanente.

Existem vários métodos clássicos de MPPT, sendo eles: Perturbe e Observe, Condutância Incremental (IC), suas variações Perturbe e Observe modificado e Indutância Incremental modificado, Beta, Tensão constante e Razão cíclica constante (Brito et al., 2013). A técnica que se destaca entre os métodos clássicos é o MPPT Beta, considerado o que consegue extrair maior quantidade de energia, de 98 a 98,54 % (Li and Wen, 2016), com reduzida oscilação em regime permanente, boa resposta transitória e complexidade média de implementação (Brito et al., 2013).

O método Beta consiste na aproximação do ponto de máxima potência por meio do equacionamento de uma variável intermediária β , sendo esta variável destacada pela Equação 3:

$$\begin{cases} \beta = \ln\left(\frac{i_{pv}}{v_{pv}}\right) - c \times v_{pv} \\ c = \frac{q}{\eta_{cel} \times K \times T \times N_{cel}} \end{cases} \quad (3)$$

Onde c é um ganho, q é a carga eletrônica, η_{cel} é a eficiência da célula fotovoltaica, K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura da célula e N_{cel} é a quantidade de células fotovoltaicas em série.

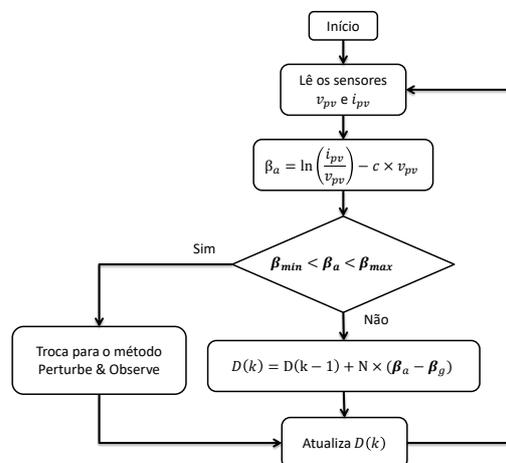


Figura 6: Fluxograma do método MPPT Beta. Adaptado de (Li et al., 2016).

O fluxograma da Figura 6 mostra o algoritmo do método Beta. Quando o valor de β_a está dentro dos limites estipulados (β_{min} e β_{max}) significa que β_a está em estado estacionário então o algoritmo é comutado para o método P&O. Caso β_a esteja fora dos valores estipulados (transitório) o valor do novo ciclo de trabalho é calculado (Li et al., 2016). No algoritmo Beta deste trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros: $\beta_{min} = -17,03$, $\beta_{max} = -12,07$, $\beta_g = (\beta_{min} + \beta_{max})/2$ e $N = 0,00002$.

4 Problema

O MPPT baseado no controlador Fuzzy, avaliado neste trabalho, objetiva rastrear o Ponto de Máxima Potência de painéis fotovoltaicos. Para isso será utilizado o modelo de um diodo, conforme a Figura 1, em conjunto com o conversor CC-CC SEPIC. O sistema será testado para uma carga puramente resistiva, por meio de simulações utilizando o *software* Matlab/Simulink. Para validar os dados o método proposto foi comparado ao MPPT Beta, que apresentou maior relevância entre os métodos clássicos.

5 Metodologia

O sistema de simulação do MPPT Fuzzy pode ser dividido em três partes: modelo do painel fotovoltaico, circuito do conversor CC-CC SEPIC e o controlador Fuzzy. A Figura 7 mostra o diagrama completo do MPPT Fuzzy e as três partes serão detalhadas a seguir.

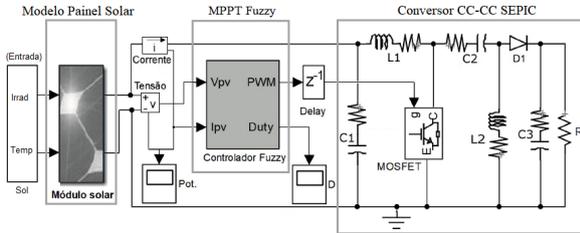


Figura 7: Diagrama de Simulação do Circuito de MPPT utilizando controlador Fuzzy.

