

# CONTROLE DIGITAL BACKSTEPPING PARA SPMP APLICADO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO

**Robson Taveira Gonçalves da Silva** (UFC) - robsontaveira1@gmail.com

**Caio Kerson Oliveira Veras** (UFC) - caiokerson@dee.ufc.br

**Marcus Vinicius Silvério Costa** (UFERSA) - marcus.costa@ufersa.edu.br

**Antônio Alisson Alencar Freitas** (Ufersa) - alisson.freitas@ufersa.edu.br

**Fernando Luiz Marcelo Antunes** (UFC) - fantunes@dee.ufc.br

## **Resumo:**

*A energia solar pode ser transformada em energia elétrica com o uso de sistemas fotovoltaicos, entretanto a eficiência desta conversão nestes sistemas depende, em grande parte, de condições ambientais, como a variação da irradiação e temperatura ambiente. Portanto este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo, através de simulação computacional, para o seguimento dos pontos de máxima de potência - SPMP (Maximum Power Point Tracking - MPPT) em um sistema fotovoltaico (SFV) em diferentes condições ambientais. Os sistemas fotovoltaicos são formados por módulos fotovoltaicos e um ou mais conversores estáticos C.C. - C.C. e/ou C.C. - C.A. entre outros componentes. Neste trabalho, um conversor estático de alto ganho de tensão é usado para elevar a tensão do sistema com valor próximo de 26V para um nível adequado de uma nano rede de 380V, com este conversor são realizados testes do algoritmo de SPMP proposto. O algoritmo utilizado é baseado no método de controle digital Backstepping; esta técnica possui a característica de um controle não linear robusto que garante a estabilidade do sistema usando as equações de Lyapunov. Com base na simulação desenvolvida o método Backstepping de controle apresentou desempenho satisfatório, com rápida resposta aos transientes de potência, e a potência extraída sistema com valores muito próximos dos valores de máxima potência teóricos para o módulo fotovoltaico, apresentando o valor de 227,13 W extraídos de um valor máximo teórico de 227,62 W para de irradiação 1000 W/m<sup>2</sup>, e obtendo 39,45 W extraídos de 44,2 W máximo teórico para 200 W/m<sup>2</sup>.*

**Palavras-chave:** *Sistemas Fotovoltaicos, SPMP, Backstepping.*

**Área temática:** *Conversão Fotovoltaica*

**Subárea temática:** *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

## CONTROLE DIGITAL BACKSTEPPING PARA SPMP APLICADO EM SISTEMA FOTOVOLTAICO

**Robson Taveira Gonçalves da Silva** – robsontaveira1@gmail.com

**Caio Kerson Oliveira Veras** - caiokerson@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica.

**Marcus Vinicius Silverio Costa** - marcus.costa@ufersa.edu.br

**Antônio Alisson Alencar Freitas** – alisson.freitas@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia Elétrica.

**Fernando L. M. Antunes** – fantunes@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica.

**Resumo.** A energia solar pode ser transformada em energia elétrica com o uso de sistemas fotovoltaicos, entretanto a eficiência desta conversão nestes sistemas depende, em grande parte, de condições ambientais, como a variação da irradiação e temperatura ambiente. Portanto este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo, através de simulação computacional, para o seguimento dos pontos de máxima de potência - SPMP (Maximum Power Point Tracking - MPPT) em um sistema fotovoltaico (SFV) em diferentes condições ambientais. Os sistemas fotovoltaicos são formados por módulos fotovoltaicos e um ou mais conversores estáticos C.C. – C.C. e/ou C.C. – C.A. entre outros componentes. Neste trabalho, um conversor estático de alto ganho de tensão é usado para elevar a tensão do sistema com valor próximo de 26V para um nível adequado de uma nano rede de 380V, com este conversor são realizados testes do algoritmo de SPMP proposto. O algoritmo utilizado é baseado no método de controle digital Backstepping; esta técnica possui a característica de um controle não linear robusto que garante a estabilidade do sistema usando as equações de Lyapunov. Com base na simulação desenvolvida o método Backstepping de controle apresentou desempenho satisfatório, com rápida resposta aos transientes de potência, e a potência extraída sistema com valores muito próximos dos valores de máxima potência teóricos para o módulo fotovoltaico, apresentando o valor de 227,13 W extraídos de um valor máximo teórico de 227,62 W para de irradiação 1000 W/m<sup>2</sup>, e obtendo 39,45 W extraídos de 44,2 W máximo teórico para 200 W/m<sup>2</sup>.

**Palavras-chave:** Sistemas Fotovoltaicos, SPMP, Backstepping.

### 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história a espécie humana fez uso da energia para sobreviver e evoluir, descobrindo novas fontes e maneiras alternativas de tratamento energético para adaptar-se ao ambiente em que vive, assim atendendo as próprias necessidades. Em termos de suprimento energético, a eletricidade se apresenta como uma das formas mais versáteis e convenientes de energia, de forma que a habilidade de processar e controlar a mesma torna esta, um recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de muitos povos, países e regiões (Bezerra, 2010).

Atualmente, além da busca pelo desenvolvimento sustentável, há uma pressão crescente por uma mudança no consumo e na produção de padrões de energia no Brasil. Nesse cenário, a produção de energia através de fontes renováveis de energia vem ganhando maior relevância. Com o intuito de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, e assim reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Rocha et al., 2017).

