

# Rastreador do Ponto de Máxima Potência Baseado em Controle Preditivo para o Conversor SEPIC em Sistemas Fotovoltaicos.

Angelo G. dos Santos\* Viviane O. das Mercês\*\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: angelo.gabriel@ufba.br).

\*\* Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade Federal da Bahia, BA, (e-mail: viviane.merces@ufba.br).

**Abstract:** Recently, there have been several studies involving MPPT techniques based on Predictive Control and obtaining promising performances in their applications. Based on this research area, this work aims to develop one of these techniques in the SEPIC converter for a photovoltaic system. The performance of the MPPT technique based on Predictive Control is linked to the type of the converter and panel system, in addition to being related to the precise determination of the converter parameters. Therefore, this article also aims to perform an analysis of the sensitivity of the technique by varying the parameters of the converter under different working conditions of the photovoltaic panel. The entire study is carried out using computer simulation.

**Resumo:** Recentemente, vem surgindo diversos trabalhos envolvendo técnicas de MPPT baseados em Controle Preditivo e obtendo-se desempenhos promissores em suas aplicações. Tendo como base essa área de pesquisa, esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma dessas técnicas no conversor SEPIC para um sistema fotovoltaico. O desempenho da técnica de MPPT baseado em Controle Preditivo é vinculado ao tipo do sistema conversor e painel, além de ter relação com a determinação precisa dos parâmetros do conversor. Portanto, esse artigo também tem como objetivo realizar uma análise da sensibilidade da técnica mediante à variações dos parâmetros do conversor sob diferentes condições de trabalho do painel fotovoltaico. Todo o estudo é realizado mediante à simulação computacional.

**Keywords:** MPPT; SEPIC Converter; MPC-MPPT and Photovoltaic Systems.

**Palavras-chaves:** MPPT; Conversor SEPIC; MPC-MPPT e Sistemas Fotovoltaicos

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de eletricidade no Brasil está crescendo com o passar dos anos. No ano de 2013, a demanda de energia elétrica alcançou 516 TWh e tem uma previsão de um consumo em torno de 790 TWh a ser alcançada até 2024, tendo uma taxa de crescimento médio equivalente a 3,8% ao ano, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética em BRASIL (2019). Apesar de ter uma contribuição pequena no cenário da energia elétrica gerada no Brasil, a potência fotovoltaica instalada no país cresceu de 935 MW em 2017 até 1798 MW no ano de 2018 também conforme EPE-2019 (BRASIL (2019)), representando assim 0,54% da oferta interna de energia elétrica do país. A figura 1 representa o percentual da energia fotovoltaica em relação a outras categorias de energia utilizadas no Brasil.

Em âmbito global, o cenário é semelhante ao brasileiro, tendo crescimentos da demanda de energia elétrica ano a ano. As fontes de energia renováveis, tais como baseado em sistemas fotovoltaicos tem crescido e substituindo outras

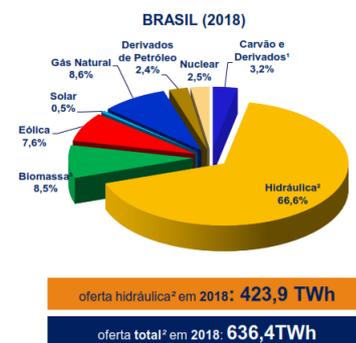


Figura 1. Oferta interna de energia elétrica por fonte no território brasileiro. Fonte: EPE-BRASIL (2019)

energias. A utilização dos sistemas fotovoltaicos tem em sua baixa eficiência, que varia em torno de 10% a 20%, uma das suas principais desvantagens Acciari et al. (2011).

A eficiência de conversão da irradiação em energia elétrica do sistema fotovoltaico está relacionado a alguns fatores, tais como a temperatura da célula e o valor da carga que o sistema alimenta. Visando extrair a maior potência possível do painel, diferentes rastreadores de máxima potência são encontrados na literatura. Os algoritmos com essa funcionalidade são comumente chamados de MPPT, em inglês “*Maximum Power Point Tracking*” ou em português, “rastreador do ponto de máxima potência”.