5.1 Modelo do Painel Fotovoltaico

O bloco do modelo Fotovoltaico foi construído mediante a Equação 1, em que foram utilizadas as entradas de radiação solar e temperatura para gerar a corrente I_m , Equação 4. O valor de I_m é inserido na fonte de corrente (conforme o modelo de um diodo da Figura 1).

$$I_m = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q}{nKT}} (V_{pv} + R_s I) - 1 \right] \quad (4)$$

Os parâmetros do modelo do Painel Fotovoltaico foram determinados segundo o catálogo do fabricante para uma módulo fotovoltaico de 10W, conforme os parâmetros da Tabela 1.

Tabela 1: Características elétricas do painel fotovoltaico de 10W (para Irradiação de 1000 W/m^2 e Temperatura de 25°C). Fonte: (Solar Innova, 2018).

Potência Máxima (P_{pmp})	10 W
Tensão pot. Máxima (V_{pmp})	17,50 V
Corrente pot. Máxima (I_{pmp})	0,57 A
Tensão de Circ. Aberto (V_{oc})	21,52 V
Corrente Curto-circuito (I_{sc})	0,66 A
Qtd. de células em série (N_s)	36 células
Resistência Série (R_s)	0,255 Ω
Resistência em Parelelo (R_p)	62,5 Ω
Coefic. Tensão/Tempe. (K_v)	-0.0731 V/K
Coefic. Corrente/Tempe. (K_i)	0.00033 A/K

5.2 Conversor CC-CC SEPIC

O conversor CC-CC utilizado no presente trabalho é o SEPIC. Ele é um circuito abaixador-elevador de tensão que apresenta bom rastreamento, ideal para aplicação em MPPT Fotovoltaico (Coelho et al., 2009).

O trabalho de Britto (2009) apresenta a modelagem do conversor e o projeto dos componentes eletrônicos. A Figura 8 mostra o circuito do SEPIC e os valores dos componentes utilizados.

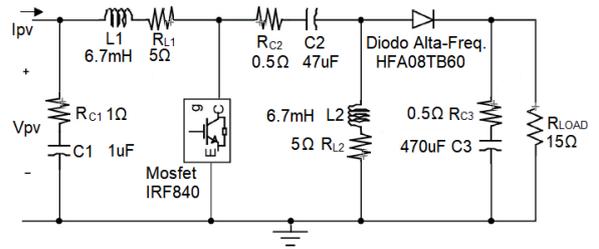


Figura 8: Circuito do Conversor CC-CC SEPIC com a especificação dos valores dos componentes.

O MOSFET deve ser comutado com um sinal PWM (Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation*), que será proporcional ao ciclo de trabalho (*duty cycle*). O ganho estático do conversor SEPIC é obtido pela Equação 5 e seu gráfico pode ser observado na Figura 9.

$$G_{estático} = \frac{D}{1 - D} \quad (5)$$

Pode-se observar no gráfico da Figura 9 duas características: o ganho é unitário no ciclo de trabalho igual a 0,5 e que a curva de ganho estático do conversor SEPIC não é linear. Essas características devem ser levadas em consideração no projeto do MPPT.

5.3 Bloco MPPT Fuzzy

Para determinar o ciclo de trabalho que irá rastrear o ponto de máxima potência foi utilizado o controlador Fuzzy com inferência de Mamdani. O

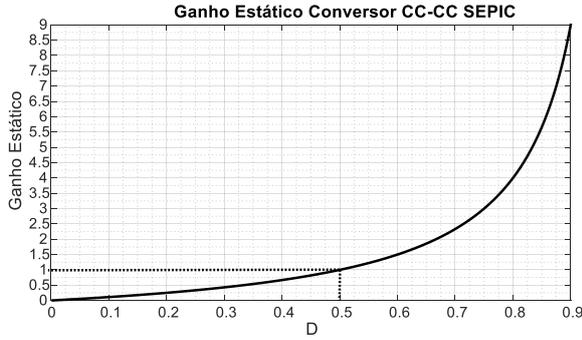


Figura 9: Ganho estático do conversor CC-CC SEPIC em função do ciclo de trabalho (D).