Analisando a produção da energia elétrica no Brasil no ano de 2017, 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 com 619,7TWh, de acordo com o trabalho em (Ministério de Minas e Energias, 2018) as principais fontes de energias renováveis são formadas por Hidráulica, Etanol, Bagaço, Lenha, Carvão Vegetal, Biodiesel, Eólica e Solar. Neste mesmo trabalho é observado que em 2017 foi demonstrando na Oferta Interna de Energia (OIE) uma taxa de 43,2% da participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira, onde a média mundial são 13,8%. Para o mesmo ano a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), ficou em 624,3 TWh, montante de 0,7% superior ao ano de 2016 (619,7 TWh), as fontes renováveis chegaram a 80,4% na matriz OIEE. Dentre estas fontes, neste período, a Hidráulica teve uma queda de oferta (-2,6%) com uma produção de 380.911 – 370.906 GWh, temos como destaques os aumentos na oferta por eólica (26,5%) com 35.236 – 35.655 GWh, e na fonte solar (832%) com oferta de 85 – 832 GWh.

O Plano Decenal do governo brasileiro, de 2017 a 2026, apresentado em (Ministério de Minas e Energia, 2017) demonstra que a parcela renovável da matriz energética no Brasil 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. Além disso, é observado o efeito da mudança de relação do consumidor com a energia nos últimos anos. O aumento do poder de escolha – uma tendência geral na sociedade – tem se materializado no setor de eletricidade através da popularização das tecnologias de

micro e mini geração distribuída. O consumidor, podendo gerar sua própria energia, evolui de uma posição passiva para ativa no setor elétrico.

As principais vantagens de energia solar fotovoltaica são: não contribuem para as mudanças globais do clima, com os painéis fotovoltaicos não gerando resíduos; os módulos fotovoltaicos apresentam vida útil elevada, pois não apresenta partes móveis que geram desgastes, podendo chegar a 30 anos de operação; a energia do Sol é abundante e gratuita; os sistemas fotovoltaicos têm estrutura modular, ou seja, o sistema pode ser ampliado e adaptado facilmente (Luque, 2011).

De acordo com o apresentado, a geração de energia elétrica no Brasil é predominante formado por fontes renováveis. Porém a geração de energia elétrica no país se encontra distantes de seu consumo, desta forma têm-se perdas na transmissão e distribuição desta energia, que no Brasil em 2016 foi equivalente a 16,1 % (incluindo perdas técnicas e não técnicas). Por outro lado, com a geração próxima aos locais de consumo uma redução nas perdas pode ser obtida. Acrescentando a este fato, o tempo de implantação das tecnologias que normalmente são utilizadas para geração (centrais fotovoltaicas, centrais termoeletricas e termoeletricas, etc) é reduzido, comparado com a Geração Centralizada (GC). Deste modo, uma nova concepção vem surgindo, baseada na geração distribuída (GD), (Ministério de Minas e Energias, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) podem ser centralizados ou descentralizados. A Agência Nacional Energia Elétrica (ANEEL) define, na REN 687/2015, que esses sistemas podem ser classificados em duas categorias; Microgeração: potência instalada até 75 kW; e Minigeração: potência instalada entre 75 kW e 5 MW. (ANEEL, 2015):

Já os sistemas fotovoltaicos aplicados em ambiente residenciais são conectados em nano redes do tipo corrente contínua – C.C. ou corrente alternada – A.C. Para nano redes C.C., se faz necessário a implementação de um conversor C.C. – C.C. com alto ganho estático de tensão para conectar o gerador fotovoltaico de baixa tensão, com valor típico de 20Vcc a 30Vcc, em um barramento principal com 380 Vcc, este valor de barramento C.C. já é amplamente usado para conectar infraestruturas (YUE et al., 2018). Para sistemas de nano redes A.C., um inversor é requerido para conectá-lo a uma micro rede ou mesmo diretamente à rede elétrica (Ganesan et al., 2015).

Conversores C.C. – C.C. isolados e não isolados estão comumente presentes em nano redes CC interligando diferentes fontes de geração com o barramento principal (Cheng; Lu; Qin, 2018). Na literatura existem várias topologias de conversores C.C. – C.C. com altos ganhos de tensão, alguns autores usam topologias de multiplicação de tensão ou células modulares, que podem ser conectadas em cascata para obter um alto ganho de saída (Kang; Cha, 2018). As topologias encontradas que usam indutores acoplados são muito recorrentes na literatura, dentre elas é muito comum o uso de dois ou três indutores acoplados para fornecer tensão mais alta na saída (Ardi; Ajami; Sabahi, 2018). Outra maneira de obter um alto ganho estático é o uso de topologias intercaladas ou comutação de conversores seriais e paralelos (Salvador; Lazzarin; Coelho, 2018).

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) apresentam uma característica não linear que exibe uma variedade de comportamentos associados a variação climática, devido as mudanças na irradiação dos raios solares do recurso solar e da temperatura ambiente ocasionando uma variação na tensão e corrente de saída do SFV. Para se obter o controle deste sistema é necessário o uso de métodos apropriados, geralmente do controle conhecido como algoritmos de Seguimento do Ponto de Máxima Potência – SPMP ou, do inglês, *Maximum Power Point Tracking* - MPPT, são usados para manter a potência de saída no valor máxima possível e estável, mesmo durante o comportamento variável da radiação solar (Lasheen et al., 2017).

