

ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT

Miréli Binder Vendruscolo
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil
mibvendruscolo@hotmail.com

Antônio Manuel Santos Spencer Andrade
Universidade Federal de Santa Maria
Cachoeira do Sul, RS, Brasil
antoniom.spencer@gmail.com

Resumo— As características elétricas de rendimento e potência de um painel fotovoltaico (PV) são influenciadas por dois fatores climáticos, que são: irradiância solar e temperatura. Por essa razão, os algoritmos de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) são essenciais para se obter a máxima potência produzida. Portanto, este trabalho apresenta uma avaliação comparativa das principais técnicas clássicas de MPPT, sendo elas: Perturba e Observa (P&O), Hill Climbing (HC) e Condutância Incremental (InC). Para fazer essas avaliações de MPPT foram utilizados conversores estáticos CC-CC, tais como: *Boost*, *Buck* e *Buck-Boost*. No entanto, o MPPT é aplicado na entrada e saída dos conversores, a fim de observar o melhor desempenho. Os resultados de simulação são avaliados utilizando o software PSIM®.

Palavras-chaves— MPPT; Perturba e Observa; Hill Climbing; Condutância Incremental; Conversores estáticos CC-CC.

I. INTRODUÇÃO



O constante aumento do consumo de energia elétrica no mundo, junto à necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, faz com que há uma maior busca por fontes de energia limpa e renovável [1]. Nesse contexto, a energia solar se destaca como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Pois é um recurso abundante e capaz de suprir nossas necessidades de consumo sem poluição e sem produzir ruídos [2]. Os painéis fotovoltaicos (PV) captam a luz solar e convertem em eletricidade. Os PVs são formados por células conectadas entre si, que individualmente possuem uma capacidade reduzida de produção de energia. Portanto, para atender a demanda necessária de energia, as células são associadas através de ligações série e paralelo, formando os PVs [3]. Segundo [4], a energia solar se destaca pela redução dos gastos com energia elétrica, atração de novos investimentos privados, geração de empregos locais, redução de impacto ambiental, redução das perdas elétricas na rede, alívio no sistema elétrico em horários de alta demanda diurna, principalmente no verão.

No mercado atual há diferentes modelos de PVs conforme podem ser visto Tabela 1, que podem ser classificadas em três gerações, de acordo com seu material e suas características [5]. A primeira geração é composta por Silício monocristalino (m-Si) e Silício policristalino (p-Si), com uma maior participação no mercado, por ser uma tecnologia de maior eficiência e também por gerar mais potência em comparação com as outras

gerações. A segunda geração, também chamada de filmes finos, é dividida em três cadeias: Silício Amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) e Telureto de Cádmio (CdTe). Os módulos fotovoltaicos de filme fino são produzidos por meio da colocação direta do material sobre o vidro ou o metal. São flexíveis e possuem aparência homogênea. Possuem uma eficiência entre 5% a 13%. Por essa razão, é preciso um espaço maior para colocação dessas placas. A terceira geração, ainda em fase de pesquisa, é caracterizada por tecnologias que reúnem células orgânicas, híbridas e células solares de corante (DSC-Dye Solar Cells). Estas possuem alta eficiência, baixo custo/Watt e utilizam materiais abundantes e de baixa toxicidade [6] [7] [8].

As características elétricas de rendimento e potência em um painel fotovoltaico são influenciadas diretamente por dois fatores climáticos: intensidade da irradiância solar e temperatura das células [9]. Quanto maior a irradiância solar no painel fotovoltaico, maior será a corrente gerada e conseqüentemente maior a potência. Os PVs por estarem dispostos no sol, recebem uma grande quantidade de energia térmica, além do aquecimento pela resistência, isto faz com que a sua temperatura aumente, e conseqüentemente a tensão de saída diminui [10]. Devido a estas características de funcionamento, o ponto de operação onde a máxima potência é gerada não é constante. Desta forma o seu ponto de operação deve ser constantemente alterado. Logo, é fundamental extrair a máxima potência (MPP) gerada pelos PVs, aumentando assim a eficiência do sistema e reduzindo os custos da energia gerada. Para que os PVs operem sempre no MPP, é necessário utilizar técnicas que procurem incessantemente este ponto [10]. A técnica de MPPT é realizada a partir de algoritmos de controle, em um conversor CC, que