controlador move o ponto de operação do painel fotovoltaico para onde a derivada dP/dI é igual a zero, ou seja, o topo da curva característica. A primeira variável de entrada do Controlador Fuzzy é o erro “E”, definida na Equação 6. A segunda variável de entrada é a variação do erro “dE”, Equação 7.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{I_{pv}(k) - I_{pv}(k-1)} \quad (6)$$

$$dE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (7)$$

As entradas e a saída são associadas com os seguintes termos linguísticos: Negativo Alto (NA), Negativo Baixo (NB), Zero (ZE), Positivo Baixo (PB) e Positivo Alto (PA), assim, formam as Funções de Pertinência de Entrada e de Saída, conforme a Figura 10. Pode-se observar um perfil assimétrico da função de pertinência de Saída (Figura 10c), isso ocorre devido à característica da curva de ganho estático mostrada na Figura 9.

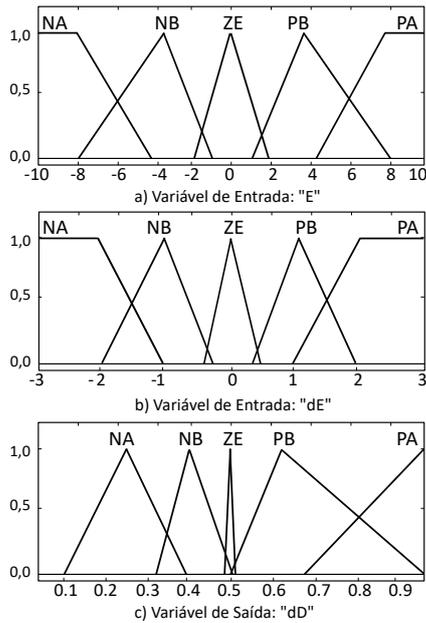


Figura 10: Funções de pertinência do controlador Fuzzy: Entradas a) “E” e b) “dE” e c) saída “dD”.

Para determinar o valor da saída “dD” é utilizado um conjunto de regras *fuzzy* que relaciona as entradas com a saída. As regras *fuzzy* foram obtidas no trabalho de Tavares (2009) e estão descritas na Tabela 2, conforme modelo de relacionamento da Equação 2.

Uma vantagem do Controlador *Fuzzy* é a possibilidade de se escolher ganhos diferentes dentro da banda de controle (Confessor and Villarreal, 2016). A Figura 11 mostra o gráfico 3D das regras que relacionam as duas entradas com o ganho da saída.

Tabela 2: Diagrama das regras *fuzzy* (utilizando os termos linguísticos); Fonte: (Tavares, 2009).

	E	NA	NB	ZE	PB	PA
dE		NA	NB	ZE	PB	PA
NA		NA	NA	NA	ZE	ZE
NB		NB	NB	NB	ZE	ZE
ZE		ZE	NB	ZE	PB	ZE
PB		ZE	ZE	PB	PB	PB
PA		ZE	ZE	PA	PA	PA

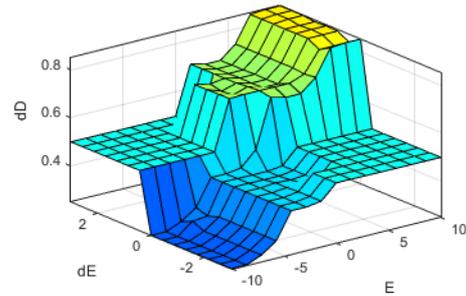


Figura 11: Gráfico 3D das regras *fuzzy* que relacionam as entradas com o ganho de saída do controlador.

