

# ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE MPPT, P&O, SLIDING MODE E BACKSTEPPING, APLICADOS A SISTEMA FOTOVOLTAICO

Robson Taveira Gonçalves da Silva, Fernando L. M. Antunes  
Departamento de Eng. Elétrica  
Universidade Federal do Ceará(UFC)  
Fortaleza, Brasil  
robsonlaveira1@gmail.com,  
fantunes@dee.ufc.br

Antônio Alisson Alencar Freitas,  
Marcus Vinicius Silverio Costa  
Departamento de Engenharias  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)  
Caraúbas, Brasil  
alisson.freitas@ufersa.edu.br,  
marcus.costa@ufersa.edu.br

José Fernando Alves da Silva  
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação  
Instituto Superior Técnico (IST)  
Lisboa, Portugal  
fernando.alves@tecnico.ulisboa.pt

**Resumo** — Os sistemas fotovoltaicos possuem a característica de converter a energia solar em eletricidade, entretanto a eficiência na conversão depende, em grande parte, de condições ambientais, como irradiação e temperatura nas células fotovoltaicas. Este trabalho apresenta uma análise em simulação computacional de três técnicas que objetivam a busca do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) do sistema solar. As técnicas estudadas são a perturba e observa P&O, módulos deslizantes (*Sliding Mode Control* - SMC) e o controle *Backstepping*. O sistema apresentado é formado por dois módulos fotovoltaicos conectados a um conversor CC-CC do tipo elevador boost, na conexão dos dois blocos são aplicadas as técnicas de controle.

**Palavras chave** — MPPT, P&O, modo deslizante SMC, *Backstepping*, fotovoltaico.

## I. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta grande capacidade de gerar energia por meio de seus recursos energéticos renováveis, no ano de 2017 analisando a produção da energia elétrica, a participação das fontes renováveis foi de 80,4% na Oferta Interna de Energia Elétrica, com 624,3 TWh, este valor apresentou um aumento de 0,7% em relação ao ano de 2016 (619,7 TWh).

As fontes hidráulica, eólica e solar entre os anos de 2016 e 2017 apresentaram os seguintes rendimentos[1]. A Hidráulica teve uma queda de oferta (-2,6%) com uma produção de 380,911 – 370,906GWh, esta diminuição foi resultado da mudança climática, com a redução do nível das águas nas barragens com a pequena incidência de chuvas nestes locais. Como destaques, os aumentos na oferta por eólica (26,5%) com 35,236 – 35,655 GWh, e da solar (832%) com oferta de 85 – 832 GWh [1]. Pode ser observado que no período analisado houve um aumento da oferta de energia elétrica, mesmo com a queda da sua principal fonte (hidráulica), isso é devido a diversificação das fontes renováveis, desta forma é possível observar a importância do investimento nas mais variadas fontes renováveis para garantir o nível de oferta energética.

O Plano Decenal, de 2017 a 2026, do Ministério de Minas e Energia brasileiro apresentado em [2] demonstra que a parcela renovável desta matriz na produção de energia elétrica terá 87% de sua estrutura formada de fontes de origem renovável, no final do período. Desta forma, podendo suprir o crescimento da demanda por fontes energéticas e ao mesmo tempo manter o caráter renovável da matriz.

A energia fotovoltaica, ou do inglês *photovoltaic* (PV), ainda é pouco significativa na matriz, entretanto, a geração de energia com esta fonte vem aumentando com uma significativa taxa de crescimento. A perspectiva é que a geração com esta fonte continue crescendo, já que novos parques solares estão entrando em operação e o aumento da produção do consumidor no setor de eletricidade através da popularização das tecnologias de micro e mini geração distribuída [2].

Em [3,4,5] é apresentado uma estrutura em comum para os sistemas PV, composto por painéis com células fotovoltaicas ligados a um conversor de energia do tipo CC-CC, este conversor é usado para estabilizar a tensão em um barramento CC em um nível desejado para cada aplicação. Em [4] é usado um conversor do tipo boost, em [5] é aplicado um buck-boost e em [6] um SEPIC.

Os sistemas fotovoltaicos (PV) apresentam uma característica não linear que exhibe uma variedade de comportamentos associados a variação climática, devido as mudanças na irradiação dos raios solares e da temperatura no PV a tensão de saída e corrente da célula PV variam. Para se obter o controle deste sistema é necessário o uso de métodos apropriados, geralmente do controle conhecido como algoritmos de busca da máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT), são usados para manter a potência de saída no valor máxima possível e estável, mesmo durante o comportamento variável dos raios solares [6].

