

ALGORITMO DE SEGUIMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA GLOBAL PARA INVERSORES SOLARES *MULTISTRING* EM CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO PARCIAL

Claudio J. O. Júnior¹, Lucas P. Pires¹, Luiz C. Freitas¹, Ernane A. A. Coelho¹, Luiz C. G. Freitas¹, Danillo B. Rodrigues²

¹Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Uberlândia - MG, Brasil

² Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Uberaba - MG, Brasil
e-mails: claudiojr2506@gmail.com, lucaspereirapires@yahoo.com.br, lcgfreitas@yahoo.com.br

Resumo – Neste trabalho são apresentadas duas estratégias para melhorar o aproveitamento na geração de energia solar a partir de um sistema fotovoltaico. A primeira delas trata-se da utilização de um inversor solar *multistring*, composto por duas *strings* fotovoltaicas conectadas a conversores CC-CC *Boost* para extração de energia de forma independente. Esses são dotados de algoritmos de MPPT P&O clássicos. A segunda estratégia consiste na utilização de um algoritmo especificamente criado para detecção do ponto global de máxima potência. A utilização de uma estrutura *multistring* tem como objetivo mitigar o efeito negativo causado pelos sombreamentos parciais (devido a sujeiras nos painéis solares, falta de manutenção especialmente em lugares onde o acesso é difícil e sombreamentos causados por objetos nas proximidades) e, com o algoritmo criado, cada conversor é capaz de extrair a máxima potência disponível de sua respectiva *string*, mesmo sob condições de sombreamento parcial e variações de irradiação solar. Finalmente, são apresentados os principais resultados experimentais para validação da teoria exposta.

Palavras-Chave – Extração de Energia Independente, Sistema Fotovoltaico, Sombreamento Parcial.

ALGORITHM FOR FOLLOWING THE GLOBAL MAXIMUM POWER POINT AT SOLAR MULTISTRING INVERTERS IN PARTIAL SHADING CONDITIONS

Abstract – In this work two strategies are presented to improve the generation of solar energy from a photovoltaic system. The first one is the use of a multistring solar inverter, consisting of two photovoltaic strings connected to DC-DC Boost converters for independent maximum energy extraction. These are equipped with classical P&O algorithm. The second one strategy consists in the use of an algorithm specifically designed to detect the global maximum power point. The use of a multistring structure is intended to mitigate the negative effect caused by partial shading (due to dirt on the solar panels, lack of maintenance especially in places

where access is difficult and shadowing caused by nearby objects). With the algorithm created, each converter is able to extract the maximum available power of its respective string, even under conditions of partial shadowing and variations of solar irradiation. Finally, the main experimental results for the validation of the exposed theory are presented.

Keywords – Independent Energy Extraction, Partial Shading, Photovoltaic System.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia renováveis para atender as necessidades da demanda de energia elétrica tem se tornado uma excelente opção para o problema do déficit de energia elétrica. Uma variedade no desenvolvimento de técnicas relacionados ao uso das fontes de energia renováveis têm impulsionado cada vez mais pesquisas para utilização de fontes de energia renováveis em diversas configurações, como por exemplo, a utilização de sistemas fotovoltaicos para aplicação em microrredes CC (corrente contínua) [1].

Em se tratando de energia solar, o Brasil é um dos países com maior potencial. Os níveis de irradiação solar anual incidente em qualquer região do território brasileiro (1500 - 2500 kWh/m²) são superiores aos níveis de irradiação solar verificado no restante do mundo [2]. Para exemplificar esse potencial, a Alemanha, que é um dos países com maior capacidade de energia fotovoltaica instalada, tem em sua região com mais incidência de irradiação solar (1250 kWh/m²) níveis inferiores comparados a pior região do Brasil [2].

Como desvantagem ao uso da energia solar fotovoltaica, destaca-se os custos elevados para instalação do sistema. No entanto, os custos dos painéis fotovoltaicos em 2012, por exemplo, quando comparados com 1976 são 87 vezes menores, passando de US\$ 70/Wp para US\$ 0,8/Wp e com projeção de diminuir ainda mais [3]. Outro ponto negativo é a baixa eficiência de conversão das células, contudo, nesse ponto nota-se os recentes avanços obtidos por estudos científicos acerca da melhor utilização dos materiais semicondutores, obtendo-se aumento na eficiência de conversão de energia. Pode-se tomar como exemplo desse fato

Artigo submetido em 27/09/2017. Primeira revisão em 07/11/2017. Aceito para publicação em 02/01/2018 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