O MPPT Fuzzy possui três blocos internos: o bloco que realiza a adequação dos sinais de entrada, o controlador Fuzzy e o gerador de PWM. Todos esses componentes e blocos estão mostrados na Figura 12.

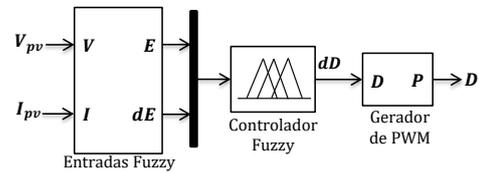


Figura 12: Bloco do diagrama de controle do MPPT Fuzzy.

O sinal PWM está sendo gerado pelo bloco “PWM Generator (DC-DC)” do Simulink e tem uma frequência de comutação de 31,25 kHz. Este valor de frequência foi escolhido para que se possa ser implementado em um controlador, levando em consideração limitações dos registradores de tempo. A frequência foi definida conforme:

$(16 \text{ MHz}) / (2 \times 256)$ onde 16 MHz é o valor do cristal, 2 é o valor de *prescaler* (fator de divisão da frequência) e 256 representa um registrador de 8 bits (ATMEL, 2014). A Figura 13 mostra o funcionamento interno do bloco que transforma as entradas I_{pv} e V_{pv} nas entradas do bloco *fuzzy* “E” e “dE”.

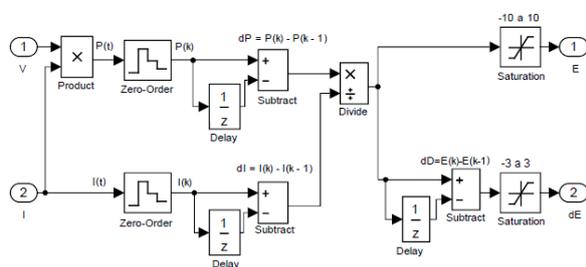


Figura 13: Diagrama de bloco que transforma a tensão e corrente, medidas do painel, nas entradas do controlador *fuzzy*.

6 Resultados e Análise

Para comparar as técnicas MPPT Fuzzy e Beta será utilizado um sistema de teste com o mesmo modelo de painel fotovoltaico e conversor CC-CC (SEPIC). Para gerar um degrau no valor de máxima potência serão realizadas alterações nas entradas do painel solar (irradiação e temperatura). No instante (1), de 0 a 0,4 segundo, o valor de irradiação é de 500 W/m^2 e a temperatura é de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. No instante (2), de 0,4 a 0,7 segundo, é realizado uma variação na irradiação, que passa para o valor de 1000 W/m^2 . No instante (3), de 0,7 a 1 segundo, o valor de temperatura aumenta em rampa começando com o valor de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ em 0,7 segundo terminando com o valor de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ no instante de tempo de 1 segundo.

A Figura 14 mostra o valor de potência máxima esperada para cada combinação de entrada, instantes (1), (2) e o final de (3).

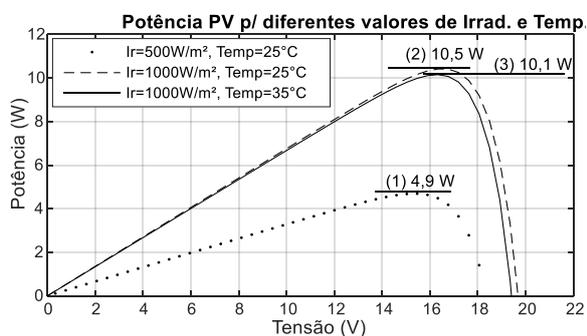


Figura 14: Potência Máxima que deve ser rastreada para cada combinação das variáveis de entrada.

O Diagrama de Simulação dos testes é o mesmo da Figura 7, tanto para o MPPT Fuzzy quanto para o MPPT Beta, modificando apenas o bloco do MPPT.

A Figura 15 mostra o gráfico de potência do painel fotovoltaico, onde está sendo comparada a rastreabilidade entre as técnicas MPPT Beta (clássico) e o MPPT Fuzzy.