Com objetivo de tratar os fenômenos não-lineares destacados e atingir a estabilidade do sistema com o MPPT, muitas abordagens são propostas na literatura, como a técnica *Sliding Mode Controller* (SCM) [4], lógica *Fuzzy* [6], rede neural [7], perturba e observa P&O e *backstepping* [5]. Como

pode ser observado, vários tipos de soluções MPPT são relatados na literatura, o que diferem os métodos de controle são sua complexidade, número de sensores necessários para operação, velocidade de convergência, faixa de custo para projeto e estrutura [8].

As técnicas MPPT mais utilizadas são Perturba e Observa (P & O) e Incremental Condutância (IC), a popularidade para esta duas técnicas é dada por sua simplicidade de implementação e suas taxas de desempenho, gerando um menor custo de projeto e estrutura. No entanto, devido à natureza não linear do módulo fotovoltaico e do conversor DC / DC, o desempenho e estabilidade do sistema é limitado à vizinhança em torno do MPPT. Esta característica coloca uma restrição no desempenho do sistema, uma vez que o ponto muda com as perturbações ambientais de irradiação e temperatura, imprevisíveis e inevitáveis.

Em contrapartida, técnicas como apresentadas no trabalho [4,9] oferecem velocidade e eficiência no rastreamento em qualquer ponto de operação, e um custo de projeto menor que nos trabalhos [5,6,7]. Em [4] é usado um projeto de um SMC destinado a realizar uma rápida ação MPPT em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, em [9] outro projeto de SMC interessante para sistemas fotovoltaicos é apresentado considerando um conversor buck.

O projeto do controlador pode ser feito com base nos métodos de estabilização direta ou indireta de Lyapunov. A primeira classe de abordagens é difícil de usar e requer cálculos árduos; enquanto a segunda família de abordagens tem o problema de escolher as funções de Lyapunov como desvantagens. Para superar esses problemas, a abordagem de controle de *backstepping* pode ser considerada como uma solução. É um método recursivo de segunda classe com uma escolha sistemática da função de Lyapunov [13]. Essa técnica de controle tem sido relatada na literatura [13] - [14] devido a seus desempenhos e vantagens. Uma das maiores vantagens desta técnica de controle é a sua robustez contra a variação dos parâmetros do sistema [15] e sua notável capacidade de lidar com fenômenos não-lineares complexos.

Portanto, este trabalho propõe um comparativo de duas técnicas de MPPT, o P&O, o SMC e o Backstepping, aplicados em um sistema PV com estrutura composta por dois módulos de células solares, um conversor CC-CC do tipo boost e um bloco para o controle de MPPT alocado entre o módulo PV e o conversor, conforme apresentado na Figura 1. No tópico 2 e 3 do trabalho são apresentados, respectivamente, o modelo de painel e conversor CC-CC usados no projeto. Em seguida, apresenta o desenvolvimento dos algoritmos de MPPT, e por fim os resultados de simulação em software dedicado.

## II. MODELAGEM DO PAINEL PV

Os painéis fotovoltaicos são formados por arranjos de pequenas células solares, as curvas de tensão-corrente (V-I) do painel é uma característica importante do mesmo, por meio destas curvas é possível modelar um circuito elétrico equivalente do painel. A sua modelagem é formada por uma estrutura paralela de uma fonte de corrente, resistor shunt e diodo, seguido por um resistor série. Os modelos podem ser de dois tipos principais; os modelos de diodo único, e os modelos

de diodo duplo. Os de diodos duplos apresentam precisão maior que o de único diodo, no entanto, apresentam uma baixa velocidade na simulação computacional, pois é relativamente complexo. Assim, o modelo de diodo único é o mais comumente usados em estudos de simulação de eletrônica de potência, porque oferece compensação razoável entre precisão e simplicidade [3].

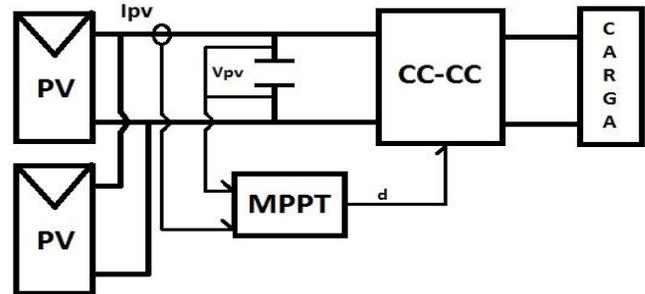


Fig. 1. Esquema do sistema fotovoltaico.