Dentre as suas principais técnicas mais comuns, destacam-se as técnicas de Perturbar e Observar (PO) e Condutância Incremental (INC). Apesar de serem métodos amplamente aceitos na literatura devido a sua simplicidade e facilidade de implementação, o mesmo apresenta algumas limitações tais como uma resposta lenta sob condições atmosféricas variadas e oscilações em torno do ponto de máxima potência, gerando assim queda da eficiência do sistema conforme ESRAM and CHAPMAN (2007) e HOUSSAMO et al. (2013). Outras técnicas de MPPT são encontradas na literatura, dentre elas, vem ganhando destaque a MPC-MPPT que consiste em uma técnica de MPPT baseada na previsão dos estados do conversor com Controle Preditivo por Modelo (MPC, do inglês “*Model Predictive Control*”). Nesse trabalho é utilizado a técnica de MPC-MPPT em um conversor SEPIC, além de analisar seu desempenho em função de erros no capacitor de entrada do modelo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Nos últimos anos, com o crescimento da capacidade e velocidade de processamento computacional, novas técnicas de processamento, como programação paralela, expansão de memória física, menores custos computacionais ao implementar fisicamente em dispositivos, surgiram. Com base nisso, novas estratégias de MPPT vêm surgindo, tais como redes neurais, reportado em LEYVA et al. (1997), SUN et al. (2017) e controle *Fuzzy* conforme visto em HANNAN et al. (2019) e TANG et al. (2017). Dentre essas estratégias, surge a técnica de MPPT baseado em MPC.

O MPC-MPPT, ou MPPT baseado em MPC utiliza-se da previsão do sistema, tal como nas estratégias de controle preditivo. A previsão é realizada através de um modelo matemático para diferentes entradas de controle possíveis gerando diferentes saídas, da qual, é selecionada uma que melhor atende o critério estabelecido.

A técnica de MPC MPPT, vem sendo utilizada na literatura em trabalhos recentes tal como em METRY et al. (2016) que propõe a utilização em um inversor multinível e compara seus resultados com um PO tradicional, ou em LASHAB et al. (2017) que realiza uma revisão de técnicas de MPPT baseado em MPC, além de analisar os desempenhos dessas técnicas para situações com erro no valor dos parâmetros.

Em SAMANI and MIRZAEI (2019) é possível observar a aplicação da em um conversor Cúk com apenas 2 sensores, no qual é proposto utilizar uma adaptação através da lógica *fuzzy* colocada na saída do sistema. Neste trabalho se compara a técnica proposta com a tradicional e observa uma menor oscilação em torno do ponto de máxima potência.

O trabalho de LASHAB et al. (2017) propõe também uma classificação das estratégias de MPC MPPT vistas na literatura conforme Figura 2, em que analisa algumas delas e as compara. Outros trabalhos baseados em MPC-MPPT não citados aqui são encontrados na literatura, utilizando-se das diferentes técnicas em diferentes aplicações. A aplicação dessas técnicas em algumas categorias de conversores ainda requerem estudos, conforme citado em LASHAB et al. (2017), principalmente na avaliação do desempenho do sistema, quando ocorre erro nos valores utilizados pelo modelo de previsão como sendo parâmetros do conversor.

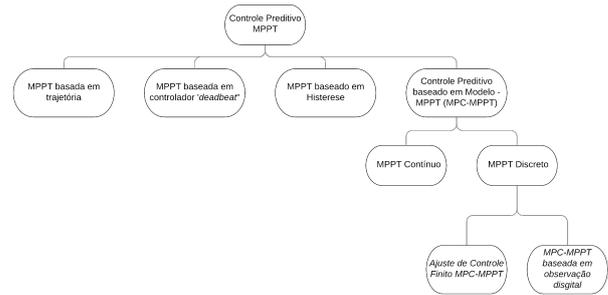


Figura 2. Classificação das técnicas de MPPT baseado em controle preditivo. Fonte: LASHAB et al. (2017)

Esse trabalho utiliza a técnica de MPC-MPPT, tal como visto em METRY et al. (2016) em um conversor DC-DC SEPIC. Para a realização da comparação da eficácia da técnica, é utilizado a técnica de PO mediante as mesmas condições de simulação computacional analisando a velocidade e oscilação em torno do ponto de máxima potência encontrado.

Já se nota em LASHAB et al. (2017), que existem poucos trabalhos que realizam uma análise do desempenho da técnica mediante a erros nos parâmetros do conversor utilizados no modelo de previsão. O próprio LASHAB et al. (2017) utiliza os conversores *Boost*, *Flyback* e *Z-source Inverter* para realizar as análises de sensibilidade dos parâmetros. Entretanto, estudos em outros conversores e aplicações, utilizando-se dessa técnica, ainda são necessárias.