Com objetivo de tratar os fenômenos não-lineares destacados e atingir a estabilidade do sistema com o SPMP, muitas abordagens são propostas na literatura, como as técnicas de lógica Fuzzy (Lasheen et al., 2017), rede neural (Jyothy; Sindhu, 2018), perturba e observa P&O e *Backstepping* (Khateb et al., 2014). Como pode ser observado, vários tipos de soluções SPMP 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 (Qi; Zhang; Chen, 2014).

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 complexos; 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 (El Fadil; Giri, 2007). Essa técnica de controle tem sido relatada na literatura (Abouobaida et al., 2011) 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 (Roy et al., 2015) e sua notável capacidade de lidar com fenômenos não-lineares complexos.

Portanto, este trabalho propõe um sistema fotovoltaico composto por uma estrutura de um módulo fotovoltaico conectado em um conversor C.C. – C.C. de alto ganho, com indutor acoplado e saída em corrente com objetivo de injetar corrente em um barramento C.C. – C.C. Para o controle do conversor é feito uso de um controle digital para o SPMP, este controle é baseado no método *Backstepping*. Ao final do trabalho se pretende observa a resposta aos transientes de potência, a eficiência do sistema no seguimento dos pontos de máxima potência, e a qualidade do sinal de corrente entregue no barramento CC.

## 2. MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos são formados por conexões série/paralelo de células solares, as curvas de tensão-corrente (V-I) do módulo fotovoltaico é uma característica importante do mesmo, por meio destas curvas é possível modelar um circuito elétrico equivalente do módulo fotovoltaico. Os modelos podem ser de dois tipos principais; os modelos de diodo único, e os modelos de diodo duplo. Os de diodos duplos apresenta precisão maior que o de único diodo, no entanto, apresenta uma baixa velocidade na simulação computacional, pois é relativamente complexo. Assim, o modelo de diodo único é os mais comumente usados em estudos de simulação de eletrônica de potência, porque oferece compensação razoável entre precisão e simplicidade (Valencia, 2105).

Neste trabalho a modelagem do módulo fotovoltaico foi realizado tendo por base um bloco *Solar Module* (*physical* model), já disponível para uso no software PSIM, neste bloco a modelagem do circuito equivalente para a célula solar, é do tipo com um diodo, o circuito é formado por uma estrutura paralela de uma fonte de corrente ( $I_L$ ), resistor shunt ( $R_{sh}$ ) e diodo ( $I_d$ ), seguido por um resistor série ( $R_s$ ). O circuito equivalente pode ser observado na Fig. 1.

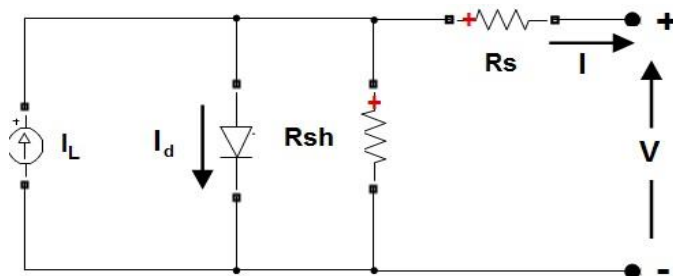


Figura 1 – Circuito de modelo de um diodo de célula solar.

As principais equações relacionada a modelagem do módulo fotovoltaico podem são relacionadas ao fluxo de corrente no circuito equivalente para célula solar, a Eq. (1) relaciona a corrente de saída da célula solar, na Eq. (2) é modelada a fonte de corrente, na Eq. (3) tem-se o dimensionamento da corrente do indutor paralelo a fonte de corrente, e por fim na Eq. (4) é apresentado a equação do resistor *shunt*.

$$I = I_L - I_d - I_{rsh} \quad (1)$$

$$I_L = I_{sco} \cdot \left( \frac{S}{S_0} \right) + C_t \cdot (T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_d = I_0 \cdot \left( e^{\frac{qV_d}{AKT}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_{rsh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (4)$$

Onde:

$I$  – Corrente se saída da célula solar;

$I_L$  - Corrente da fonte de corrente

$I_d$  – Corrente do diodo;

$I_{rsh}$  - Corrente do resistor *shunt*;

$I_{sco}$  – Corrente de curto circuito;

$S$  – Irradiância incidente na entrada do módulo;

$S_0$  – Irradiância incidente com referência de 1000 W/m<sup>2</sup>;

$C_t$  – Coeficiente de temperatura;

$T$  – Temperatura na entrada do módulo;

$T_{ref}$  – Temperatura de referência 25°C;

$q$  – Carga do elétron (1,6.10<sup>-19</sup>);

$A$  – Fator de idealidade;

$K$  – Constante de Boltzmann (1,38.10<sup>-23</sup>);

$N_s$  – Numero de células solares por módulo.

## 3. CONVERSOR C.C. – C.C.

O conversor de alto ganho usado para testar o algoritmo SPMP é apresentado neste tópico. Essa topologia foi proposta em (Araújo et al., 2017) para aplicação em sistemas fotovoltaicos com injeção de corrente no barramento CC. O conversor é conectado à saída do sistema fotovoltaico, com o objetivo de ajustar o nível de tensão para a aplicação do sistema em uma nano rede.

A Figura 2 mostra o módulo fotovoltaico conectado ao conversor em um barramento C.C., neste barramento está presente o capacitor C1. A saída do conversor de alto ganho é conectada a uma fonte de tensão  $V_o$ . Onde  $V_o$  é a tensão imposta pela nano rede. Em LM é dada a indutância de magnetização, nesta aplicação a equação da corrente correspondente a LM, que será controlada para o SPMP.