No presente trabalho, será abordado o modelo de um diodo, apresentado na Figura 2, com fonte de corrente ( $I_L$ ), diodo ( $I_D$ ), resistor shunt ( $R_{sh}$ ), resistor série ( $R_s$ ).

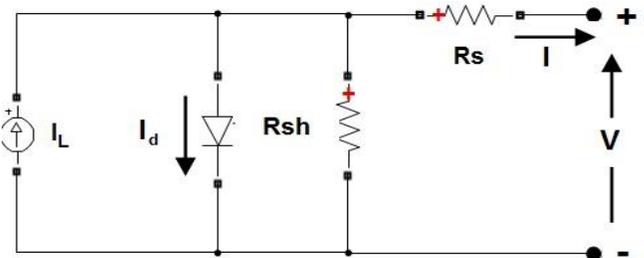


Fig. 2. Modelo de painel PV de um diodo.

Este circuito permite escrever a equação da corrente do diodo e da tensão relacionado a temperatura das células:

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_T = \left(\frac{kT}{q}\right) * nl * Ncell \quad (2)$$

Onde:

- $I_d$  : corrente do diodo (A);
- $V_d$  : tensão do diodo (V);
- $I_0$  : corrente de saturação do diodo (A);
- $nl$  : fator de idealidade do diodo próximo de 1,0;
- $k$  : constante de Boltzman ( $1,6022e-23$  J.K-1);
- $q$  : carga do elétron;
- $T$  : temperatura das células (K);
- $Ncell$  : número de células em série no módulo.

Para simulação foram utilizadas as características de um painel solar comercial de modelo Kyocera KD210GX-LPU, as principais informações deste modelo estão na Tabela 1:

As curvas características de potência-tensão (P-V) e corrente-tensão (I-V) do painel solar para irradiações diferentes são mostradas na Figura 3, com variação de

irradiação (1000, 800, 700, 500, 400, 200  $\text{KWm}^2$ ). Estas curvas são importantes para os algoritmos de MPPT que devem garantir que o painel funcione nesse ponto.

TABELA 1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO PAINEL PV

| Características                                 | Valores            |
|---|--------------------|
| Potência máxima                                 | 210 (W)            |
| Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )          | 33,2 (V)           |
| Tensão do ponto de máx. potência ( $V_{mp}$ )   | 26,6 (V)           |
| Coeficiente de temperatura do ( $V_{oc}$ )      | 0,12 (%/deg.C)     |
| Células por modulo                              | 54 unid.           |
| Corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ )         | 8,58 (A)           |
| Corrente do ponto de máx. potência ( $I_{mp}$ ) | 7,9 (A)            |
| Coeficiente de temperatura do ( $I_{sc}$ )      | 0,000515 (%/deg.C) |

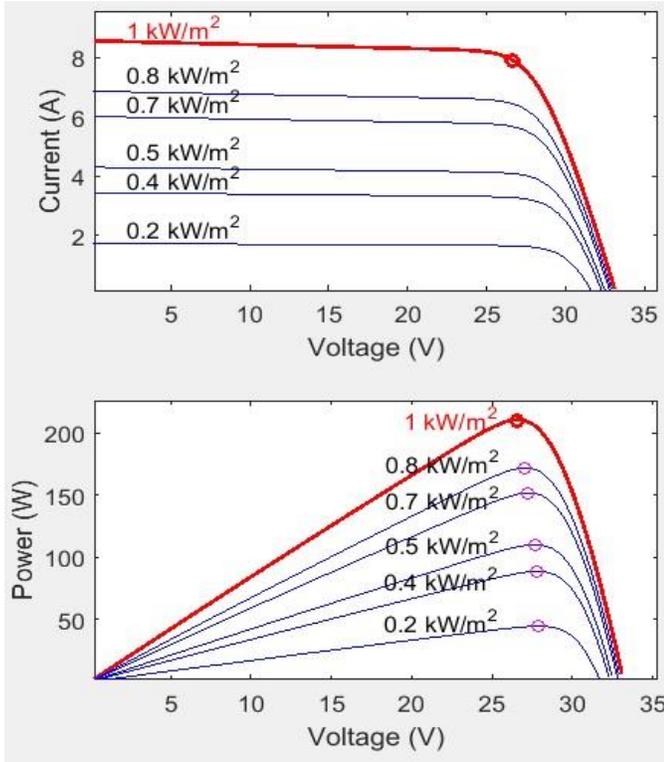


Fig. 3. Curvas características do painel fotovoltaico.