TABELA I
Técnicas Específicas para Detecção do Ponto Global de Máxima Potência

Métodos	Complexidade de Implementação	Detecção do GMPP sob Condições de Sombreamento Parcial (CSP)	Informações Adicionais
P&O com comparação em três pontos [4]	Baixa	Melhora o desempenho, mas ainda assim falha em algumas condições de operação.	Além da comparação em três pontos, possui uma busca periódica, aumentando a probabilidade de detecção do GMPP.
Observação das características das curvas I-V e P-V sob CSP [5]	Baixa	Melhora o desempenho, mas pode levar ao rastreamento de um MPP local em alguns casos.	Utiliza a trajetória de uma hipérbole retangular para permitir incrementos maiores, aumentando assim, a velocidade no processo de busca do GMPP.
Controlador de MPPT melhorado [6]	Baixa	Detecta em todas as condições de operação.	Ocorre perda significativa de energia durante a medição da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito da <i>string</i> .
Técnica de rastreamento do GMPP utilizando lógica <i>fuzzy</i> [7]	Alta	Detecta em todas as condições de operação.	Utiliza a técnica de MPPT <i>hill climbing</i> baseado em lógica <i>fuzzy</i> para rastrear o GMPP sob CSP.
Controlador de MPPT melhorado para sistemas fotovoltaicos sob CSP [8]	Baixa	Detecta em todas as condições de operação.	Em sistemas com uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos, a presença de diversos sensores de tensão eleva consideravelmente o custo operacional.
Algoritmo VWS (<i>Voltage Window Search</i>) [9]	Média	Pode falhar em CSP totalmente atípicas.	Em casos totalmente atípicos em que os falsos pontos de máxima potência estejam fora da faixa esperada no artigo em questão o algoritmo provavelmente irá falhar.
<i>Full Scanning of Duty Ratio</i> [10]	Baixa	Detecta em todas as condições de operação.	O valor de razão cíclica é modificado de um mínimo até o máximo por passos fixos e todos os valores de potência são salvos. Desnecessários escaneamentos provocam perdas e diminuem a eficiência da técnica.
<i>Large Scanning of Duty Ratio</i> [10]	Média	Pode falhar em CSP totalmente atípicas.	Detecta pontos de máximo de acordo com certas regiões da curva P-V, o que aumenta a eficiência para a maioria dos casos e inclui falhas em casos atípicos.
Método proposto pelo Autor	Baixa	Detecta em todas as condições de operação.	As perdas durante o processo de busca do GMPP são minimizadas pelo cálculo do ponto inicial de operação e também pelo passo variável entre as ações do algoritmo. Utiliza estrutura do tipo <i>multistring</i> para maximização da energia produzida.

a tecnologia de células multijunção [11] e células fotovoltaicas concentradas [12].

Devido à natureza intermitente da energia solar, é necessário o uso de conversores destinados ao condicionamento da energia proveniente dos painéis fotovoltaicos. Esses conversores são responsáveis por elevar ou reduzir e manter constante a tensão de saída da carga, independentemente da tensão de entrada gerada na fonte de alimentação [13]. Para controlar esses conversores e determinar a lógica de chaveamento dos mesmos, é necessário o uso de técnicas para o seguimento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), de modo a manter a máxima potência de geração dos painéis fotovoltaicos.

A precisão das técnicas convencionais de MPPT é muito elevada sob condições de irradiação solar uniforme, entretanto, sob condições de sombreamento parcial, essas técnicas podem deixar de acompanhar o ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*) real.

Quando a matriz solar não recebe irradiação solar uniforme, devido às nuvens, árvores, edifícios, sujeira nos painéis, etc., pontos de máximos locais múltiplos podem aparecer na curva característica P-V (potência x tensão) do arranjo fotovoltaico. Nessas condições, a utilização de técnicas de MPPT convencionais reduz a eficácia na geração de energia,

tornando necessário o desenvolvimento de técnicas que sejam capazes de seguir o MPP mesmo sob condições de sombreamento parcial. A perda na geração de energia de um sistema fotovoltaico pode chegar a 70% sob condições de sombreamento parcial [14].

De forma a minimizar os prejuízos advindos da irradiação não uniforme nas células fotovoltaicas, tem-se a tendência de desenvolvimento da tecnologia *multistring*, a qual consiste na utilização de *strings* em paralelo e com seguimento do MPP de forma independente, sendo que, nesse caso, o aparecimento desse efeito indesejado em apenas uma das *strings* não atinge a operação normal da outra.