Diferentemente da técnica abordada em MORALES-CAPORAL et al. (2015) (2015), onde o algoritmo utilizado é o de condutância incremental, a técnica deste artigo apresenta uma análise de rendimento do MPC MPPT, mediante a diferentes erros do valor do capacitor de entrada, que liga o conversor ao painel fotovoltaico, e sob as condições de rastreamento do ponto de máxima potência.

O trabalho proposto em LOPES FILHO (2019) aborda uma análise de diferentes técnicas de MPPT, além de propor a utilização da técnica de MPC-MPPT com a corrente de referência gerada através da técnica de condutância incremental. LOPES FILHO (2019) utiliza um Conversor CC-CC *Flyback* e um ganho adaptativo na condutância incremental.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implementação da técnica, é utilizado um sistema tal como mostrado na Figura 3. O painel fotovoltaico tem

suas características descritas na Tabela 1 e sua curva PV mostrada na Figura 4.

Figura 3. Sistema proposto no trabalho

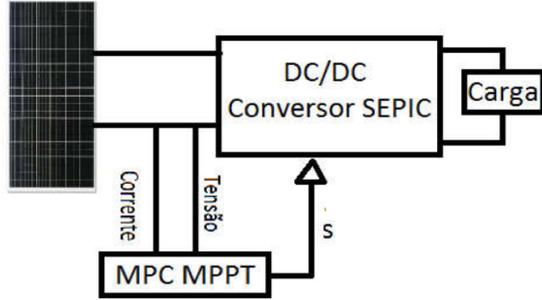


Tabela 1. Especificações do painel fotovoltaico utilizado

Parâmetro	Valor
Potência máxima(W)	253.68
Tensão no ponto de máxima potência (V)	30.2
Corrente no ponto de máxima potência (A)	8,4
Tensão de circuito aberto (V)	37.4
Corrente de curto-circuito (A)	9
Celulas por modulo	60
Coefficiente de temperatura da tensão(%/deg.C)	0.36299
Coefficiente de temperatura da corrente(%/deg.C)	0.049

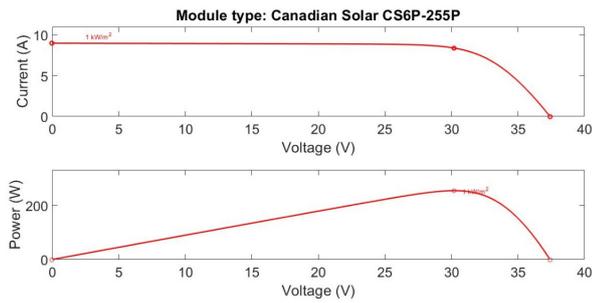


Figura 4. Curva IxV e Pxi do painel fotovoltaico utilizado.

### 3.1 Conversor SEPIC

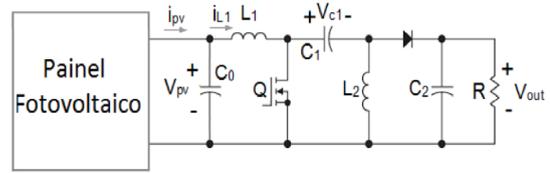
Entre os conversores, a topologia SEPIC se destaca porque além de oferecer uma saída elevadora e abaixadora, oferece uma não invertida, reduz a ondulação da corrente de saída e também reduz o estresse de comutação. Para um ciclo de trabalho superior a 50%, o SEPIC atua como um elevador *Boost* e para um ciclo de trabalho inferior a 50%, funcionará como um abaixador *Buck*. Para um valor de razão cíclica sendo 50%, o SEPIC gera uma saída igual a sua entrada C and M (2015). O conversor SEPIC é formado de 2 capacitores e 2 indutores, além da chave de comutação e 1 diodo. Entre o conversor e o painel fotovoltaico foi colocado o capacitor. O diagrama do circuito do conversor SEPIC é apresentado na Figura 5.

A tensão de saída do conversor é dada por:

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (1)$$

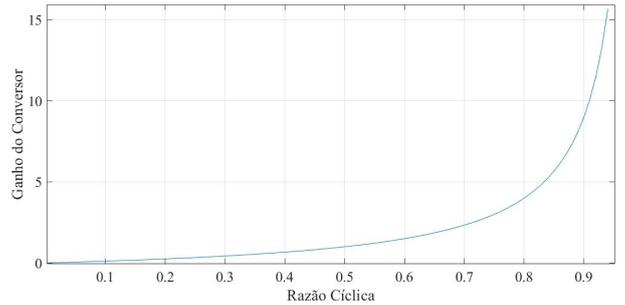
Onde  $V_{out}$  é a tensão de saída,  $D$  é a razão cíclica de trabalho do conversor,  $V_{in}$  é a tensão de entrada ( $V_{pv}$ ) do

Figura 5. Sistema proposto no trabalho



painel fotovoltaico. O ganho do conversor em função da razão cíclica é mostrado na Figura 6.