Tabela 1 - Características das células fotovoltaicas

Tecnologia	Silício cristalino		Filmes finos		
	m-Si	p-Si	a-Si	CIGS	CdTe
Eficiência (%)	15-22	14-20	5-9 %	10-13	9-11
Potência	50-300 W		50-110 W		
Vantagens	Alta eficiência		Processo econômico, matéria prima abundante e não tóxica	Boa eficiência	Eficiência média
Desvantagem	Custo elevado		Baixa eficiência, e degradação do material	Processo complexo e caro	Toxicidade do Cádmio e escassez de Telúrio
Aspecto					

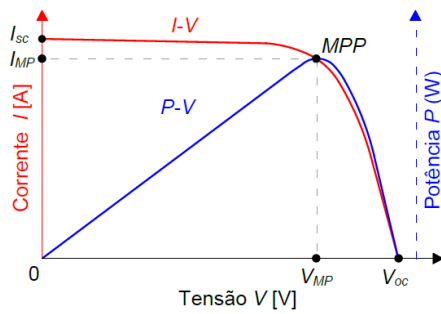


Fig. 1 Curva característica de corrente e tensão.

rastreiam incessantemente o ponto de operação, trabalhando em qualquer ponto da curva IxV, para se obter a máxima potência dos módulos PVs conforme visto na Fig. 1 [10].

O estudo de MPPT é necessário para que ocorra um aproveitamento máximo da eficiência do sistema, garantindo assim menores custos, maior ganho na produção e maior rendimento. Existem diversos métodos inteligentes de MPPT na Literatura tais como Fuzzy, FLC (Controle Lógico Difuso), RNA (Redes Neurais Artificiais), entre outros, que possuem uma maior eficiência, mas, no entanto, são mais complexos e caros [11] [12]. Portanto, nesse contexto serão avaliados os métodos clássicos que são: Perturbação e Observação (P&O), Técnica Hill Climbing (HC) e Condutância Incremental (InC) [2] [3].

Assim, o objetivo desse artigo é avaliar os algoritmos de MPPT clássicos da literatura, com o intuito de apresentar o desempenho deles perante diferentes situações. Para isso, o artigo é organizado da seguinte forma: na seção 2 são descritos o funcionamento do algoritmo de MPPT. Na seção 3 é apresentado de forma breve os conversores CC-CC clássicos. Por fim, na seção 4 e 5 é discutido os resultados de simulação e conclusão

II. ALGORITMOS CLÁSSICOS DE MPPT

Os algoritmos de MPPT são técnicas que se diferenciam pela forma com que o ponto de máxima potência é rastreado, resultando em diferenças significativas no aproveitamento da

energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, melhorando a eficiência e reduzindo os custos da energia elétrica [13] [14]. A seguir é descrito o funcionamento das principais técnicas utilizadas para realizar o MPPT aplicados em conversores em malha aberta.

A. Técnica Perturba e Observa (P&O)

O método P&O tem sido amplamente utilizado devido à sua simplicidade de implementação. Visto que possui uma estrutura simples de controle e necessita de poucos parâmetros (tensão e corrente do painel solar) para realizar o MPPT. O método consiste no incremento ou decremento periódico da razão cíclica do PV para a comparação entre a potência de saída antes e depois da perturbação. Isso faz com que o MPP nunca seja atingido, visto que a técnica estará sempre perturbando a razão cíclica do PV. Assim, em regime permanente, o sistema oscila em torno do MPP desperdiçando a energia disponível pelo painel. O método é mais confiável quando a irradiância ou a temperatura não varia rapidamente [14].

A Fig. 2(a) a seguir apresenta o fluxograma do algoritmo P&O, cuja referência para a variável de controle é a razão cíclica D_k . O controle deverá minimizar a diferença da razão cíclica, com a perturbação periódica da variável de controle, adicionando ou subtraindo um determinado valor fixo (ΔD). Após esse procedimento, ele compara a potência do painel fotovoltaico atual P_k com a anterior P_{k-1} .

B. Técnica de Hill Climbing (HC)

O método de HC é simples e de baixo custo. O algoritmo funciona perturbando o sistema, alterando a razão cíclica do conversor estático CC-CC e observando seu impacto na potência de saída, produzida pelos painéis fotovoltaicos. Esta técnica realiza uma amostragem periódica da tensão e corrente instantânea do painel fotovoltaico. Para calcular a potência e comparar os valores atuais com os anteriores [15], conforme mostra a Fig. 2(b). Com esta informação, é possível determinar o sentido que se deve seguir para encontrar o ponto de máxima potência. Caso houver diferença entre a potência atual P_k com a