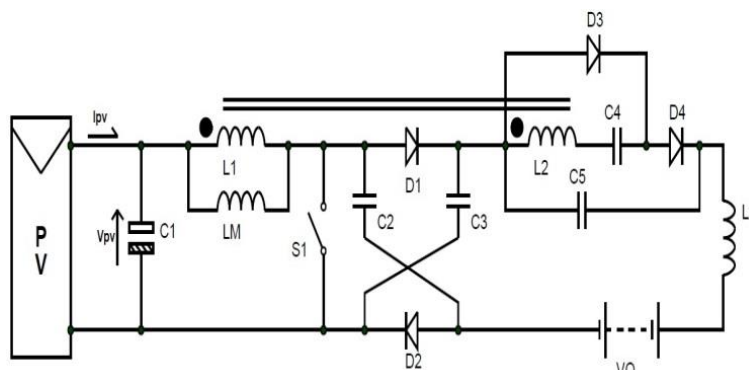


Figura 2 – Conversor de alto ganho conectado a módulo solar.

O funcionamento do conversor pode ser analisado pelo comportamento das duas células de elevação *Step-up*, a primeira formada com os capacitores C2 e C3 e a segunda célula com os capacitores C4 e C5. Para um melhor entendimento do conversor sua operação pode ser dividida em quatro etapas.

A primeira etapa é iniciada com o acionamento da chave ativa S1, os diodos D1, D2 e D4 estão inversamente polarizados. O indutor L1 armazena energia fornecida pela fonte  $V_i$ , o indutor L3 armazena energia e o indutor L2 fornece energia para a saída. O capacitor C4 é carregado pela energia passante no diodo D3 que se apresenta diretamente polarizado, os capacitores C2, C3 e C5 estão fornecendo energia para a saída. Esta etapa é finalizada com o desligamento da chave S1.

Na segunda etapa a chave S1 é comandada a desligar, os capacitores C2 e C3 são carregados com energia do indutor L1 por meio dos diodos D1 e D2 que estão diretamente polarizados. Os capacitores C4 e C5 são descarregados. O diodo D4 é diretamente polarizado e o diodo D3 fica inversamente polarizado. Os indutores L1 e L3 fornecem energia e o L2 armazena energia. A terceira etapa é semelhante a segunda tendo como alteração que o capacitor C5 passa a ser carregado, e a terceira etapa é finalizada com o bloqueio dos diodos D1 e D2.

Na quarta etapa a chave S1 permanece desligada, os capacitores C2 e C3 começam a descarregar e o capacitor C5 continua carregando. O diodo D3 encontra-se inversamente polarizado e o diodo D4 diretamente polarizado carregando o capacitor C5 com uma parcela de energia armazenada na indutância de magnetização. A etapa termina quando a chave S1 é comandada a ligar. Para mais informações sobre as etapas de trabalho e as equações do conversor de cada etapa de trabalho e do ganho estático, consultar o trabalho (Araújo et al., 2017).

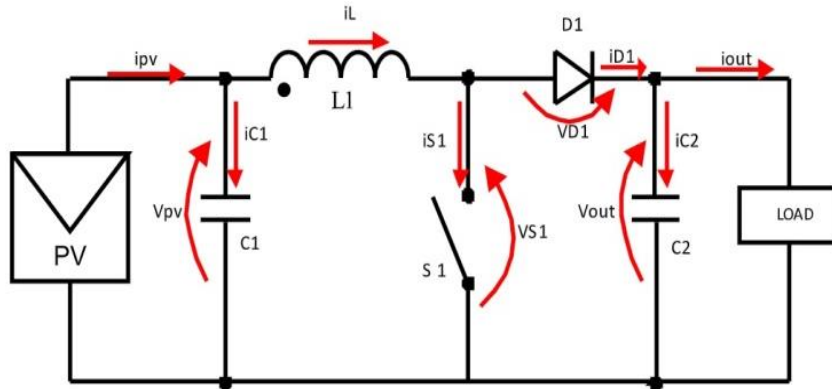
#### 4. CONTROLE BACKSTEPPING PROPOSTO.

A principal ideia do método *Backstepping* é projetar um controlador recursivamente, considerando algumas das variáveis de estado como controles virtuais (*virtual controls*) e projetando para elas leis de controle intermediárias. A estabilidade é garantida através das funções Lyapunov.

A proposta deste trabalho é apresentar uma das vantagens do uso desse método, que é poder desenvolver o controle a partir de um conversor *Boost* clássico, na ideia de que o ponto de máxima potência (*Maximum Power Point - MPP*) esteja relacionado à corrente no indutor de entrada, de um conversor com entrada característica *Boost*, onde no conversor usado para teste neste trabalho é representado pela passagem de corrente através do indutor acoplado L1 e L2, representada pela indutância de magnetização em LM, como a apresentado na Fig. 2.

Outra vantagem da técnica escolhida para o Seguimento do Ponto de Máxima Potência – SPMP está relacionada a evitar o máximo local de potência, muito comum em técnicas mais simples como o perturba e observa (P&O), com o método *Backstepping*, se tem o máximo global.

Na Fig. 3 é apresentado um sistema fotovoltaico, neste sistema pode ser observado um capacitor C1 conectado no barramento CC, entre o módulo fotovoltaico e a entrada do conversor *Boost*, este capacitor é importante, pois o módulo fotovoltaico e o indutor L1 tem característica de fonte de corrente, sabendo que não é recomendável conectar mais de uma fonte de corrente em série, este capacitor faz a conexão dos dois elementos. Na imagem observamos também os fluxos de corrente e de tensão do circuito.