Figura 6. Sistema proposto no trabalho



Os parâmetros do conversor SEPIC são encontrados na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações do conversor SEPIC

Parâmetro	Valor
$L_1(H)$	$5e^{-3}$
$L_2(H)$	$10e^{-3}$
$C_0(F)$	$1e^{-3}$
$C_1(F)$	$34e^{-6}$
$C_2(F)$	$1.7e^{-3}$
$R(ohm)$	2

### 3.2 Algoritmo de MPPT PO (Perturbar e Observar)

O algoritmo de Perturbar e Observar, conhecido como PO se tornou um dos principais algoritmos de MPPT utilizados em aplicações. Devido a sua simplicidade, facilidade de implementação e baixo custo computacional se tornou cada vez mais comum. Seu funcionamento consiste em medir a tensão e corrente de entrada do conversor, calcular a potência atual e comparar com a potência no instante anterior. Conforme visto na Figura 7, existem 4 diferentes ações a serem tomadas conforme a variação da tensão e da variação de potência. Gerando uma perturbação no sentido de aumentar a potência do sistema.

A técnica de PO tem como principal desvantagem o fato de que mesmo alcançando o ponto de máxima potência, o algoritmo irá perturbar o sistema, gerando uma oscilação indesejada. Outra desvantagem da técnica é a sua baixa velocidade para rápidas perturbações no sistema. Outras técnicas de MPPT são encontradas na literatura, entre elas destaca-se a técnica de MPC-MPPT utilizada nesse trabalho.

### 3.3 MPC-MPPT no Conversor SEPIC

A técnica de MPC-MPPT consiste em uma melhoria da técnica de PO. Conforme descrito no fluxograma de funci-

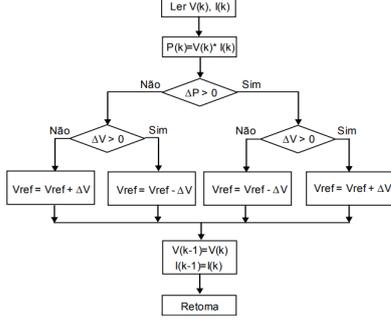


Figura 7. Fluxograma da Técnica de Perturbação e Observação PO

onamento da Figura 8, utiliza-se um algoritmo de MPPT convencional que é responsável por gerar uma corrente de referência  $I_{ref}$ , sendo que nesse trabalho foi utilizado a técnica PO. Para melhorar o PO, é realizado uma predição da próxima amostragem gerando assim  $i_L(k+1)$  tanto para o caso em que a próxima amostragem seja chave aberta, como para o caso em que a próxima amostragem seja chave fechada. Com estas predições, o algoritmo compara a corrente de referência ( $I_{ref}$ ) com as correntes preditas e determina qual delas gera um menor valor, fazendo com que a saída do sistema se aproxime da referência. Para realizar as predições do sistema com a chave aberta e fechada é necessário a modelagem do sistema. Conforme o conversor mostrado na Figura 5, tem-se as seguintes equações:

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) - V_{c1}(t) \quad (2)$$

$$i_c(t) = C_0 \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (3)$$

Utilizando-se a derivada discreta de Euler na (2) e na (3), ambas resultam em respectivamente:

$$\frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T} = \frac{1}{L} (V_{pv}(k) - V_{c1}(k)) \quad (4)$$

$$\frac{V_{pv}(k+1) - V_{pv}(k)}{T} = \frac{1}{C_0} (i_{pv}(k) - i_L(k)) \quad (5)$$

Para a chave na posição fechada, a (4) resulta em:

$$\frac{i_L(k+1) - i_L(k)}{T} = \frac{1}{L} V_{pv}(k) \quad (6)$$

Rearrmando a (6), fica:

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T}{L} V_{pv}(k) \quad (7)$$

Para a chave na posição aberta, a (4) resulta em:

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T}{L} (V_{pv}(k) - V_{c1}(k)) \quad (8)$$