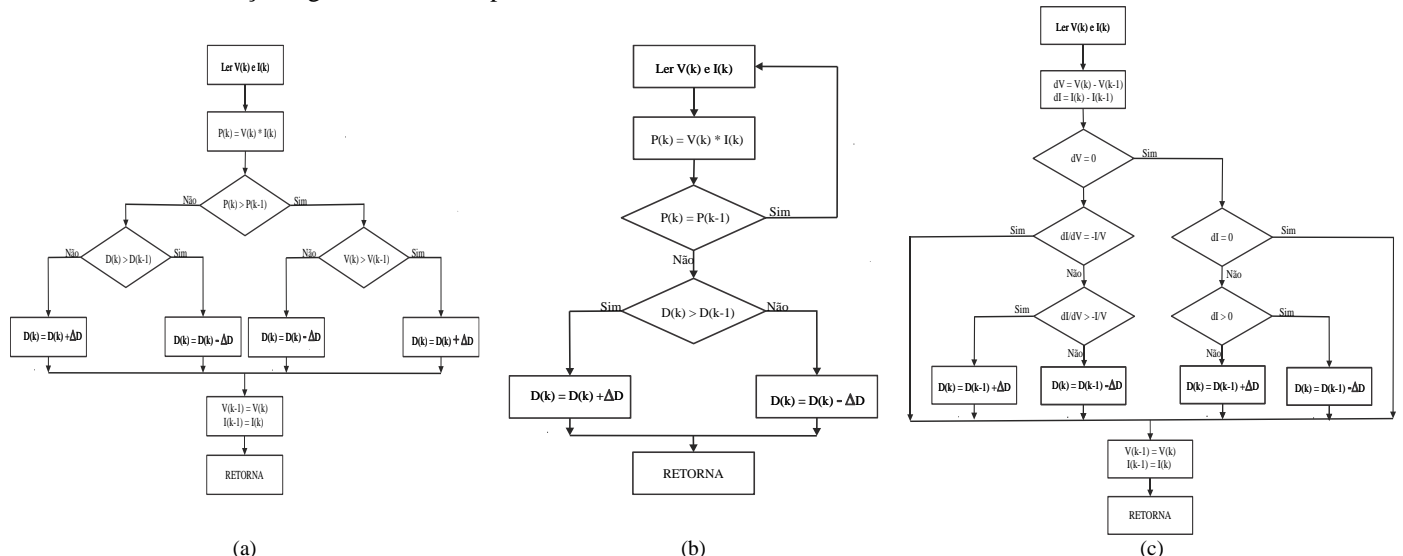


Fig. 2 Fluxograma da Técnica: (a) Perturba e Observa. (b) Hill Climbing. (c) Técnica Condutância Incremental.

potência anterior P_{k-1} , é então feita uma análise com a tensão atual e a medida anterior do painel. Logo, a razão cíclica (D , duty) é incrementada ou decrementada, dependendo da comparação desses valores de tensão. Ou seja, incrementada quando D_k é maior que D_{k-1} e decrementada, caso contrário. Desta forma a razão cíclica é alterada até que se atinja o MPP. No entanto, o que diferencia esta técnica em relação ao método de P&O é que se caso a potência atual for igual a anterior, o algoritmo reinicia e não perturba o sistema.

C. Técnica de Condutância Incremental (InC)

O método InC, Fig. 2(c), necessita de sensores de tensão e corrente, assim como o método de P&O e HC. Esse método analisa o sinal da derivada da potência pela tensão do arranjo fotovoltaico. De acordo com o método, o MPP está onde a derivada é nula. Assim, realizando uma amostragem periódica da tensão e corrente instantânea, calculando o incremento de condutância (dI/dV) e comparando com os valores instantâneos é possível rastrear o MPP segundo o algoritmo mostrado na Fig. 2(c). Diferentemente das outras técnicas este método apresenta melhores resultados em regime permanente e também para rápidas mudanças de irradiância. A localização do ponto de onde a máxima potência é extraída dos painéis é dada em (1) [15] [16] [17].