Figura 3 – Modelo de sistema fotovoltaico conectado a conversor *Boost*.

É importante notar que, para a estratégia de controle mostrada neste trabalho, a entrada do conversor de alto ganho e a do *Boost* clássico tem as mesmas características, por a apresenta uma indutância na entrada, assim o controle atua no fluxo da corrente de indutância. Assim a ideia do algoritmo proposto neste trabalho, é que ele pode ser usado em outro conversor CC que tenha característica de entrada *Boost*, ou seja, com um indutor em sua entrada, onde a corrente nesse indutor será controlada.

O primeiro passo do controle é obter a tensão de referência  $V_{PVref}$ . Para isso vamos iniciar a análise com o objetivo do controle SPMP apresentado na Eq. (5).

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = 0 \quad (5)$$

Sabendo que a potência do módulo fotovoltaico é dada pela Eq. (6):

$$P_{pv} = v_{pv} * i_{pv} \quad (6)$$

Substituindo Eq. (6) na Eq. (5), temos a Eq. (7):

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = \frac{d(v_{pv} * i_{pv})}{dv_{pv}} = 0 \quad (7)$$

Resolvendo Eq. (7) para  $v_{pv}$ , e fazendo  $v_{pv} = V_{PVref}$  temos a Eq. (8):

$$v_{pvref} = -i_{pv} * \frac{dv_{pv}}{di_{pv}} \quad (8)$$

A equação do erro da tensão do módulo fotovoltaico  $e_{v_{pv}}$  é apresentada em (9), onde é feita a subtração da tensão de referência  $V_{PVref}$  com o sinal de tensão  $V_{pv}$  lido no capacitor C1, por um sensor de tensão no circuito:

$$e_{v_{pv}} = V_{pvref} - V_{pv} \quad (9)$$

Fazendo a análise do circuito na Fig. 3, é possível obter a seguinte relação de equações apresentada em Eq. (10):

$$\begin{cases} \frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{i_{pv} - i_L}{C1} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{out}(1-D)}{L1} \end{cases} \quad (10)$$

Desenvolvendo análises matemáticas das equações até aqui apresentadas, baseando-se na função positiva e o segundo método de estabilidade de Lyapunov é obtido à relação (1-D) do complementar da razão cíclica do conversor na Eq. (11).

$$(1 - D) = \frac{L1}{v_{out}} \left\{ -k_I e_{iL} + \left( \frac{e_{v_{pv}}}{C1} \right) - C1 \left[ -k_I e_{v_{pv}} - k_v \left( -k_I e_i - k_v e_{v_{pv}} - \left( \frac{e_{iL}}{C1} \right) \right) + \left( \frac{d^2 v_{pvref}}{dt^2} \right) - \frac{di_{pv}}{dt} \right] + \frac{v_{pv}}{v_{out}} \right\} \quad (11)$$

Onde:

$k_I$  - Ganho de corrente ( $k_I > 0$ );

$k_v$  - Ganho de tensão ( $k_v > 0$ );

$e_{iL}$  - erro da corrente do indutor.

## 5. SIMULAÇÕES

Para visualizar a resposta do sistema, todas as simulações foram feitas no software dedicado PSIM versão 9.1. Três valores de irradiância foram utilizados para observar como o conversor se comporta em resposta às oscilações na irradiância. Na Fig. 4 são mostrados os três valores de irradiância, distribuídos em quatro períodos diferentes, no período inicial um valor de  $1000 \text{ W/m}^2$ , depois executados duas quedas na irradiância com valor de  $400 \text{ W/m}^2$ , assim temos o valor de  $600 \text{ W/m}^2$  seguido por um valor de  $200 \text{ W/m}^2$ , e no final do período de simulação é retornado ao valor inicial de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Um ponto a ser observado é que cada variação de irradiância leva 10ms, o período total simulado foi de 500ms, e a temperatura do módulo fotovoltaico padronizada em  $25^\circ\text{C}$ .

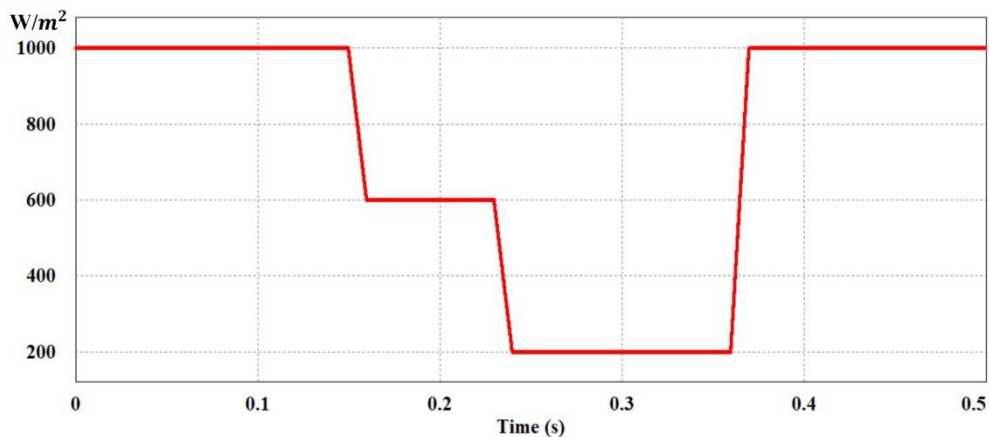


Figura 4 – Variação de Irradiância, temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$ .