Utilizando-se da (7) e (8) para prever a corrente  $i_L$  iriam ser necessários a utilização de 4 sensores. Entretanto,

utilizando-se as equações do conversor SEPIC, é possível diminuir a quantidade mínima de sensores. Utilizando-se a Equação (5), pode-se dizer que:

$$i_L(k) = i_{pv}(k) - C_0 \frac{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)}{T} \quad (9)$$

Para a chave na posição fechada, a corrente no indutor no próximo instante de amostragem é dado substituindo a (9) na (7), resultando em:

$$i_L(k+1) = \left[-\frac{C_0}{T} + \frac{T}{L}\right] V_{pv}(k) + \frac{C_0}{T} V_{pv}(k-1) + i_{pv}(k) \quad (10)$$

Para a chave aberta, é possível utilizar a equação do capacitor:

$$V_{c1}(t) = V_{pv}(t) - V_L(t) \quad (11)$$

Substituindo por  $V_L(t)$  na  $L \frac{di_L(t)}{dt}$  e utilizando o sistema em discreto, tem-se:

$$V_{c1}(k) = V_{pv}(k) - L \frac{i_L(k) - i_L(k-1)}{T} \quad (12)$$

Substituindo a (9) na (12) para amostragens e , vem:

$$V_{c1}(k) = \left(\frac{LC_0}{T^2} + 1\right) V_{pv}(k) - 2\frac{LC_0}{T^2} V_{pv}(k-1) + \frac{LC_0}{T^2} V_{pv}(k-2) - \frac{L}{T} i_{pv}(k) + \frac{L}{T} i_{pv}(k-1) \quad (13)$$

Quando a chave se encontra na posição aberta, a corrente pode ser definida ao substituir a (9) e (13) na (8), resultando em:

$$i_L(k+1) = -2\frac{C_0}{T} V_{pv}(k) + 3\frac{C_0}{T} V_{pv}(k-1) - \frac{C_0}{T} V_{pv}(k-2) + 2i_{pv}(k) - i_{pv}(k-1) \quad (14)$$

Com isso, é possível realizar predições de  $i_L(k+1)$  para a chave aberta e para a chave fechada , conforme o fluxograma visto na Figura 8.

### 3.4 Métricas de avaliação de MPPT

Para avaliar o MPPT utilizado, diversas análises podem ser feitas. Nesse trabalho, foi utilizado 2 métricas tal como visto em G. Filho et al. (2020). A métrica da raiz do erro quadrático médio (REQM) a seguir:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (P_{painel} - P_{ideal})^2} \quad (15)$$

Onde,  $m$  representa o número de amostras,  $P_{painel}$  representa os valores de potência gerados e  $P_{ideal}$  é o valor de potência máximo obtido com base na curva PV do painel.

Outra métrica utilizada foi a eficiência, dada pela razão entre a energia produzida e a máxima energia que

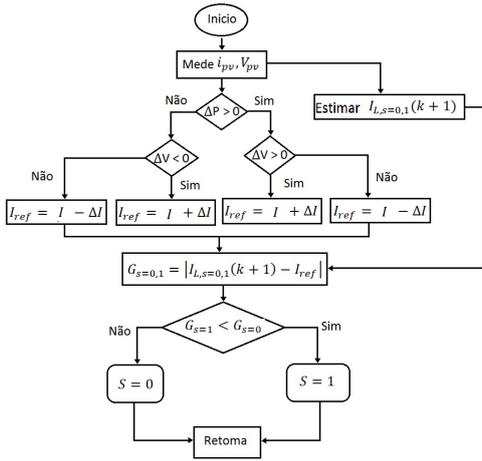


Figura 8. Fluxograma de funcionamento do MPC MPPT

podria produzir se estivesse na máxima potência ideal. A formulação da métrica é dada por:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{painel}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{ideal}(t) dt} \quad (16)$$

#### 4. RESULTADOS

O modelo do sistema fotovoltaico foi simulado utilizando-se uma entrada de irradiação que assume valores entre  $300W/m^2$  e  $1000W/m^2$ , além de temperaturas da célula variando entre  $25^\circ C$  e  $75^\circ C$ . É utilizado uma carga de 3 ohms na saída do conversor SEPIC responsável por dissipar toda a energia gerada pelo painel. Para as simulações foram utilizados os parâmetros do painel fotovoltaico contidos na Tabela 1, além dos parâmetros do conversor da Tabela 2. Foi considerado uma frequência de comutação de  $10^5$  Hz, devido às características do elemento chaveado utilizado no modelo. Para avaliar a técnica de MPC-MPPT demonstrada pelo fluxograma da figura 8 foi feito uma simulação comparando com a técnica descrita no fluxograma de MPPT PO da Figura 7 e o resultado desta simulação comparativa é mostrado na Figura 9. A comparação do desempenho de ambas as técnicas se dará entre o instante de partida com todas as condições iniciais zeradas até o momento em que alcançam o valor da máxima potência.