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (1)$$

Dessa forma, de acordo com (1), o ponto da tensão na curva do painel fotovoltaico pode ser ajustado para rastrear o v_{mp} , e pode ser reescrita como (2):

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (2)$$

Logo se tem a seguinte relação para o rastreamento por tensão (3):

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} & \text{no MPP} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} & \text{esquerda no MPP} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} & \text{direita no MPP} \end{cases} \quad (3)$$

III. CONVERSORES CLÁSSICOS

Para realizar o MPPT do PV é necessário um conversor de potência. Na Fig. 3 é apresentada uma estrutura genérica de um conversor CC-CC. Considerando o conversor ideal, a potência de saída (P_o) é igual à potência de entrada (P_i), o que significa que o rendimento do conversor é $\eta = 100\%$. Devido as não idealidades, tais como: $R_{DS(on)}$, resistências nos interruptores; r_L , resistências dos indutores, ESR, resistência serie equivalente dos capacitores; e v_f , queda de tensão direta dos diodos, o rendimento do conversor não é 100%. Logo, a potência de saída do conversor é dada por (4):

$$P_o = \eta P_i \Rightarrow P_o < P_i \quad (4)$$

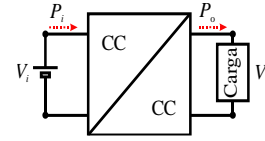


Fig. 3 Conversor CC-CC.

Usualmente, para realizar os algoritmos de MPPT é feito a leitura da tensão e corrente de entrada do conversor, conforme pode ser visto na Fig. 4(a). Essa estratégia já é consolidada na literatura e apresenta melhor desempenho para os conversores com fonte de corrente na entrada. Isso porque a corrente de entrada desse tipo de conversor é sempre contínua. O que não acontece para os conversores com fonte de tensão na entrada, em que a corrente de entrada é descontínua. Logo, o sensor de corrente (I_{sense}) pode efetuar uma leitura incoerente com a realidade. Além disso, conforme (4), a Carga nem sempre pode estar drenando a potência máxima. Nesse sentido, os algoritmos de MPPT podem ser efetuados de acordo com a Fig. 4(b). Essa abordagem utiliza o mesmo número de sensores (V_{sense} e I_{sense}) e ainda considera as perdas do conversor. Isso permite que a carga drene a potência máxima disponível do conjunto PV e conversor CC-CC. Porém isso não garante que o desempenho dessa abordagem seja melhor em relação as características de tempo de estabilização, eficiência, entre outros.

Na literatura, os conversores CC-CC não isolados sem buffer são: *Boost*, *Buck* e *Buck-Boost*. Essas topologias são apresentadas na Fig. 5 bem como suas representações por fonte de tensão e corrente e na Tabela 2 é feito um resumo dessas características. O conversor *Boost* (Fig. 5(a)) é um conversor elevador de tensão, isto é, a tensão de saída (V_o) é sempre maior que a tensão de entrada ($V_i = V_{pv}$). Além disso, este conversor é do tipo de fonte de corrente na entrada (Fig. 5(b)), o que é um atrativo para efetuar o MPPT na entrada, conforme Fig. 3(a). Por outro lado, o conversor *Buck* (Fig. 5(c)) é abaixador de

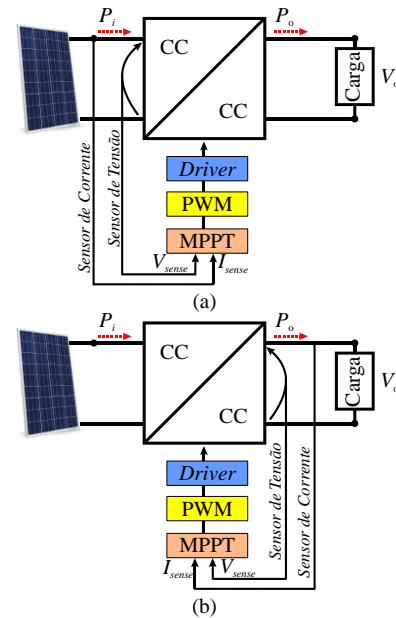


Fig. 4 Conversor CC-CC com (a) MPPT na entrada. (b) MPPT na saída.

tensão e fonte de corrente na saída (Fig. 5(d)). Assim, estima-se que o melhor desempenho para realizar o MPPT nesse conversor é na saída, de acordo com a Fig. 3(b). Um conversor que apresenta característica como fonte de tensão na entrada e saída (Fig. 5(f)) é o conversor *Buck-Boost* (Fig. 5(e)). Nesse caso, aplicar MPPT na entrada ou saída, estima-se que o desempenho será semelhante. Por fim, deve ser destacado que existem outros conversores CC-C não isolados com buffer. Dentre esses, o conversor *Cuk* é fonte de corrente na entrada e saída. Enquanto que o conversor *Zeta* é fonte de corrente na entrada e o conversor *SEPIC* é fonte de corrente na saída. Isso implica que para implementar o MPPT nesses conversores, deve avaliar essas características.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Como discutido na Tabela 1, a célula com melhor aspecto é a do silício monocristalino, portanto a mesma será utilizada no projeto. A Tabela 3 apresenta os parâmetros referentes ao modelo de painel escolhido, manufaturada pela Canadian Solar, para o ajuste de simulação, avaliados a uma temperatura de 25°C e irradiância de 1000 W/m². A partir disso, os valores dos componentes dos conversores são encontrados, conforme Tabela 4. Destaca-se que os conformes não foram otimizados, mas buscou-se avaliar todos os conversores sob as mesmas considerações. Com os parâmetros de projeto definidos e calculados para os conversores, podemos analisar seus resultados junto com suas simulações. No qual foram aplicadas perturbações de irradiância e temperatura no sistema, a fim de se observar seu desempenho.