Além disso, outra vertente de estudos concentra-se na utilização de técnicas específicas para detecção do GMPP (*Global Maximum Power Point*) que também tornam o sistema mais eficiente no que tange ao melhor aproveitamento na geração de energia. Desse modo, ao aliar-se uma estrutura *multistring* com algoritmos/técnicas que garantem operação no ponto de máximo global tem-se a certeza de que os efeitos da irradiação solar não uniforme estão reduzidos em escala considerável, quando se comparado à situação em que tais tecnologias estejam operando separadamente.

Na Tabela I são citados alguns trabalhos acerca de algoritmos para detecção do ponto global de máxima potência. Destaca-se que a maioria das técnicas apresentadas se

mostraram de fácil implementação, mas com falhas em algumas condições de operação ou apresentando perdas significativas de energia durante o processo de busca do GMPP. Outras, se mostraram eficazes na busca do ponto global de máxima potência, mas com complexidades maiores de implementação.

Em caráter especial, na técnica conhecida como “*Full Scanning of Duty Ratio*” [10] a razão cíclica de trabalho é alterada de um valor mínimo para um valor máximo (ou vice-versa) com passo fixo constante e os valores de potência são armazenados para todas razões cíclicas de trabalho. No algoritmo proposto pelos autores, também ocorre a variação da razão cíclica de trabalho com passos fixos, no entanto, cada valor de potência calculado é comparado com a potência anterior e com a potência ótima detectada até aquele momento, evitando gastos computacionais desnecessários com o armazenamento de cada valor de potência calculado durante o processo de busca do GMPP.

Já com relação à técnica conhecida como “*Large Scanning of Duty Ratio*” [10], o cálculo da razão cíclica de trabalho máxima/mínima envolve diversas variáveis e, conseqüentemente um maior gasto computacional. Além disso, esta técnica também armazena todos os valores de potência calculados para cada razão cíclica de trabalho imposta durante a detecção do GMPP.

Assim, destaca-se como contribuição deste trabalho, o desenvolvimento e implementação de um algoritmo simples e eficaz para detecção do ponto global de máxima potência. A partir da utilização de uma estrutura *multistring* para extração de energia independente e do algoritmo desenvolvido, tem-se a mitigação do efeito negativo causado pelos sombreamentos parciais nos painéis fotovoltaicos, garantindo assim, melhor aproveitamento na geração de energia do sistema fotovoltaico.

II. ANÁLISE E OPERAÇÃO DO ESTÁGIO CC-CC DE ENTRADA

A. Projeto dos Conversores CC-CC Boost

O estágio de entrada da estrutura apresentada na Figura 1 é composto por duas *strings* conectadas em paralelo, havendo conexão ao barramento CC (cujas tensão é regulada em 400 V pelo ISB - Inversor Solar Bidirecional) pelos conversores CC-CC Boost, sendo esses os responsáveis pela extração de energia em cada uma das *strings*, operando assim, de forma independente. A primeira *string* é composta pela associação série de 7 painéis Kyocera KD140SX-UFBS, totalizando 980 Wp nas CPT (condições padrão de teste: irradiância = 1000 W/m² e temperatura dos painéis = 25°C). Na segunda *string*, tem-se a associação série de 7 painéis KD135SX-UPU, totalizando 945 Wp nas CPT.

A razão cíclica do conversor CC-CC Boost correspondente à máxima potência é 0,69. A frequência de chaveamento escolhida é 25 kHz. A ondulação de corrente desejada nos indutores L_{B1} e L_{B2} é de 20% da máxima corrente de cada *string* nas CPT. Logo, o valor de indutância encontrado [15] é 1,97 mH.

O capacitor de entrada do conversor C_{pv} é utilizado para estabilizar a tensão nos terminais da *string*, de modo que essa

não varie rapidamente devido à comutação da chave. A tensão correspondente a máxima potência nas CPT é 123,9 V. A amplitude desejada da ondulação de tensão é de 6% e a frequência de oscilação é o dobro da frequência fundamental da tensão da rede elétrica (120 Hz) [16]. Logo, o valor de capacitância encontrado [17] é 705,57 μ F.

Os contadores K_1 e K_2 fazem parte do esquema de proteção do circuito e foram utilizados apenas a nível de ensaios laboratoriais, sendo totalmente dispensáveis em um produto final. Não ocorrendo nenhuma anormalidade durante cada ensaio, tais elementos são acionados apenas uma vez, no início do teste.

B. Técnica de MPPT / Técnicas e Critérios de Controle dos Conversores CC-CC Boost

O valor de tensão dos painéis solares que retorna a máxima potência gerada por sistemas fotovoltaicos varia sob condições ambientais, tais como a irradiação e a temperatura. Nesse sentido, faz-se necessário a utilização de técnicas de MPPT com o objetivo de manter cada *string* operando no ponto de máxima potência, de modo a maximizar a energia produzida.