Por meio da Figura 9 é possível notar o melhor desempenho dinâmico da técnica MPC MPPT, pois, alcançou seu valor estacionário de 253 W em 0,008 segundos, enquanto a técnica de PO alcançou o valor de 253 W no instante 0.068 segundos, o que equivale a uma velocidade 8 vezes maior, confirmando assim o que se observa na literatura da técnica de MPC- MPPT gerar um desempenho mais rápido.

Em seguida, é analisado o sistema partindo da máxima potência possível e tendo perturbações do tipo degrau em variáveis de entrada do sistema, irradiação e temperatura conforme visto na Figura 10:

- No instante 0,1 segundos, foi feita uma perturbação na irradiação, alterando de  $1000W/m^2$  para

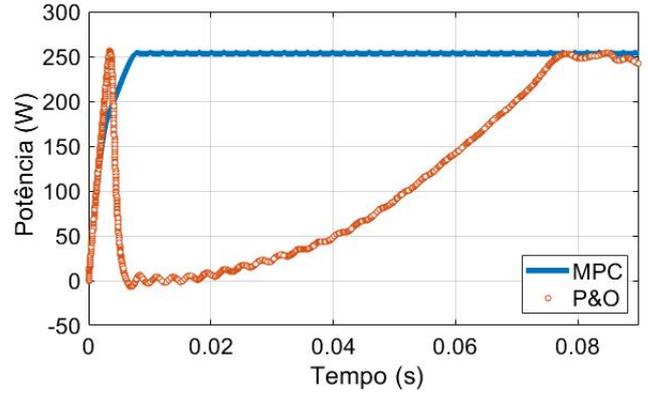


Figura 9. Comparação entre o MPC-MPPT e PO.

$900W/m^2$ . No instante 0,15 segundos é alterada a irradiação para  $1000W/m^2$ .

- As perturbações nos instantes 0,2 e 0,25 segundos são gerados pela variação da temperatura do sistema, o qual iniciou com  $25^\circ C$  e alcançou  $35^\circ C$  no instante 0,2 segundos e de  $35^\circ C$  para  $25^\circ C$  no instante 0,25 segundos.
- A primeira perturbação(0,2s) foi responsável pela diminuição da potência gerada e um novo ponto de máxima potência foi rastreado em torno de 229W, assim como na Figura 10, é possível observar que o sistema com a técnica PO tem um desempenho inferior ao sistema com MPC-MPPT.
- O MPC-MPPT apresenta uma maior velocidade para estabilizar, apresenta menor ruído em torno do ponto da máxima potência e menores picos de tensão como o que ocorreu nos instantes 0,1 e 0,2 segundos.

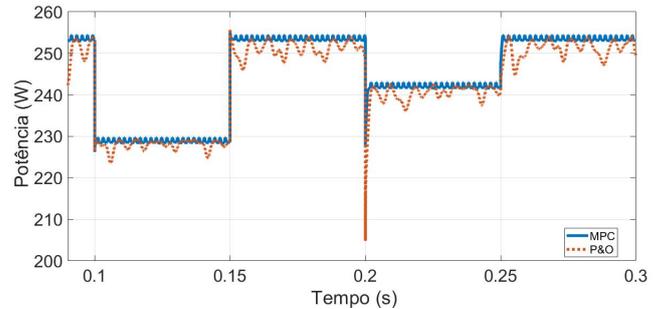


Figura 10. Comparação entre a técnica MPC-MPPT e PO para perturbações no sistema.

Segundo as simulações mostradas pela Figura 9 e Figura 10, o desempenho da técnica de MPC-MPPT é superior ao da técnica de PO tradicional para perturbações no sistema. Entretanto, o modelo utiliza nas suas previsões valores dos parâmetros do sistema e conseqüentemente, a qualidade da técnica está diretamente relacionada com o quão próximo do real são esses valores. Visando avaliar o desempenho da técnica para casos de incerteza (*mismatch*), foram feitas simulações variando o valor do capacitor do modelo de previsões, com erro equivalente entre 1% a 50% do valor real utilizado no conversor e analisado as métricas de REQM e eficiência. Como verificada na Figura 11, a eficiência do sistema diminui quando o erro entre o

valor real e o valor do modelo aumenta, demonstrando a alta sensibilidade da técnica a esse parâmetro.