Primeiramente, é avaliado os resultados de potência obtido pelos MPPTs, quando aplicado nas entradas e saídas dos conversores. Na Fig. 6(a) pode ser observado o método de P&O. Como pode ser visto, essa técnica obteve os melhores resultados quando aplicada na entrada dos conversores, ainda pode ser destacado que quando há uma queda na irradiância ou uma elevação da temperatura, ocorre uma perda significativa na

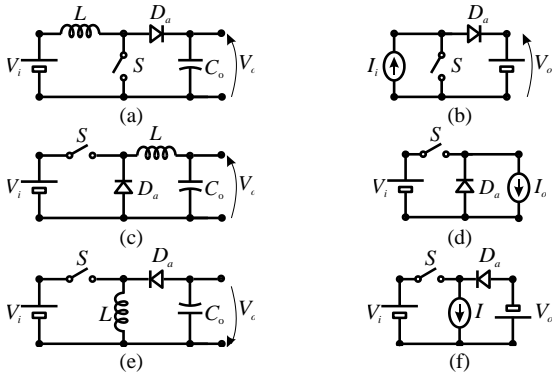


Fig. 5 Conversor (a) Boost. (b) Boost simplificado. (c) Buck. (d) Buck simplificado. (e) Buck-boost. (f) Buck-boost simplificado.

Tabela 2 - Características dos Conversores

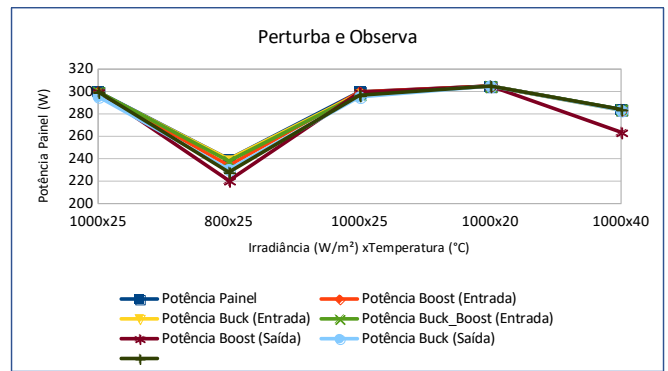
Característica	<i>Boost</i>	<i>Buck</i>	<i>Buck-Boost</i>
Ganho (M)	$\frac{1}{1-D}$	D	$\frac{D}{1-D}$
Entrada	Fonte de Corrente	Fonte de Tensão	Fonte de Tensão
Saída	Fonte de Tensão	Fonte de Corrente	Fonte de Tensão

Tabela 3 - Parâmetros do módulo fotovoltaico

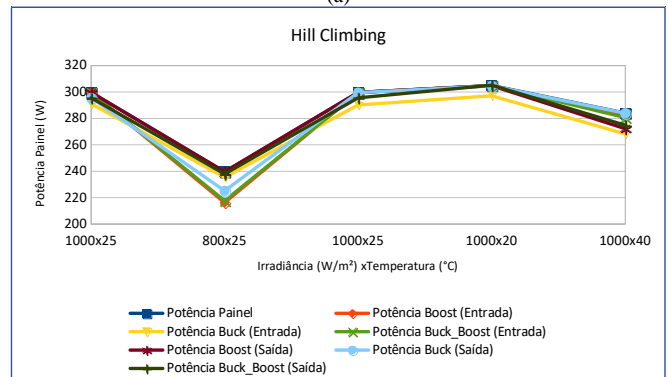
Modelo	CS6K – 300MS
Tipo	Monocristalino
Potência nominal (P_{max})	300 W
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	39,7 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,83 A
Tensão de máxima potência (V_{mp})	32,5 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	9,24 A
Eficiência	18,33 %
Número de células	60 (6 x 10)