### III. MODELAGEM DO CONVERSOR CC-CC

Em sistemas de geração solar fotovoltaica, os conversores CC-CC fazem a ponte de ligação dos painéis às cargas de corrente contínua. Estes conversores têm duas funções principais: a primeira de gerar um nível de tensão adequado para a carga no barramento CC, e a segunda é seguir o ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos. O conversor usado no sistema PV deste trabalho é mostrado na Figura 4, se trata de um conversor elevador do tipo boost.

Para a modelagem foi considerada a atuação no modo de condução contínua (MCC) do boost, as equações (3) e (4) são respectivamente definidas para os valores do indutor e capacitor de entrada. Com o valor do de indutância e

capacitância de entrada definidos é calculado com (5) o capacitor de saída [10].

$$L_1 = \frac{(V_{pv} * D)}{f_{chave} * \Delta I} \quad (3)$$

$$C_1 \geq \frac{\left(\frac{P_{in}}{V_{pv}}\right) * D}{f_{chave} * V_{pv} * \Delta V_{ripple}} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\left(\left(\frac{\sqrt{2} * \left(\frac{V_{in}}{V_{out}}\right)}{V_{out}}\right) - \left(\frac{1}{V_{pv}}\right)\right) * P_{in}}{4 * \pi * v_{out} * \Delta V_{outripple}} \quad (5)$$

Com:

$$D = \left(1 - \left(\frac{V_{pv}}{V_{out}}\right)\right) \quad (6)$$

$$\Delta I = \Delta I_{ripple} * \left(\frac{P_{in}}{V_{pv}}\right) \quad (7)$$

onde D é a razão cíclica, os índices in e out definem valores de entrada e saída, o índice *ripple* se refere à ondulação definida em projeto. A frequência da chave ativa dado por  $f_{chave}$  e  $P_{in}$  é a potência de entrada do boost.

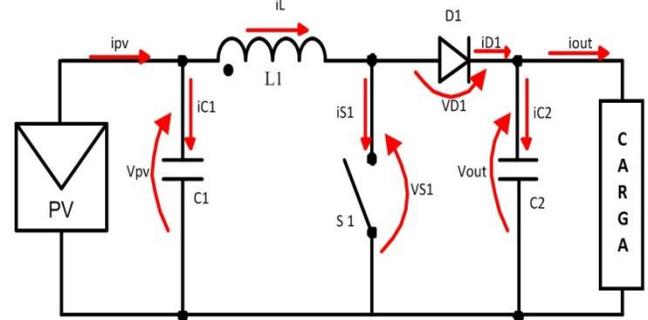


Fig. 4. Modelo de conversor boost ligado ao sistema PV.

### IV. ALGORITMOS DE MPPT

Neste tópico será apresentada uma base teórica para os três algoritmos de MPPT, o P&O, o SMC e o Backstepping, também é apresentado o fluxograma para cada estratégia adotada.

#### A. P&O

Esta técnica é a mais usada devido sua fácil implementação, como o próprio nome indica, a técnica consiste em perturbar uma variável do sistema e observar sua resposta após esta ação. A metodologia adotada para o P&O foi à seguinte: a razão cíclica da chave é variada e a potência de saída dos painéis é observada, seguido de uma análise da tensão do painel.

Caso a potência aumente é analisado se ocorreu um aumento do valor da tensão do painel, caso a tensão tenha aumentado a razão cíclica é decrementada, caso a tensão diminua a razão cíclica é incrementada.

Se a potência diminui é analisado se ocorreu um aumento do valor da tensão do painel, caso a tensão tenha aumentado a razão cíclica é incrementada, se a tensão estiver menor a razão cíclica é decrementada. A Figura 5 mostra o fluxograma adotado para a estratégia.