Uma das técnicas mais utilizadas para o seguimento do ponto de máxima potência é a P&O [18], sendo essa, a escolhida para o seguimento da máxima potência nas duas *strings* da estrutura proposta. No entanto, essa técnica, assim com as outras técnicas convencionais de MPPT, não são imunes aos efeitos causados pelos sombreamentos parciais e, sendo assim, o sistema pode operar em um ponto falso de máxima potência da curva (FMPP - *False Maximum Power Point*).

A estratégia para extração da máxima potência disponível, consiste na utilização da técnica de MPPT P&O clássica associada ao algoritmo criado para detecção do GMPP, sendo esse executado periodicamente. A utilização de uma estrutura *multistring*, onde o controle de MPPT é realizado de forma independente, atenua o efeito de sombreamento parcial, aumentando assim, a geração de energia. Ressalta-se que em uma *string* fotovoltaica sob condições de sombreamento, a operação no MPP resultante da associação não significa que cada um dos painéis que a compõe encontram-se operando no seu MPP e, as perdas na extração de energia podem ser consideráveis em algumas CSP [19], justificando assim, o uso da referida estrutura.

A técnica de MPPT P&O possui como variáveis de entrada a tensão e a corrente nos terminais da *string* e como saída uma tensão referência, sendo essa, a representativa da máxima potência disponível para extração. A estratégia para imposição dessa tensão nos terminais das *strings* fotovoltaicas consiste em um compensador $C_{V_{pv}}(s)$ em cascata com a planta $G_{V_{pv,D}}(s)$ (função de transferência a ser controlada), sendo essa obtida através da modelagem em espaço de estados médio. A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do controle de tensão utilizado, em que o modulador $G_{PWM}(s)$ e o sensor de tensão $H_v(s)$ são considerados com ganho unitário.