Tabela 4 - Parâmetros calculados para os conversores *Boost*, *Buck* e *Buck-Boost*

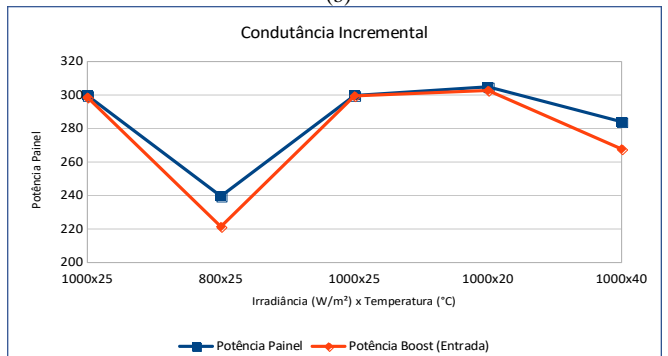
Componentes	Boost	Buck	Buck-Boost
f_s	50 kHz		
C_{pv}	14,2 mF	14,2 mF	14,2 mF
R	14,08 Ω	1 Ω	3,52 Ω
L	352 μ H	176 μ H	352 μ H
C	7,1 μ F	1,42 μ F	28,4 μ F



(a)



(b)

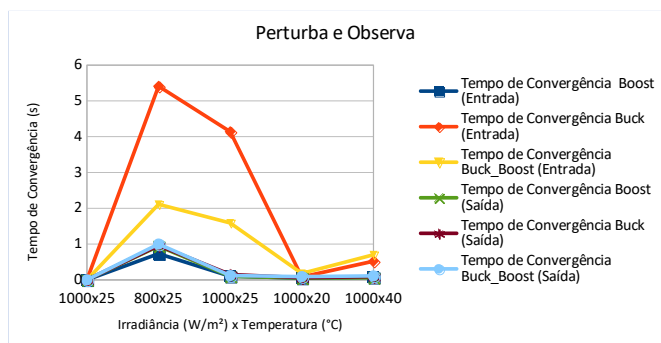


(c)

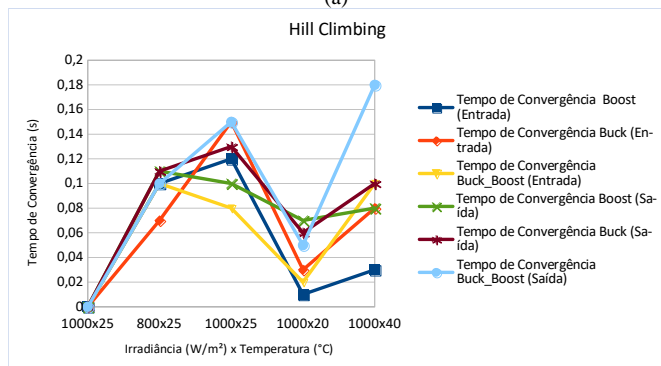
Fig. 6 Resultados de simulação da potência do método de: (a) P&O. (b) HC. (c) InC.

potência, principalmente para o MPPT aplicado na saída do conversor *Boost*. Na Fig. 6(b) pode ser observado o método de HC. Como podemos observar, quando há uma queda na irradiância, o MPPT aplicado na saída do conversor *Boost*, foi o que obteve o melhor desempenho, já para a variação da temperatura, o MPPT aplicado na entrada do conversor *Boost* e saída do conversor *Buck*, obteve os melhores resultados. Por fim, na Fig. 6(c) pode ser visto o método de InC que como podemos observar, a mesma convergiu apenas na entrada do conversor *Boost*. Isso pode ser causado pelas seguintes razões; os capacitores de saída são valores baixos, o que faz com que a variação de tensão seja maior; os conversores estão operando em malha aberta, o que faz com que as perturbações causadas pelos algoritmos de MPPT façam com que o conversor não fique estabilizado. Destacando que buscou-se realizar as avaliações sob os mesmos critérios (parâmetros elétricos e código de programação).