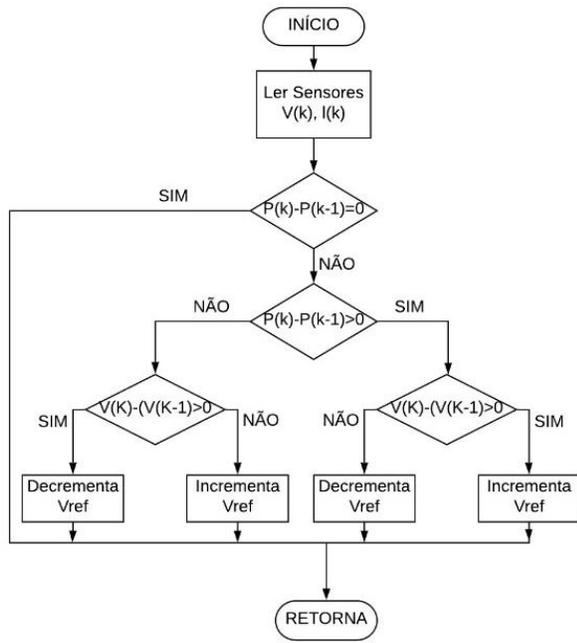


Fig. 5. Fluxograma P&O.

### B. SMC

A técnica de controle de módulos deslizantes (*Sliding Mode Control* – SMC) é um caso particular do controle por estrutura variante (*Variable Structure Control* – VSC), sua estratégia consiste que exista uma superfície de deslizamento em um sistema dinâmico, onde qualquer trajetória no espaço de estados seja levada e permaneça neste lugar geométrico. Considerando que a superfície de deslizamento  $s(x(t)) = 0$ , com  $x \in IR^n$ , é uma função escalar para todos os pontos do espaço de estados. Escolhendo a Função candidata de Lyapunov na equação (8), desenvolvendo o método indireto de Lyapunov é possível prever uma condição de alcance global de  $s(x(t))$  dada na equação (9), [11].

$$V(x, t) = \left(\frac{1}{s}\right) s^2 \quad (8)$$

$$V'(x, t) = ss' < 0 \quad (9)$$

Para o controle em malha fechada, o erro de corrente ( $\epsilon$ ) é o resultado da diferença na comparação do sinal da corrente de referência com o sinal da corrente no indutor [12].

$$\epsilon = I_{ref} - I_L \quad (10)$$

Para isso é necessário encontrar o sinal da corrente de referência. Partindo do objetivo do controle em (11) para o MPPT.

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = 0 \quad (11)$$

Sabendo que a potência do PV é dada por:

$$P_{pv} = V_{pv} I_{pv} \quad (12)$$

Temos:

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = \frac{d(v_{pv} \cdot i_{pv})}{dv_{pv}} = 0 \quad (13)$$

Aplicando a regra do produto das derivadas:

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = i_{pv} + \frac{v_{pv} \cdot d(i_{pv})}{dv_{pv}} = 0 \quad (14)$$

Resolvendo para  $I_{pv}$  e fazendo  $I_{pv} = I_{pvref}$ , temos:

$$I_{pvref} = -V_{pv} * \frac{dv_{pv}}{di_{pv}} \quad (15)$$

Para este valor de  $I_{pvref}$  é necessário o cálculo de slew-rate para redução dos valores de picos que podem ser muito elevados.

Para definição da superfície de deslizamento é usada a função de controle  $s(t)$  mostrada na equação (16), nela é realizada a soma da resultante dos sinais de ( $\epsilon$  e  $\epsilon'$ ), atribuídos aos respectivos ganhos. O erro de corrente  $\epsilon$  e sua derivada  $\epsilon'$  constituem o plano de erro para o controle, denominado superfície de deslizamento [12].

$$s(t) = k_1 \epsilon + k_2 \epsilon' \quad (16)$$

O sinal de controle  $s(t)$  será usado para geração da modulação PWM que determinará a razão cíclica da chave. A lei que define a alternância das estruturas na geração do PWM obedece à equação (17).

$$\begin{cases} s \geq \frac{\Delta I_L}{2}, & m = \frac{\Delta I_L}{2} \\ s \leq \frac{-\Delta I_L}{2}, & m = \frac{-\Delta I_L}{2} \end{cases} \quad (17)$$

O fluxograma presente na Figura 6 demonstra a estratégia do controle projetado na simulação.