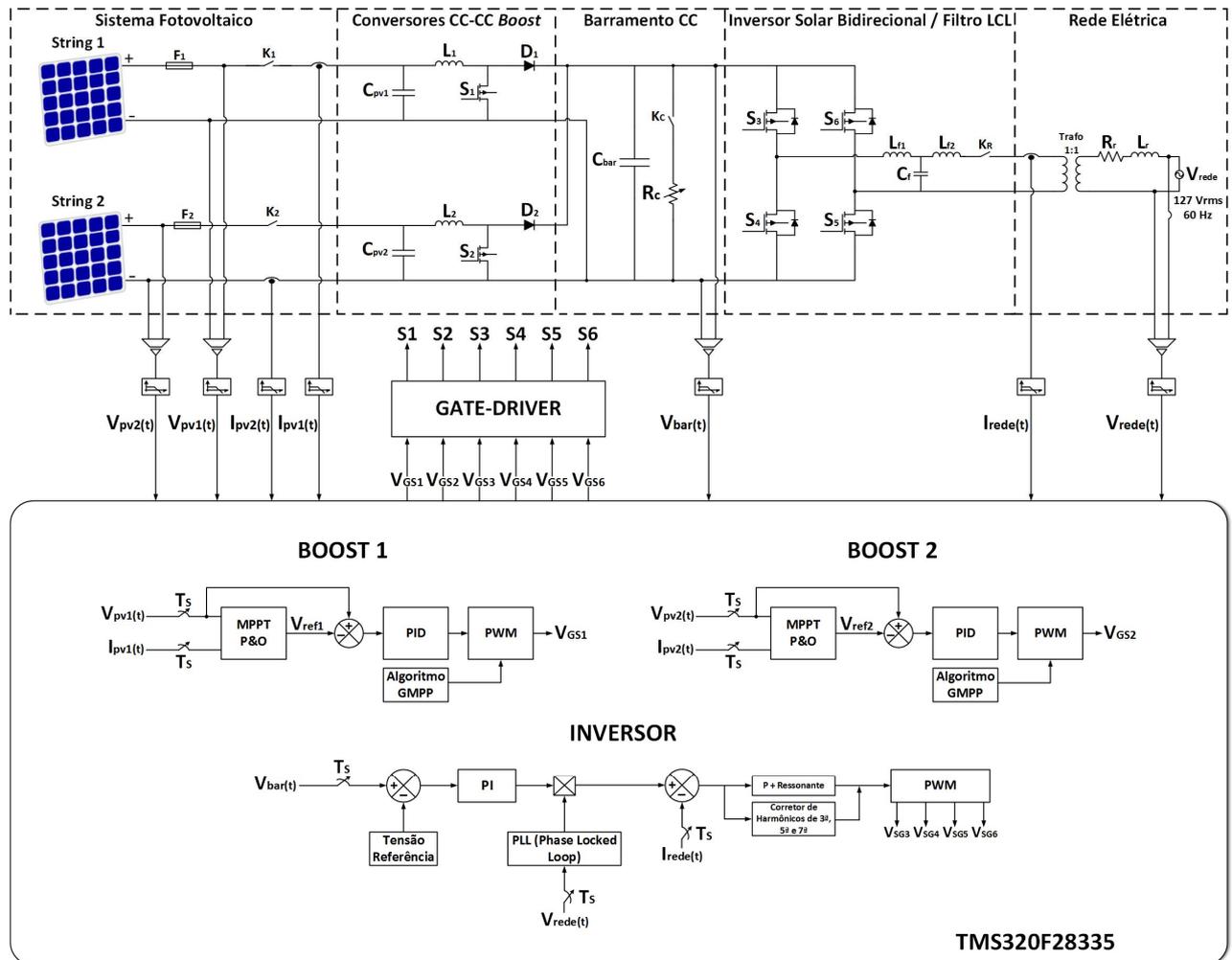


Fig. 1. Estrutura do sistema fotovoltaico constituído por duas *strings* com extração global e independente de potência e conexão à rede elétrica por meio de um inversor solar bidirecional.

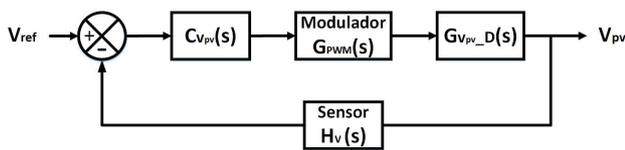


Fig. 2. Diagrama de blocos do controle de tensão utilizado.

O controlador trabalha no sentido de compensar o erro entre a tensão de referência (obtida pela técnica de MPPT P&O clássica) e a tensão de saída da *string* fotovoltaica, atuando na razão cíclica de chaveamento do conversor CC-CC *Boost* de modo a impor essa tensão de referência nos terminais de cada uma das *strings*.

A partir da modelagem em espaço de estados médio do conversor CC-CC *Boost*, obtém-se a função de transferência da tensão nos capacitores C_{pv1} e C_{pv2} com relação à razão cíclica de chaveamento, dada por:

$$G_{V_{pv-D}}(s) = \frac{V_{bar} R_{pv}}{C_{pv} L_B R_{pv} s^2 + (L_B + C_{pv} R_{LB} R_{pv}) s + R_{LB} + R_{pv}} \quad (1)$$

em que:

- V_{out} – Tensão do barramento CC [V];
- R_{pv} – Resistência representativa da *string* [Ω];
- C_{pv} – Capacitância de entrada do conversor [F];

- L_B – Indutância do conversor [H];
- R_{LB} – Resistência do indutor [Ω].

Foram adotados como critérios de projeto para a função de $G_{V_{pv-D}}(s)$ um compensador com margem de fase entre 45° e 76° , isso, para que o sistema apresente baixo tempo de acomodação e ultrapassagem percentual (UP%) reduzida [20], [21], o que evita que os capacitores C_{pv1} e C_{pv2} sejam submetidos a alto estresse dielétrico.

Adotou-se um compensador do tipo PID (Proporcional Integral Derivativo). A ação proporcional irá prover uma resposta mais rápida sob uma variação no sinal de entrada. A ação integral tem como objetivo anular o erro em regime permanente, ou seja, atingir um estado estável cujo valor seja o desejado no sinal de entrada, por fim, a ação derivativa possui um efeito de antecipação da correção do valor de saída do sistema de forma a melhorar a rapidez da resposta do sistema. A combinação dessas três ações irá fazer com que o controlador em conjunto com a planta, forneça uma resposta adequada a uma determinada variação na entrada [22]. A função de transferência do compensador $C_{V_{pv}}(s)$ utilizado é:

$$C_{V_{pv}}(s) = 0,1 \frac{(s + 124)(s + 1150)}{s(s + 3,01 \cdot 10^4)} \quad (2)$$

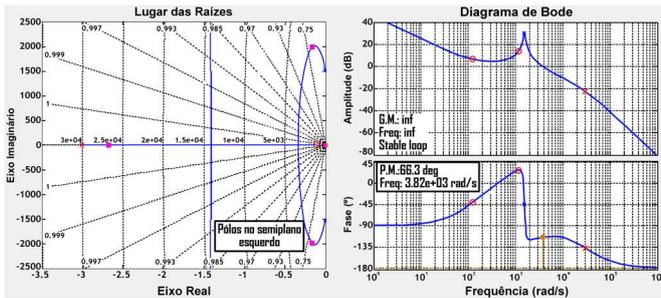


Fig. 3. Lugar das raízes e diagramas de Bode do sistema compensado.