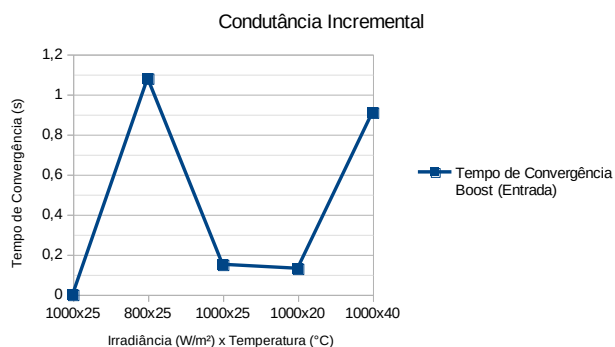
Em relação ao tempo de convergência podemos observar os resultados na Fig. 7. Na Fig. 7(a) pode ser visto o tempo de



(a)



(b)

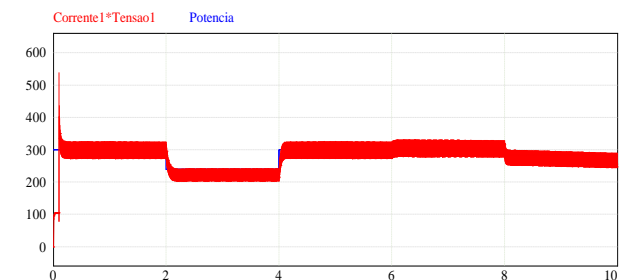


(c)

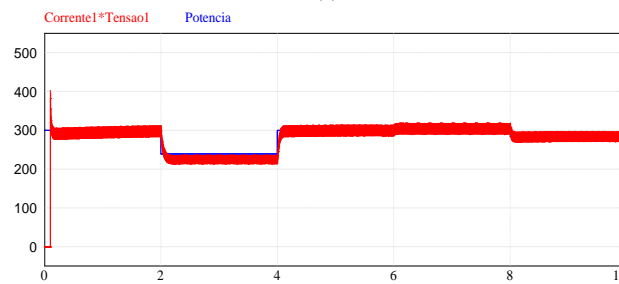
Fig. 7 Resultados de simulação do tempo de convergência do método de: (a) P&O. (b) HC. (c) InC.

convergência para o método de P&O, no qual pode ser verificado que o método de P&O aplicado na entrada do conversor *Buck*, foi o que obteve o tempo de convergência mais elevado. Em relação ao método HC, Fig. 7(b), quando aplicado na saída do conversor *Buck-Boost*, este obteve o maior tempo de convergência. Como mencionado anteriormente, o método de InC (Fig. 7(c)) convergiu apenas na entrada do conversor *Boost*. Que por sua vez, obteve um tempo de convergência mais elevado na queda da irradiância e na elevação da temperatura.

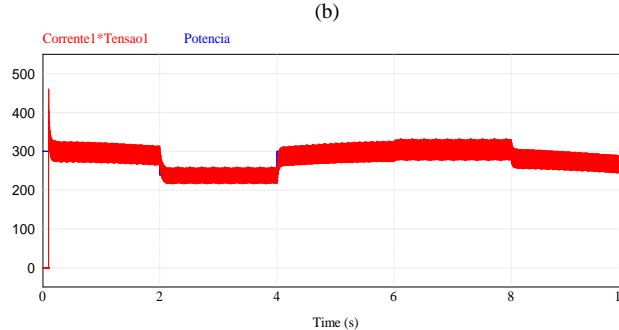
Para demonstrar o comportamento dos algoritmos de MPPT aplicados nos conversores no software PSIM®, a Fig. 8 apresenta os melhores resultados de simulação obtidos. No qual pode-se destacar que o conversor HC, teve um bom desempenho para ambas técnicas de simulações. Nas curvas da Fig. 8, em vermelho é feito a multiplicação da corrente e tensão do conversor e em azul a potência do painel. A partir disso, fica claro que para as variações de irradiância solar ([0 – 2]s – 1000 W/m² e 25 °C, [2 – 4]s – 800 W/m² e 25 °C e [4 – 6]s – 1000 W/m² e 25°) e de temperatura ([6 – 8]s – 20°C e 1000 W/m², [8 – 10]s – 40°C e 1000 W/m²), todos os conversores alcançaram o MPP.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Simulação da técnica HC aplicada na saída do conversor Boost (a). Simulação da técnica HC aplicada na saída do conversor Buck-Boost (b). Simulação da técnica HC aplicada na saída do conversor Buck (c).