Primeiramente é realizada a análise da potência no barramento C.C. – C.C. que conecta o módulo solar com o conversor de alto ganho para identificar se o algoritmo realizou o rastreamento do ponto de máxima potência. Para esse propósito é observado na Fig. 5 em vermelho ( $P_{mpp}$ ) o sinal do ponto de máxima potência teórico para o módulo fotovoltaico, em azul ( $P_{in}$ ) o sinal da potência extraída do módulo com uso da técnica Backstepping. Na imagem observa-se que a potência extraída foi muito próxima do valor de máxima potência do sistema, no primeiro ponto de ampliação da imagem temos os seguintes valores médios:  $P_{mpp}$  com 227,62 W e  $P_{in}$  com 227,13W. No segundo ponto de ampliação temos a região com menor incidência de irradiância mudando para o maior valor, com essa imagem podemos observar a velocidade de resposta do controle aos transientes de potência, e os valores médios na região de menor irradiância são:  $P_{mpp}$  com 44,2 W e  $P_{in}$  com 39,45W.

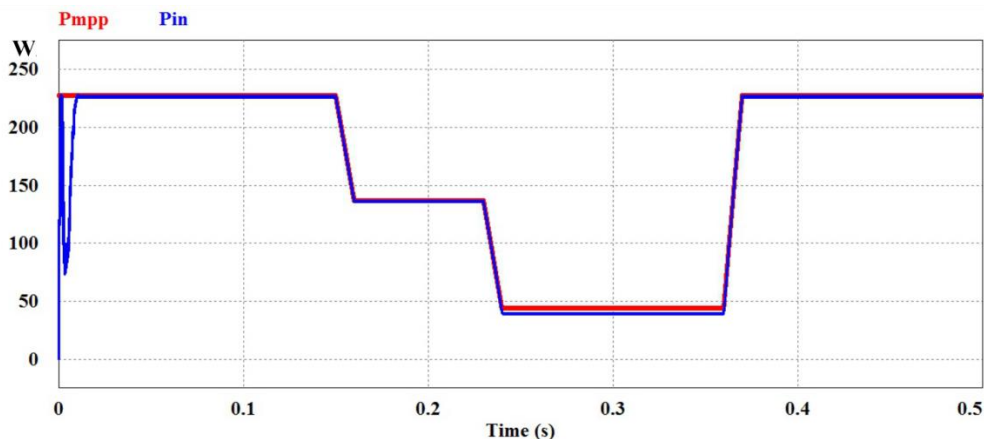
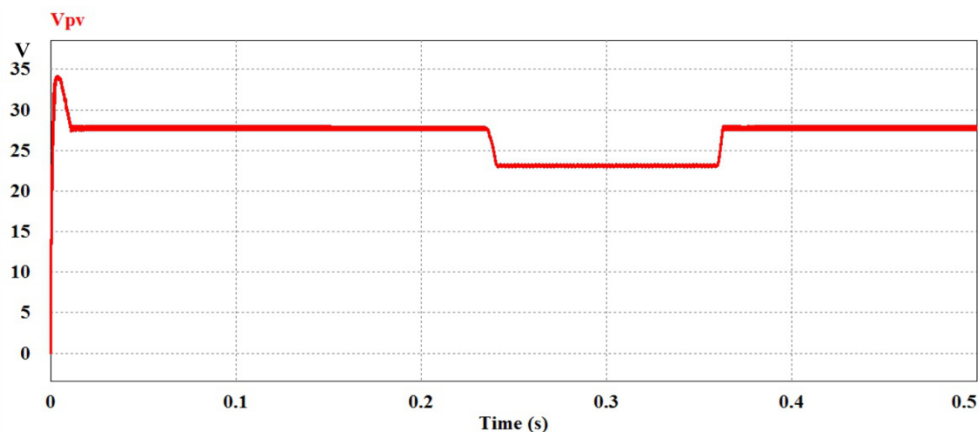
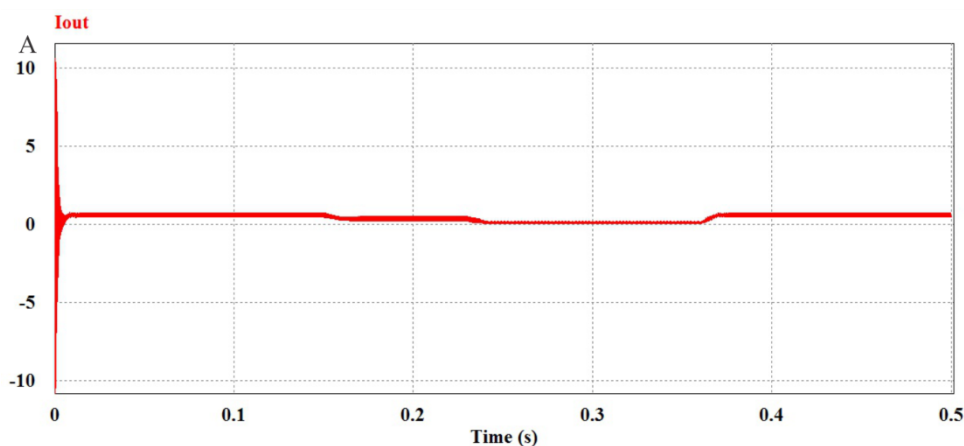


Figura 5 – Potência de entrada ( $P_{in}$ ) em azul, potência de MPP teórico ( $P_{mpp}$ ) em vermelho.