O ganho, os zeros e os pólos do compensador foram ajustados utilizando a ferramenta *sisotool* do Matlab® para atender aos critérios de estabilidade mencionados. Nota-se a presença de um pólo a mais que o esperado com a finalidade de atuar como filtro para frequências acima da frequência de chaveamento, o que, por sua vez, age no sentido de melhorar a resposta do controlador. A Figura 3 ilustra o lugar das raízes e os diagramas de Bode do sistema compensado.

O sistema apresentado na Figura 3 é estável, pois os pólos estão localizados no semiplano esquerdo e, com o compensador utilizado, a nova margem de fase do sistema é de 66,3°, sendo esse, um valor dentro da faixa mencionada anteriormente.

Com a utilização do PID, observa-se, na Figura 4, a resposta ao degrau unitário do sistema compensado, no qual o sistema atinge o regime permanente com tempo de acomodação de 41 ms (*settling time* de 2%), sendo este um valor adequado para operação do controlador frente às constantes mudanças de referência de tensão providas pela técnica de MPPT.

Com relação à tal técnica, a frequência de atualização das variáveis (f_{mppt}) foi definida em 10 Hz com passo de perturbação de tensão de tensão (ΔV) de 0,1 V. Esses valores proporcionam oscilações reduzidas em torno do ponto de operação, tendo como consequência um sistema mais preciso, porém mais lento. Ressalta-se que o escaneamento periódico da curva P-V retorna o GMPP, de forma que os incrementos reduzidos de tensão garantem a operação com menor variação em torno do ponto de máximo global obtido.

C. Algoritmo para Detecção do GMPP

O algoritmo desenvolvido para detecção do GMPP é realizado em cada *string* de forma independente, assim como a técnica de MPPT utilizada. O objetivo do algoritmo é a mitigação do efeito negativo causado pelo sombreamento parcial, fazendo com que o sistema atue sempre no GMPP, garantindo desse modo, a extração da máxima potência disponível em todas as condições de operação, evitando prejuízos ainda maiores pela atuação do sistema em um FMPP.

Na Figura 5 é apresentado o fluxograma do algoritmo implementado para melhor interpretação do fluxo de informações e a sequência que caracteriza a operação do mesmo. Inicialmente há o cálculo da razão cíclica do conversor que corresponde à tensão de circuito aberto em cada uma das *strings*, sendo essa ação representada como {2} no fluxograma. Em seguida, tem-se a execução da ação principal do algoritmo ({3} a {7} na Figura 5), onde é realizado um

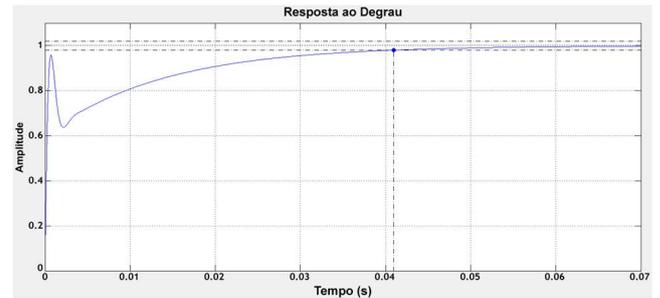


Fig. 4. Resposta ao degrau unitário do sistema compensado.

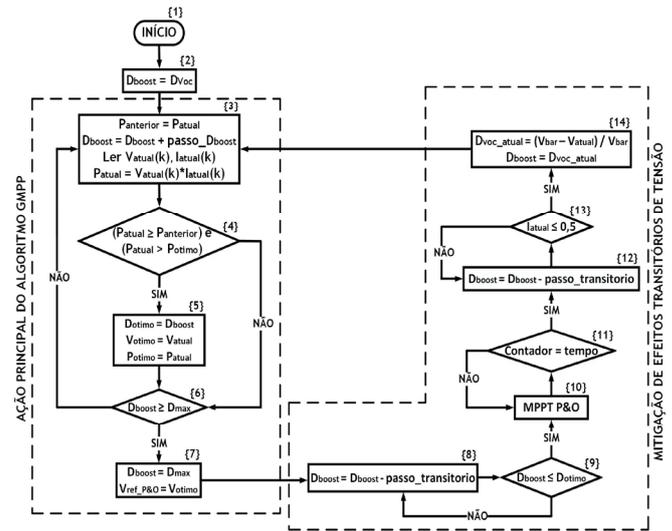


Fig. 5. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para detecção do GMPP.

escaneamento completo das *strings*, com início na razão cíclica calculada anteriormente (D_{voc}) até uma razão cíclica máxima (D_{max}), sendo essa definida em 0,9.