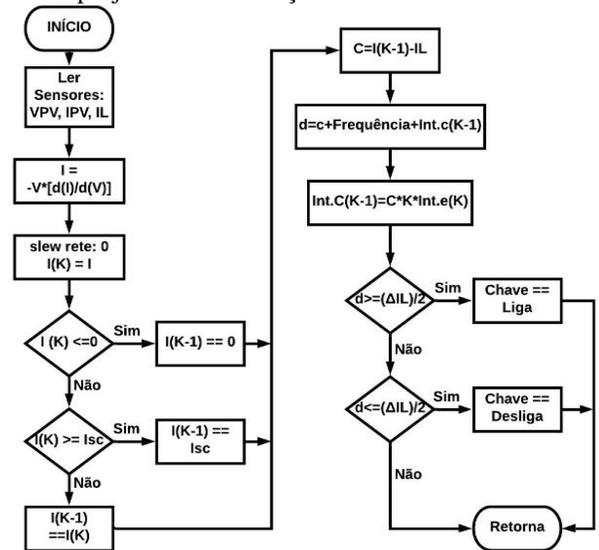


Fig. 6. Fluxograma SMC.

### C. Backstepping

O *Backstepping* é um controle robusto e não linear. A primeira ideia da técnica é projetar um controle do tipo recursivo, considerando algumas variáveis de estado virtuais e projetando leis de controles intermediários para elas. A estabilidade é conseguida através das funções de Lyapunov.

O primeiro passo do controle é obter a tensão de referência  $V_{pvref}$ . A proposta do controle é fazer com que a variação de potência em relação à tensão tenda a zero, como apresentado na equação (11). Desenvolvendo esta equação, como apresentado na técnica do SMC, encontra-se a equação (14), resolvendo está para o valor da tensão do painel  $v_{pv}$  e fazendo  $v_{pv} = v_{pvref}$ , temos a equação (18), e semelhante ao SMC é necessário o cálculo de slew-rate para reduzir os valores de picos elevados.

$$v_{pvref} = -i_{pv} * \frac{dv_{pv}}{di_{pv}} \quad (18)$$

O segundo passo para o controle é calcular o erro para a corrente  $e_i$ , este valor está relacionado com o erro da tensão do painel  $e_{v_{pv}}$ , esta relação é estabelecida por meio de uma integral, as equações usadas são:

$$e_{v_{pv}} = V_{pvref} - V_{pv} \quad (19)$$

$$e_i = \int_0^T e_{v_{pv}} \cdot dt = 0 \quad (20)$$

Desenvolvendo análises matemáticas das equações até aqui apresentadas, baseando-se na função positiva e o segundo método de estabilidade de Lyapunov é obtido a relação (1-D) do complementar da razão cíclica do conversor. O fluxograma para o *Backstepping* é semelhante ao SMC, bastando adicionar os blocos das equações (19), (20) e (1-D).

## V. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Neste tópico do trabalho são apresentados os resultados da simulação de um sistema solar fotovoltaico para validação comparativa entre três métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Os algoritmos de MPPT estudados neste trabalho são testados e validados usando o software Matlab/Simulink. O tempo de simulação padronizado foi de 0,5s para todas as análises. Inicialmente são demonstrados os valores para as variáveis de entrada no painel solar, em seguida os valores de tensão e potência gerada em cada uma das técnicas.

Para a simulação foram usados dois módulos do tipo Kyocera KD210GX-LPU, com características mostradas na Tabela 1, as curvas características (I-V) e (P-V) para cada modulo isolado são apresentadas na Figura 3, na simulação os módulos são ligados em paralelo. Os valores de irradiação e temperatura usados são demonstrados na Figura 7, pode se observar que foi usado entradas do tipo degrau para cada uma dessas variáveis. Vale destacar na Figura 7 que nas curvas de radiação a curva em azul representa um painel com dois intervalos de sombreamento, apresentando assim uma irradiação menor que o painel em vermelho sem sombreamento em todo o período de simulação. Com os três algoritmos

projetados foi realizada uma simulação para cada um deles, mantendo as mesmas condições de variação de irradiação e temperatura.