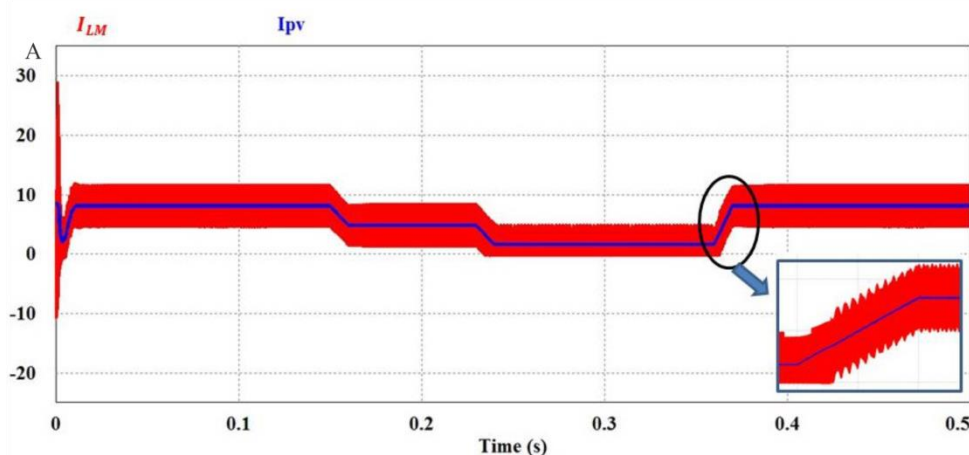
A segunda análise é feita em relação às tensões do sistema, na Fig. 6 é apresentado à tensão extraída do módulo solar ( $V_{pv}$ ) que se apresenta praticamente constante em todo período simulando, tendo maior variação no momento de menor irradiância do sistema com uma queda na tensão de um valor médio de 27,7 V para 23,1 V. No ponto de ampliação da imagem pode ser observada a ondulação do sinal de tensão variando do valor máximo de 27,9 V e valor mínimo de 27,5 V apresentando um baixo valor de 500 mV. A tensão de saída do sistema se mantém em 380 V, este valor é mantido pela fonte  $V_o$  do barramento C.C. – C.C. na saída do conversor como apresentado na Fig. 2.

Figura 6 – Tensão do módulo solar ( $V_{pv}$ ).

Outra curva a ser analisada é a da corrente do barramento CC da saída do conversor de alto ganho ( $I_{out}$ ) apresentada na Fig. 7, após o período de estabilização inicial essa corrente apresenta o valor médio de 595, 360 e 106 mA para as irradiâncias de 1000, 600 e 200  $W/m^2$  respectivamente. Com a ampliação da imagem pode ser observado a ondulação do sinal com valor máximo de 735 mA e valor mínimo de 447 mA para a irradiância 1000  $W/m^2$ , apresentando uma variação de 288 mA.

Figura 7 – Corrente de saída do conversor de alto ganho ( $I_{out}$ ).

Na Fig. 8 é apresentada a corrente de magnetização ( $I_{LM}$ ) em vermelho, e a corrente do módulo solar ( $I_{PV}$ ) em azul. Com a imagem é possível observar o comportamento das correntes com as variações de irradiância, em todo período simulado as duas correntes seguem juntas com a variação de irradiância. Como esperado com a queda de irradiância tem-se uma diminuição de corrente entregue do módulo fotovoltaico, diminuindo a corrente que flui no sistema, e com o aumento de irradiância tem-se o aumento do fluxo de corrente no sistema, assim tendo o aumento ou diminuição da corrente ( $I_{PV}$ ), e a corrente de magnetização ( $I_{LM}$ ) segue as variações apresentadas em ( $I_{PV}$ ).

Figura 8 - Corrente do módulo solar ( $I_{pv}$ ) em azul, e corrente de magnetização ( $I_{LM}$ ) em vermelho.



Com a Fig. 8 nota-se também que o sistema leva 12ms para estabilizar do valor de curto-circuito da corrente fotovoltaica para o valor SPMP inicial. Foi realizada uma ampliação no ponto de maior elevação de irradiância ( $200 - 1000 \text{ W/m}^2$ ) com esta imagem pode ser observada que a técnica de controle tem uma resposta rápida nos transientes de corrente, o tempo de estabilização para o novo valor SPMP foi de 10 ms.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem de um sistema fotovoltaico com possibilidade de aplicação em geração distribuída, inicialmente foi modelada a célula solar que compõe a estrutura do módulo solar aplicado, em seguida foi modelado um conversor de alto ganho com característica de saída em corrente, e por fim foi realizada a modelagem do método de controle *Backsetpping* com o objetivo de rastreamento do ponto de máxima potência do sistema.

O objetivo principal do trabalho foi alcançado mediante a comprovação da elevada eficiência do sistema com a aplicação do método de controle *Backsetpping* no seguimento dos pontos de máxima potência, e também pela demonstração da injeção de corrente elétrica no barramento CC de 380 V na saída do conversor de alto ganho, assim o sistema tem a possibilidade de atuar em uma aplicação de geração distribuída com alta eficiência.

Com base na simulação desenvolvida obteve-se como resposta na potência de saída do módulo fotovoltaico que o método de controle apresentou desempenho satisfatório com extração de potência muito próximo do valor teórico do módulo fotovoltaico simulado, foi apresentando o valor de 227,13 W extraídos de um valor máximo teórico de 227,62 W para de irradiância  $1000 \text{ W/m}^2$ , e obtendo 39,45 W extraídos de 44,2 W máximo teórico para  $200 \text{ W/m}^2$  ficando assim muito próximo do valor máximo de potência possível do sistema.