A cada incremento de razão cíclica ($passo_D_{boost}$) é calculada a potência instantânea, através do produto da tensão e corrente de saída das *strings*. Durante essa ação é detectada e salva a tensão ótima de operação $V_{ref_P\&O}$ correspondente ao ponto global de máxima potência e, ao final do escaneamento, essa é liberada como referência inicial para atuação da técnica de MPPT P&O clássica. Ressalta-se que o incremento com passos definidos na razão cíclica do conversor *Boost* ocorre apenas na etapa de escaneamento da curva P-V, sendo que durante a operação do P&O é o controlador PID o responsável pela variação desta variável.

O escaneamento da curva P-V também poderia ser realizado por meio do controlador PID, admitindo para tanto uma variação da tensão de referência no intervalo requerido entre circuito aberto e curto-circuito. Contudo, justifica-se a busca pelo GMPP com o incremento da razão cíclica de trabalho pelo fato desta anular qualquer efeito transitório que provocasse uma leitura sutilmente inadequada da tensão de máxima potência. Ao efetuar o escaneamento da curva P-V a partir do controlador PID, a razão cíclica de trabalho do conversor irá variar de modo a impor tal valor no circuito, sendo que tal variação transitória pode acarretar uma medida levemente imprecisa do ponto de máxima potência global. Com o incremento de razão cíclica (própria variável de saída do controlador PID) tal fato não ocorre, visto que é entregue ao PWM uma razão cíclica crescente com passo bem definido.

A escolha adequada da razão cíclica para o início da operação do algoritmo (D_{Voc}) otimiza a operação do mesmo. Uma escolha errada pode resultar em um gasto maior de tempo para a execução do algoritmo, ou até mesmo iniciar a operação em um determinado ponto da curva, podendo prejudicar o algoritmo na busca pelo verdadeiro ponto de máxima potência, uma vez que nessa situação, o escaneamento da curva não será completo. Nesse sentido, foi inserido no algoritmo o cálculo de D_{Voc} e, sendo assim, diante de qualquer quantidade de painéis utilizados nas *strings*, o algoritmo é capaz de detectar o ponto inicial de operação. Desta maneira, a faixa de escaneamento é minimizada tornando o escaneamento mais rápido.

Para evitar transitórios de tensão no barramento CC devido ao fluxo de energia instantâneo proveniente das *strings* fotovoltaicas, foi incorporado ao algoritmo a ação de mitigação desses efeitos ($\{8\}$ a $\{14\}$ na Figura 5). Essa ação consiste em evitar passos acentuados de razão cíclica e, por conseguinte, danos aos semicondutores devido à sobretensão causada pela mudança abrupta, seja da condição final do escaneamento D_{max} até o ponto ótimo detectado D_{otimo} , ou de D_{otimo} até D_{Voc} para novamente iniciar o escaneamento. Ressalta-se, que o passo de razão cíclica utilizado nessa condição (*passo_transitorio*) é maior que o passo utilizando na ação principal do algoritmo, uma vez que o objetivo é apenas evitar a transição repentina entre as ações.

Embora o trabalho retrate estratégias para maximização da energia produzida por um sistema fotovoltaico, os resultados obtidos foram realizados em condições reais de operação (gerador fotovoltaico conectado na entrada do conversor *Boost* e inversor *multistring* injetando potência ativa na rede elétrica), daí toda a preocupação e cuidado com a dinâmica do sistema como um todo (Conversores CC-CC e Conversor CC-CA).

O cálculo de D_{Voc} realizado na ação inicial do algoritmo utiliza a tensão de circuito aberto das *strings* medida com os conversores ainda desabilitados. Contudo, a partir da segunda iteração do algoritmo, os conversores já estão em operação e, a tensão de circuito aberto medida inicialmente pode mudar em funções das condições ambientais. Sendo assim, o cálculo de D_{Voc} para as iterações seguintes foi efetuado de forma aproximada. Considerou-se como ponto final, uma corrente no conversor igual a 0,5 A, nessa situação, a tensão correspondente nos terminais da *string* está muito próxima da tensão de circuito aberto e, dessa maneira, o cálculo de D_{Voc} foi obtido utilizando essa tensão. A Figura 6 ilustra a operação do algoritmo para essa condição.