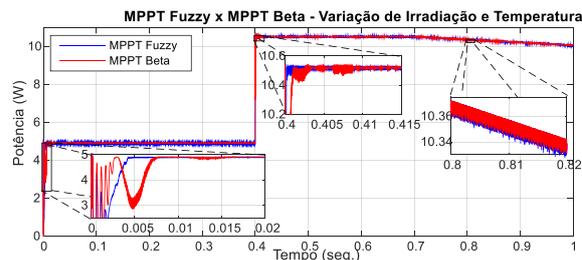


Figura 15: Gráfico de rastreamento da Potência Máxima para os métodos de MPPT Beta e Fuzzy.

Pode-se perceber, pelo gráfico da Figura 15, que o MPPT Fuzzy rastreou o Ponto de Máxima Potência do painel fotovoltaico primeiro que o MPPT Beta, nos instantes (1) e (2). No instante inicial da simulação o MPPT Beta oscilou por um pequeno tempo (15 milissegundos) antes de estabilizar no valor de regime. No instante de 0,7 a 1 segundo, em que a temperatura aumentou em rampa, o comportamento das duas técnicas de MPPT foram semelhantes, ambos não apresentaram erro de regime para variação em rampa. Uma característica que pode ser observada na Figura 15 é que o MPPT Fuzzy apresentou oscilações maiores que o MPPT Beta, principalmente ao longo do instante (1).

As grandezas Irradiação Solar e Temperatura são variáveis físicas que possuem inércia e não variam em degrau. Essa condição de teste é muito utilizada na literatura (Chikh and Chandra, 2015) (Chiu, 2010) para testar o desempenho de técnicas de MPPT, para que não se utilize tempo de simulação de algumas dezenas de minutos.

Outro teste foi realizado quanto ao comportamento das técnicas de MPPT frente à variação de carga. Para isso, o sistema de teste manteve constante os valores de Irradiação Solar (1000 W/m^2) e Temperatura ($25 \text{ }^\circ\text{C}$). No instante de 0,5 segundo a carga foi reduzida de 15Ω para metade do valor ($7,5 \Omega$), simulando a entrada de uma carga de igual valor em paralelo com a existente.

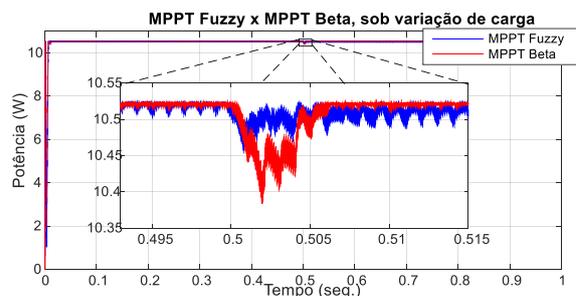


Figura 16: Gráfico de rastreamento do PMP dos MPPT Fuzzy e Beta frente à variação de carga.

A Figura 16 mostra a potência do sistema controlado pelos MPPT's Fuzzy e Beta frente à perturbação de carga. Essa figura mostra que no momento em que houve a variação de carga o MPPT Fuzzy rejeitou a perturbação primeiro que o MPPT Beta, porém apresentou oscilações abaixo do ponto de máxima potência, sendo este um ponto negativo apresentado pelo MPPT Fuzzy.

Outra análise importante se trata do sinal de controle que é gerado pela saída de cada MPPT. A Figura 17 mostra o sinal de controle gerado no primeiro sistema de teste, em que foram aplicadas variações de Irradiação Solar e Temperatura.

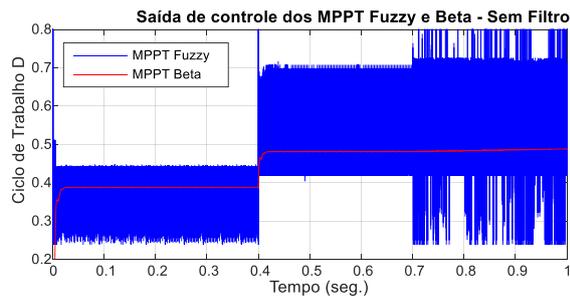


Figura 17: Sinal de Controle gerado na saída dos MPPT's Fuzzy e Beta para variação de Irradiação Solar e Temperatura.