Mesmo diante de um cenário com grande erro, a eficiência decai, porém, se mantém rastreando a máxima potência do sistema alcançando bons resultados para valores de até 50% de erro.

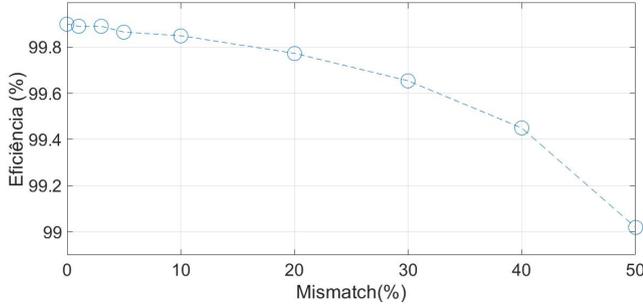


Figura 11. Eficiência para *mismatch* no valor do capacitor  $C_0$  com irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$

É realizado uma análise do REQM para as mesmas variações de irradiação, sendo possível ver através da Figura 12. O sistema responde de maneira inversa a eficiência, no qual, conforme o erro cresce, o REQM também cresce, indicando uma diminuição da potência gerada pelo sistema.

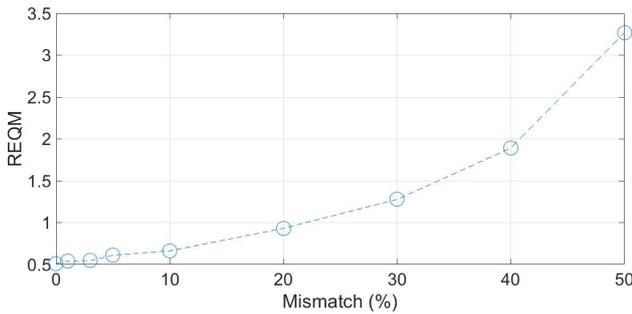


Figura 12. REQM para *mismatch* no valor do capacitor  $C_0$  com irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$

Foram feitas análises para uma irradiação de  $300 \text{ W/m}^2$  avaliando o REQM visto na Figura 14 a eficiência Figura 13. Observa-se um comportamento semelhante ao caso com irradiação  $1000 \text{ W/m}^2$  com bom desempenho de eficiência e REQM.

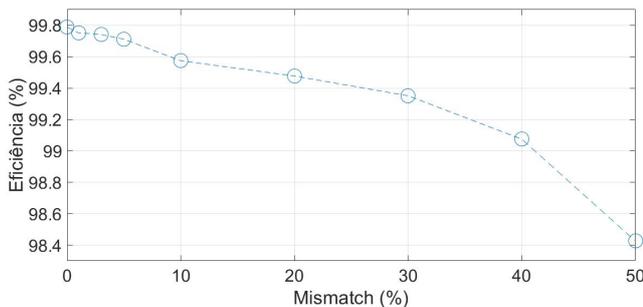


Figura 13. Eficiência para *mismatch* no valor do capacitor  $C_0$  com irradiação de  $300 \text{ W/m}^2$

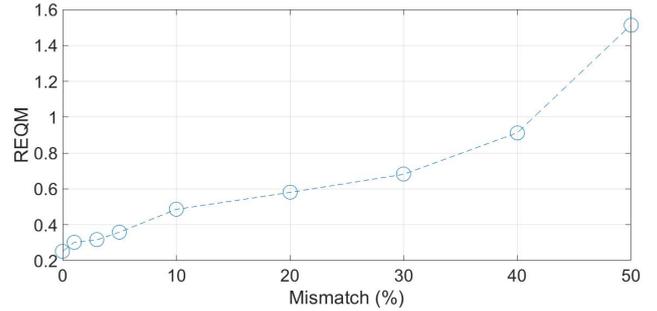


Figura 14. REQM para *mismatch* no valor do capacitor  $C_0$  com irradiação de  $300 \text{ W/m}^2$

## 5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi proposto a utilização da técnica de MPC-MPPT em um conversor SEPIC utilizando-se 2 sensores. O algoritmo recebe como entrada a tensão e corrente do painel. O algoritmo de MPC-MPPT foi capaz de alcançar o ponto de máxima potência e rastrearlo mediante às rápidas variações de irradiação e temperatura. Também mostrou, conforme resultados da simulação computacional, uma baixa ondulação (*ripple*) quando no ponto de máxima potência. A técnica obteve uma alta velocidade para alcançar a máxima potência em comparação com outros métodos tais como PO, o que torna essa técnica extremamente eficiente em relação a outras técnicas.