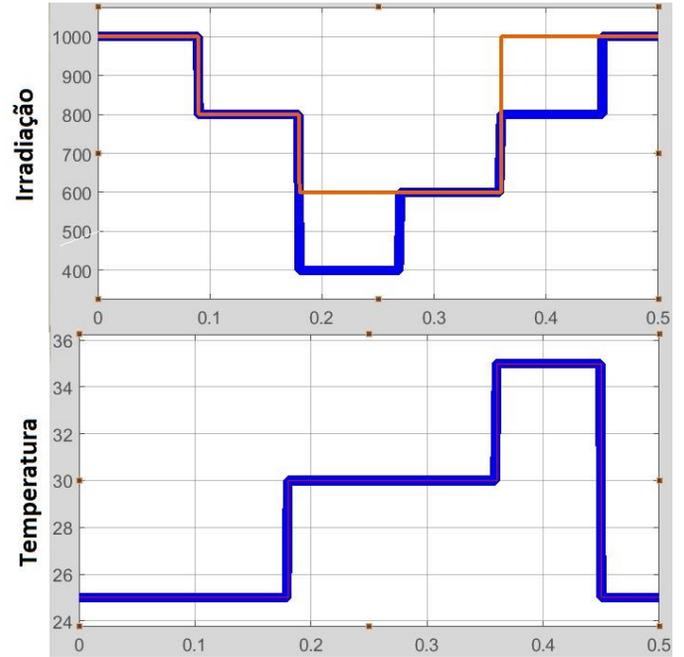


Fig. 7. Variação de irradiação e temperatura dos painéis solares: azul painel1 sombreado, vermelho painel2.

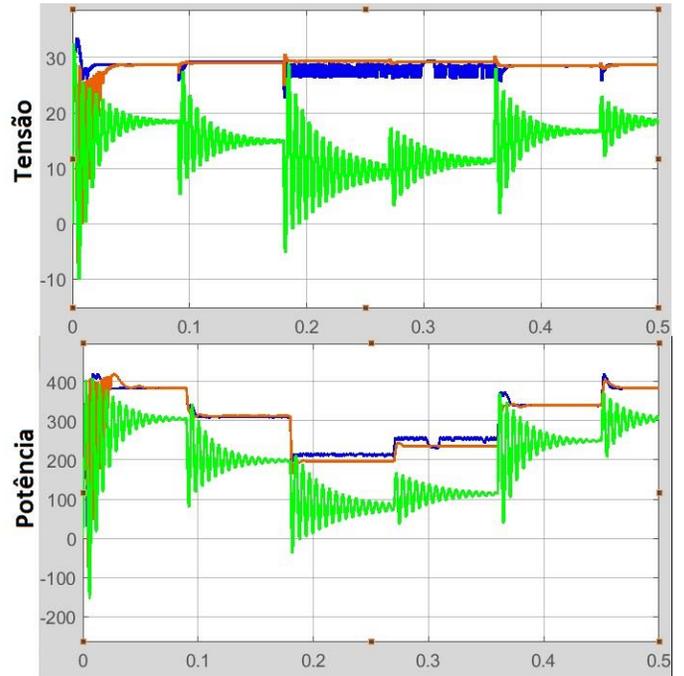


Fig. 8. Tensão e potência na entrada do conversor boost: verde - P&O, azul - SMC, vermelho - Backstepping.

Nas imagens apresentada na Figura 8 as curvas em azul, vermelho e verde representam os controles SMC, BCK e P&O respectivamente. Através da comparação das curvas de tensões da Figura podemos observar que o valor da tensão para o P&O

leva mais tempo para poder se estabilizar para cada variação de condição ambiental. O controle BCK tem a melhor estabilidade para os valores de tensão em todo período simulado, o SMC demonstra uma instabilidade no intervalo de 0,18 – 0,36s com ondulação nos níveis de tensão, este instante de tempo tem-se o os menores níveis de irradiação solar.

Observando as curvas de potências Figura 8 é possível verificar que a técnica P&O não atinge o ponto de máxima potência em toda a simulação. É observado também que a potência do SMC em todo período é maior que a técnica P&O. A potência do controle BCK é menor que a do SMC no intervalo de 0,18 – 0,36s, entretanto neste intervalo o SMC apresenta uma instabilidade na potência com Spike de queda na potência e com níveis de ondulações maiores do que apresentado no BCK.

Outro ponto a ser analisado em cada uma das técnicas é o tempo de resposta em níveis de potência para cada variação ambiental. O tempo de resposta é muito mais rápido com as técnicas BCK e SMC comparadas ao P&O. Entre as três, o controle BCK é o mais rápido para atingir o MPPT. Um ponto a se destacar é o instante mais crítico de alcance de máxima potência no intervalo de 0,18 – 0,45s, neste momento a temperatura está em seu valor mais elevado, saindo do valor de 25°C para o valor de 35°C e 36°C seguidos, e neste intervalo a irradiação apresenta os pontos de sombreamento em um dos painéis, e como já referido no intervalo 0,18 – 0,36s a irradiação tem seus valores mínimo, mesmo nesta situação as técnicas BCK e SMC mantiveram um bom controle de potência, onde houve uma alternância de melhor desempenho entre as duas.