Pode-se perceber, na Figura 17, que o sinal de controle do MPPT Fuzzy oscila significativamente ao rastrear o PMP para os três instantes de simulação, principalmente entre 0,7 e 1 segundo. Na implementação prática do MPPT essa oscilação pode gerar problemas ao comutar o *gate* do MOSFET. Para corrigir esse problema (mantendo a função de rastrear o PMP) foi adicionado um filtro digital de primeira ordem na saída do controlador Fuzzy. Esse filtro faz um amortecimento frente às variações do sinal de controle. A constante de tempo do filtro é de nove milissegundos, valor ajustado para se ter relação satisfatória entre velocidade de rastreamento e redução das oscilações. A Figura 18 mostra como ficou o sinal de controle do MPPT Fuzzy aplicando o filtro.

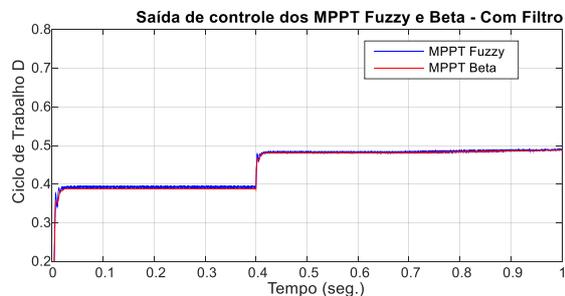


Figura 18: Sinal de controle do MPPT Fuzzy (com filtro de primeira ordem) e MPPT Beta.

Pode-se observar na Figura 18 que as oscilações no sinal de controle da saída do MPPT Fuzzy reduziram. A Figura 19 mostra o efeito da adição

do filtro no comportamento do rastreamento do ponto de máxima potência.

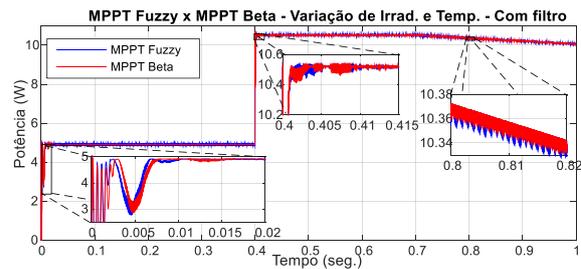


Figura 19: Comparação entre o MPPT Fuzzy (com filtro de primeira ordem) e Beta para variações de Irradiação Solar e Temperatura.

Ao inserir o filtro na saída do MPPT Fuzzy a sua curva de potência demorou mais para estabilizar em regime permanente, passando de 4 milissegundos (sem o filtro) para 10 milissegundos (com o filtro). Mesmo com essa alteração o MPPT Fuzzy conseguiu rastrear a saída em um tempo menor (33% menor) que o MPPT Beta, conforme a Figura 19. Mesmo com a utilização do filtro o sinal de potência do sistema controlado pelo MPPT Fuzzy apresentou maior oscilação em regime permanente, se comparado ao sistema controlado pelo MPPT Beta.

7 Conclusões

O presente trabalho realizou a comparação entre dois métodos, o MPPT Beta (clássico) e MPPT Fuzzy. Os resultados mostraram que para variações instantâneas de Irradiação Solar o MPPT Fuzzy apresentou tempo de rastreamento maior que o MPPT Beta. Por sua vez, o MPPT Beta não apresentou oscilações de máxima potência em regime permanente (quando não há variação de Irradiação Solar). As duas Técnicas de MPPT apresentaram mesmo desempenho sob variação em rampa de Temperatura.

O teste de variação de carga mostrou que ambas as técnicas conseguiram rejeitar a perturbação, sendo que o MPPT Fuzzy rastreou o PMP primeiro mas apresentou oscilações em regime permanente após a perturbação.