Apesar das vantagens da técnica, existem algumas preocupações, a primeira delas reside na necessidade de um processador capaz de realizar todo o processamento na mesma velocidade de chaveamento do próprio conversor. A técnica utilizada não permite a sua implementação utilizando outras frequências de controle, tal como visto em outras técnicas, como PO, que permite o uso com o tempo de amostragem independente do sistema. Conforme citado, essa desvantagem cada vez mais, é irrelevante devido a capacidade cada vez maior de novos processadores.

Outra grande desvantagem reside na necessidade de se ter um modelo, próprio ou mais próximo do real do sistema de conversão, haja vista que conforme as análises feitas, para o conversor SEPIC estudado, a eficiência diminui conforme a incerteza dos parâmetros do modelo.

Contudo, mesmo com essas desvantagens, as vantagens observadas fazem com que a utilização dessa técnica de grande utilidade em sistemas de MPPT. Outras comparações poderão ser feitas também, justificadas pelo advento de novas técnicas de controle e o avanço na capacidade computacional e robustez de sistemas de potência, em estudos para geração distribuída ou não.

## REFERÊNCIAS

- Acciari, G., Graci, D., and La Scala, A. (2011). Higher pv module efficiency by a novel cbs bypass. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(5), 1333–1336.
- BRASIL (2019). *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2019 – Ano base 2018*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) - Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro - RJ.

- C, D.D. and M, S. (2015). Analysis of bidirectional SEPIC/Zeta converter with coupled inductor. In *2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*, 103 – 108.
- Esrām, T. and Chapman, P.L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(2), 439–449.
- G. Filho, Franco, R., and Vieira, F.H. (2020). Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos considerando Minimização de Erro e Derivada da Potência. 21, 157 – 170.
- Hannan, M.A., Ghani, Z.A., Hoque, M.M., Ker, P.J., Hussain, A., and Mohamed, A. (2019). Fuzzy logic inverter controller in photovoltaic applications: Issues and recommendations. *IEEE Access*, 7, 24934–24955.
- Houssamo, I., Locment, F., and Sechilariu, M. (2013). Experimental analysis of impact of mppt methods on energy efficiency for photovoltaic power systems. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 46, 98 – 107.
- Lashab, A., Sera, D., Guerrero, J.M., Máthé, L., and Bouzid, A. (2017). Discrete model-predictive-control-based maximum power point tracking for pv systems: Overview and evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(8), 7273–7287.
- Leyva, R., Martínez-Salamero, L., Jammes, B., Marpinard, J.C., and Guinjoan, F. (1997). Identification and control of power converters by means of neural networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 44(8), 735–742.
- Lopes Filho, G. (2019). *Seguimento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos Utilizando Controle Preditivo por Modelo e Algoritmos Heurísticos para Estimacão de Parâmetros*. Mestrado em engenharia elétrica e da computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- Metry, M., Bayhan, S., Balog, R.S., and Rub, H.A. (2016). Model predictive control for PV maximum power point tracking of single-phase submultilevel inverter. In *2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, 1 – 8.
- Morales-Caporal, M., Rangel-Magdaleno, J., Ramirez-Cortes, J., Tlelo-Cuautle, E., and Morales-Caporal, R. (2015). Control algorithm using Trajectory-Based MPC for MPPT application.
- Samani, L. and Mirzaei, R. (2019). Model Predictive Control Method to Achieve Maximum Power Point Tracking Without Additional Sensors in Stand-Alone Renewable Energy Systems. *Optik*, 185.
- Sun, Y., Li, S., Lin, B., Fu, X., Ramezani, M., and Jaithwa, I. (2017). Artificial neural network for control and grid integration of residential solar photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4), 1484–1495.
- Tang, S., Sun, Y., Chen, Y., Zhao, Y., Yang, Y., and Szeto, W. (2017). An enhanced mppt method combining fractional-order and fuzzy logic control. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(2), 640–650.