Outro ponto a se destacar é a qualidade do sinal (*overshoot*) das técnicas em caso de diminuição ou aumento repentino da irradiação, onde o controle BCK teve a melhor resposta, SMC controle a segunda melhor, e o P&O com pior resultado.

## VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem de um sistema fotovoltaico, inicialmente foi modelado um painel solar, em seguida a modelagem do conversor boost, e por fim a modelagem de três algoritmos de MPPT para ser feita a comparação do rendimento das técnicas. Os métodos comparados foram o perturba e observa P&O e o módulo deslizante (*Sliding Mode Control – SMC*) e o *Backstepping*.

Na comparação pode ser observada que os dois métodos fizeram o rastreamento de máxima potência, porém com características próprias de cada técnica. O P&O apresenta muita oscilação, com valores maiores do que no SMC e *Backstepping* em todo o período onde se tem variações de temperatura e irradiação, entretanto no instante final de variação ambiental o P&O apresenta maior estabilidade no sinal da tensão e por consequência de potência entregue, contudo não atinge o ponto de máxima potência.

O SMC e *Backstepping* atingem o valor de MPPT em período. Outra vantagem observada nestas duas técnicas em relação ao P&O é da resposta às variações repentinas de irradiação (*overshoot*), o *Backstepping* demonstra maior

precisão de rastreamento e maior velocidade no tempo de resposta comparada as outras duas técnicas.

Com base na simulação desenvolvida no Simulink, a resposta da potência de saída do painel solar foi melhor desenvolvida pelas técnicas SMC e *Backstepping*, onde estes controladores apresentaram melhor eficiência global do sistema, e comparando os dois o *Backstepping* apresenta maior velocidade para atingir a estabilidade.

## REFERENCES

- [1] Brasil, Ministério de Minas e Energia, Resenha Energética Brasileira 2018, Ano base 2017 / Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – Departamento de Informações e Estudos Energéticos. Brasília: MME, 2018.
- [2] Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017.
- [3] Valencia, P., Ramos-Paja, C., “Sliding-Mode Controller for Maximum Power Point Tracing in Grid-Connected Photovoltaic Systems” in *Energies* 2015, 8, 12363-12387. Doi: 10.3390/en8112318, 2015.
- [4] Martin, A. D., Vazquez, J. R., “MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls.” In 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Doi:10.1109/icit.2015.7125517, 2015.
- [5] Khateb, A. E., Rahim, N. A., Selvaraj, J. and Uddin, M. N. (2014). Fuzzy-logic-controllerbased SEPIC converter for maximum power point tracking, *IEEE Transactions on Industry Applications* 50(4): 2349-2358.
- [6] M. Lasheen, A. K. Abdel Rahman, M. Abdel-Salam and S. Ookawara, “Adaptive reference voltage-based MPPT technique for PV applications,” in *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 5, pp. 715-722, 4 12 2017.
- [7] Jyothy, L.P., Sindhu, M. R., “An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm For Solar PV System.” In 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), doi: 10.1109/ices.2018.8443277, 2018.
- [8] Qi, J.; Zhang, Y.; Chen, Y. Modelling and maximum power point tracking (MPPT) method for PV array under partial shade conditions. *Renew. Energy* 2014, 66, 337–345. 2014.
- [9] Zhang, F.; Maddy, J.; Premier, G.; Guwy, A. Novel current sensing photovoltaic maximum power point tracking based on sliding mode control strategy. *Sol. Energy* 2014, 118, 80–86.
- [10] BARBI, I. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. 2006. INEP - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [11] Spelta, M. J. M. Busca Extremal Utilizando Controle por Modos Deslizantes Aplicada à Geração de Energia Através de Módulos Fotovoltaicos. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- [12] MELLO, V.A. Inversores monofásicos de corrente com controle por modo deslizante. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, p.127. 1998.
- [13] El Fadil, H., Giri, F.: Backstepping based control of PWM DC-DC boost power converters. *IEEE* (2007) .
- [14] H. Abouobaida, M. Cherkaoui and M. Ouassaid, “Robust maximum power point tracking for photovoltaic cells: A backstepping mode control approach”, *Proc. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, ICMCS-2011*, 1-4, 2011.
- [15] Roy, T.K., Morshed, M., Tumpa, F.K., Pervej, M.F.: Robust adaptive backstepping speed controller design for a series DC motor. In: 2015 International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), BUET, Dhaka, Bangladesh, 19–20 December 2015.