Com relação a qualidade dos sinais elétricos do sistema, estes apresentaram uma rápida resposta aos transientes e ondulação do sinal adequado, estas características beneficiam o sistema aumentando a vida útil dos elementos que integram o conversor de alto ganho como também as cargas e dispositivos eletrônicos conectados ao sistema por meio do barramento CC.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Ceará – UFC, Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, e ao Grupo de Processamento de Energia e Controle - GPEC pelo apoio dado ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- Abouobaida, H.; Cherkaoui, M.; Ouassaid, M. “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.
- Araújo, D. C., Vasconcelos, M. O., Aragao, F. A. P., de Souza, K. C. A., & As, E. M.,”High-gain DC-DC converter with current source characteristics at the output for applications in photovoltaic systems and current injection in nano grids,” in 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2017.
- Ardi, H.; Ajami, A.; Sabahi, M. “A Novel High Step-Up DC–DC Converter With Continuous Input Current Integrating Coupled Inductor for Renewable Energy Applications,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 2, pp. 1306–1315, Feb. 2018.
- Bezerra, L.D. Conversor de CC-CA para Aplicação em Sistemas Autônomos de Energia Elétrica, Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFC, Fevereiro, 2010.
- Brasil, Agência Nacional Energia Elétrica (ANEEL), RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 687, 2015.
- 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.
- 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.
- Cheng, T.; Lu, D. D. C.; Qin, L. “Non-Isolated Single-Inductor DC/DC Converter with Fully Reconfigurable Structure for Renewable Energy Applications,” IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs, vol. 65, no. 3, pp. 351–355, 2018.
- El Fadil, H.; Giri, F.: Backstepping based control of PWM DC-DC boost power converters. IEEE (2007) .

- Ganesan, S. I.; Pattabiraman, D.; Govindarajan, R. K.; Rajan, M.; Nagamani, C. "Control Scheme for a Bidirectional Converter in a Self-Sustaining Low-Voltage DC Nanogrid," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 10, pp. 6317–6326, Oct. 2015.
- 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.
- Kang, H.; Cha, H. "A new nonisolated high-voltage-gain boost converter with inherent output voltage balancing," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 3, pp. 2189–2198, 2018.
- Khateb, A. E.; Rahim; N. A.; Selvaraj, J.; Uddin, M. N. Fuzzy-logic-controllerbased SEPIC converter for maximum power point tracking, IEEE Transactions on Industry Applications. 2014.
- Lasheen, M.; Abdel, A. K. R.; Abdel-Salam, M; Ookawara, S. "Adaptive reference voltage-based MPPT technique for PV applications," in IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 5, pp. 715-722, 4 12. 2017.
- Luque, A., Hegedus, S. Handbook of Photovoltaic and Engineering. 2. Ed. United Kindom: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
- 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.
- Rocha, L. C. S.; Aquila, G.; Pamplona, E. de O.; Paiva, A. P.; Chierigatti, B. G.; Lima, J. de S. B. "Photovoltaic electricity production in Brazil: A stochastic economic viability analysis for small systems in the face of net metering and tax incentives," J. Clean. Prod., vol. 168, pp. 1448–1462, 2017.
- 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.
- Salvador, M. A.; Lazzarin, T. B.; Coelho, R. F. "High Step-Up DC-DC Converter with Active Switched-Inductor and Passive Switched-Capacitor Networks," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 7, pp. 5644–5654, 2018.
- 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/en81112318, 2015.
- Yue, X.; Boroyevich, D.; Lee, F. C.; Chen, F.; Burgos, R.; Zhuo, F. "Beat Frequency Oscillation Analysis for Power Electronic Converters in DC Nanogrid Based on Crossed Frequency Output Impedance Matrix Model," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 4, pp. 3052–3064, Apr. 2018.

## DIGITAL BACKSTEPPING CONTROL FOR SPMP APPLIED IN PHOTOVOLTAIC SYSTEM

**Abstract.** Solar energy can be transformed into electrical energy with the use of photovoltaic systems, but with the reduced reduction in these systems it depends, in large part, on environmental conditions, such as variations in irradiation and ambient temperature. Therefore, this work offers the development of an algorithm, through computer simulation, for the monitoring of the maximum power points - SPMP (MPPT) in the photovoltaic system (SFV) under different environmental conditions. Photovoltaic systems are formed by photovoltaic modules and one or more chemical converters C.C. - C.C. and / or C.C. - CA among other components. In this work, a high voltage gain static converter is used to raise the system voltage with a value close to 26V to an appropriate level of a 380V nano-network, with this converter tests of the analyzed SPMP algorithm are performed. The algorithm used is based on the digital control technique of Backstepping; this technique has a non-linear control feature that guarantees the stability of the system using the Lyapunov equations. Based on the simulation developed, the Backstepping method of control showed satisfactory performance, with rapid response to power transients, and the power extracted from the system with values very close to the values of maximum theoretical power for the photovoltaic module, presenting the value of 227.13 W extracted from a maximum theoretical value of 227.62 W for irradiance  $1000 \text{ W / m}^2$ , and obtaining 39.45 W extracted from 44.2W theoretical maximum for  $200 \text{ W / m}^2$ .

**Key words:** Photovoltaic Systems, SPMP, Backstepping.