Verificando o sinal de controle gerado pela saída dos reguladores MPPT observou-se que o sinal de controle do MPPT Fuzzy apresentou grande oscilação, o que poderia causar problemas em uma implementação prática. Para solucionar esse problema foi utilizado, neste trabalho, um filtro de primeira ordem na saída do MPPT Fuzzy. Os resultados mostraram que o filtro atenuou as oscilações do sinal de controle e fez com que o tempo de rastreamento do MPPT Fuzzy aumentasse. Mesmo com esse aumento de tempo o MPPT Fuzzy apresentou tempo de rastreamento menor que o MPPT Beta. Como desvantagem o

MPPT Fuzzy apresentou oscilações no sinal de potência, mesmo depois que as oscilações do sinal de controle foram atenuadas.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES, ao Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais (CEFET-MG), à Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) e ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do CEFET-MG (PPGEL) por disponibilizar a estrutura adequada ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ANEEL (2008). *Atlas de energia elétrica do Brasil*, 3 edn, Agência Nacional de Energia Elétrica, Parte II: Energias Renováveis, Cap. 5 Outras Fontes.
- ATMEL (2014). *Datasheet 8-bits Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash*.
- Brito, M. A. G., Galotto, L., Sampaio, L. P., d. A. e Melo, G. and Canesin, C. A. (2013). Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **60**(3): 1156–1167.
- Britto, J. R. (2009). *Análise, projeto e implementação de conversores CC-CC com ampla faixa de conversão aplicados em iluminação de estado sólido*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.
- CEPEL, CRESESB, Pinho, J. and Galdino, M. (2014). *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, CEPE, DTE, CRESESB e GTES.
- Chikh, A. and Chandra, A. (2015). An optimal maximum power point tracking algorithm for pv systems with climatic parameters estimation, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **6**(2): 644–652.
- Chiu, C. S. (2010). T-S fuzzy maximum power point tracking control of solar power generation systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(4): 1123–1132.
- Coelho, R. F., Concer, F. and Martins, D. C. (2009). A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking, *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 673–678.
- Confessor, S. L. M. and Villarreal, E. R. L. (2016). *Análise comparativa de controladores MPPT em um sistema fotovoltaico: Comparação entre o método tradicional Perturbação e Observação (P&O) e o método através da Lógica Fuzzy*, Novas Edições Acadêmicas.
- Khateb, A. E., Rahim, N. A., Selvaraj, J. and Uddin, M. N. (2014). Fuzzy-logic-controller-based SEPIC converter for maximum power point tracking, *IEEE Transactions on Industry Applications* **50**(4): 2349–2358.
- Li, X. and Wen, H. (2016). Evaluation of different maximum power point tracking techniques by using en 50530 dynamic test standard, *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1–6.
- Li, X., Wen, H., Jiang, L., Xiao, W., Du, Y. and Zhao, C. (2016). An improved MPPT method for PV system with fast-converging speed and zero oscillation, *IEEE Transactions on Industry Applications* **52**(6): 5051–5064.
- Miranda, G. J. (2003). Be prepared! [power industry deregulation], *IEEE Industry Applications Magazine* **9**(2): 12–20.
- Moçambique, N. E. M., Machado, R. Q. and Oliveira, V. A. (2011). A fuzzy PD-PI control strategy to track the voltage references of photovoltaic arrays, *9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, pp. 1162–1167.
- Silva, F. F. B. (2011). *Desvendando a lógica fuzzy*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.
- Solar Innova, G. T. (2018). *Manual do Painel Fotovoltaico Policristalino SI-ESF-M-NE-P-10W*.
- Stevenson, R. (2008). First solar: quest for the \$1 watt, *IEEE Spectrum* **45**(8): 26–31.
- Tavares, C. A. P. (2009). *Estudo comparativo de controladores fuzzy aplicados a um sistema solar fotovoltaico*, Dissertação de mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.