Tabela 5 - Avaliação qualitativa

Características	MPPT Entrada	MPPT Saída
Oscilação de Potência	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> P&O
Eficiência	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck-Boost</i> HC
Tempo de Convergência	<i>Boost</i> HC	<i>Buck</i> HC
Variação de Irradiância	<i>Buck-Boost</i> P&O	<i>Buck-Boost</i> HC
Variação de Temperatura	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> P&O
Melhor Desempenho	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> HC

Por fim, a Tabela 5 apresenta uma avaliação qualitativa das características de simulação dos MPPTs, observadas na entrada e saída dos conversores. Os resultados de simulação apresentaram bons desempenhos, mas como pode ser observado, quando o MPPT é aplicado na entrada do conversor, o *Boost* foi quem apresentou as melhores características, entre elas: eficiência, tempo de convergência, variação de temperatura e oscilação de potência. Já quando aplicado na saída, o conversor *Buck*, obteve os melhores resultados para: oscilação de potência, tempo de convergência e variação de temperatura. Além disso, os resultados mostram que os algoritmos de MPPT P&O e HC possuem um melhor desempenho. Enquanto que o método de InC não convergiu para a maioria dos testes. No entanto, isso pode ter ocorrido devido ao ajuste do conversor, onde buscou-se realizar as avaliações sob os mesmos critérios.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado um estudo comparativo entre as principais técnicas clássicas de MPPT. Essa comparação é baseada na avaliação de desempenho desses MPPTs, para diferentes condições, a fim de se observar quais métodos apresentaram um melhor resultado. Para isso, foi utilizado os conversores CC-CC, no qual os MPPTs foram aplicados na entrada e saída dos mesmos, a fim de se observar o melhor desempenho, visto que o conversor *Boost* possui fonte de corrente na entrada e o conversor *Buck* na saída. Os resultados de simulação apresentaram bons desempenhos. Para o MPPT aplicado na entrada do conversor, o conversor *Boost* foi quem apresentou as melhores características. Já quando aplicado na saída, o conversor *Buck*, obteve os melhores resultados. Além disso, os resultados mostram que os algoritmos de MPPT P&O e HC possuem um melhor desempenho, enquanto que o InC não convergiu para as características de simulação aplicadas.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

REFERENCIAS

- [1] Villalva, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações, 2ª ed. rev. e atual, São Paulo, Brasil: Érica, 2015.
- [2] Soediby, et al. The comparative study of Buck-boost, Cuk, Sepic and Zeta converters for maximum power point tracking photovoltaic using P&O method. International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 2015.
- [3] Khadidja, S. et al. Comparative study of incremental conductance and perturb & observe MPPT methods for photovoltaic system. International Conference on Green Energy and Conversion Systems, GECS 2017, 2017.
- [4] Absolar, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. Energia Solar Fotovoltaica Atinge Marca Histórica de 500 MW em Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil, 2019. Disponível em: < <http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuida.html> >. Acesso em: 15 ago. 2019.
- [5] Siluk, A. R. Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos aplicados à edificação, 2017. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Dissertação Mestrado, Santa Maria, RS, Brasil, 2017.
- [6] Almeida, E. et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016.
- [7] Silva, L. R. C. Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para a Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Dissertação de Mestrado, MG, 2015.
- [8] Soares, E. A. P. Uma nova perspectiva de eletrificação rural em corrente contínua: uma experiência no estado do Piauí, 2011. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Dissertação Mestrado, Fortaleza, 2011.
- [9] Zientarski, J. R. R. Contribuições ao Estudo de Conversores CC-CC com Processamento Parcial de Energia Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos. Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Doutorado, Santa Maria, RS, 2017.
- [10] Grundemann, W. T. MPPT Perturba e Observa Aplicado ao Conversor Boost. Universidade Federal do Pampa, Trabalho de Conclusão do Curso, Alegrete, 2017.
- [11] Ons, Z. et al. Comparison of Hill-Climbing and Artificial Neural Network Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Modules. International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry, MCSI, 2015.
- [12] Kumar, J. et al. Fuzzy and P&O MPPT Techniques for Stabilized the Efficiency of Solar PV System. International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GUCON, 2018.
- [13] Moçambique, N. E. M. Aplicação de algoritmos de busca do ponto de máxima potência e controladores lineares e/ou fuzzy para a regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos, 2012. Dissertação Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [14] Confessor, S. L. M. Análise Comparativa de Controladores MPPT Aplicados a um Sistema Fotovoltaico. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Dissertação de Mestrado, Mossoró, RN, 2014.
- [15] Terán, E. M. M. Sistema fotovoltaico de pequeno porte interligado à rede elétrica, 2012. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação Mestrado, Fortaleza, 2012.
- [16] Imhoff, J. Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação de Mestrado, p. 146, Santa Maria, RS, 2007.
- [17] Lobato, S. de C. Análise comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental, 2015. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Monografia, Juiz de Fora, 2015.