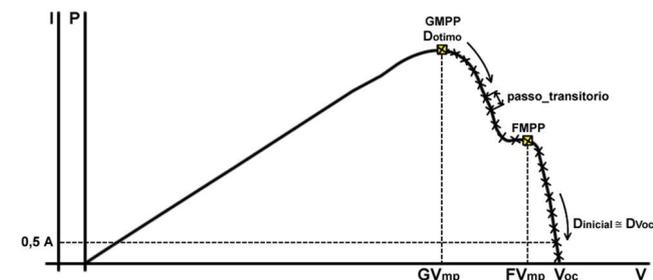


Fig. 6. Operação do algoritmo na transição de D_{otimo} para D_{Voc} .

O intervalo entre os escaneamentos realizados pode ser ajustado pelo operador através da variável tempo. Uma boa

maneira de contribuir com a ação de controle para regulação da tensão do barramento CC, é a efetuação dos escaneamentos em momentos distintos em cada uma das *strings*, evitando assim, oscilações mais acentuadas de tensão.

É importante ressaltar que a tensão no barramento CC tem influência direta na dinâmica dos conversores, uma vez que a ação de controle realizada para imposição da tensão representativa da máxima potência nos terminais das *strings*, tem como premissa uma tensão de saída V_{bar} regulada. Logo, um controle de tensão eficiente no barramento CC, o qual deve ser feito pelo ISB, auxilia o controle de extração de máxima potência do sistema fotovoltaico e contribui para uma melhor eficiência da técnica de MPPT.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para obtenção dos resultados experimentais, foi construído um protótipo conforme a estrutura proposta neste trabalho, sendo este mostrado na Figura 7, assim como as placas para aquisição e conversão dos sinais, os drivers para comando das chaves e o microcontrolador da texas TMS320F28335. As especificações do protótipo são apresentadas na Tabela II.

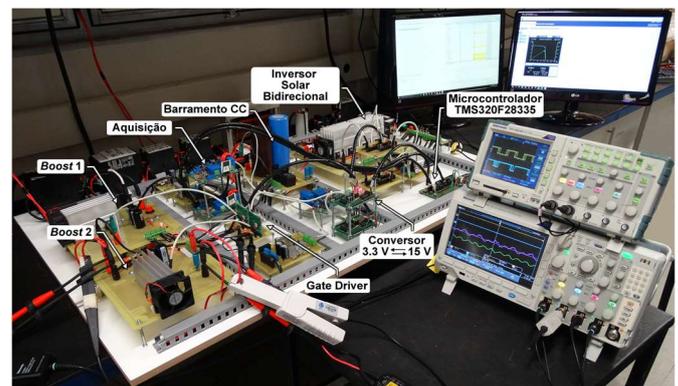


Fig. 7. Protótipo composto por duas *strings* com MPPT independente e conexão à rede elétrica por meio de um inversor solar bidirecional.

TABELA II
Especificações do Protótipo

Parâmetros dos Conversores CC-CC Boost	
Indutores L_1 e L_2 , $L_1 = L_2 = 1$ mH, Ferrite	
Capacitores, $C_{pv1} = C_{pv2} = 660$ μ F, (2 x 330 μ F, 500 V), Eletrolítico	
Chaves, IRGPF40F; Diodos, FES16JT9812	
Parâmetros do Barramento CC	
Capacitor $C_{bar} = 500$ μ F, 900 V, Eletrolítico	
Parâmetros do Inversor Solar Bidirecional	
Indutor de filtro $L_{f1} = 700$ μ H, Ferrite	
Indutor de filtro $L_{f2} = 9$ mH, Aço Silício	
Capacitor de filtro $C_f = 10$ μ F, 400 V _{ca}	
Chaves, IRG4PC40K; Diodos, FES16JT9812	

A obtenção dos resultados experimentais foi realizada com o sistema completo em funcionamento, ou seja, as duas *strings* conectadas em paralelo com o barramento CC através dos conversores CC-CC *Boost*, e conexão do barramento CC com a rede elétrica a partir do ISB objetivando avaliar a dinâmica como um todo e validar toda a estrutura proposta.

No entanto, o objetivo deste trabalho está na análise do desempenho do estágio de entrada do que tange à extração de

máxima potência de forma independente sob condições de sombreamento parcial. Os detalhes técnicos relacionados a operação do ISB são descritos em [23].

Neste sentido, com o intuito de verificar se os conversores estavam realmente extraindo a máxima potência disponível, utilizou-se o instrumento Solar I-V. O instrumento permite a inserção das especificações elétricas do painel fotovoltaico e, com isso, a realização de testes rápidos para obtenção das curvas características I-V e P-V, as quais serão a base de verificação do ponto de operação dos conversores. A Figura 8 mostra o esquema de ligações feitos para utilização do instrumento.



Fig. 8. Esquema de ligação do instrumento Solar I-V.

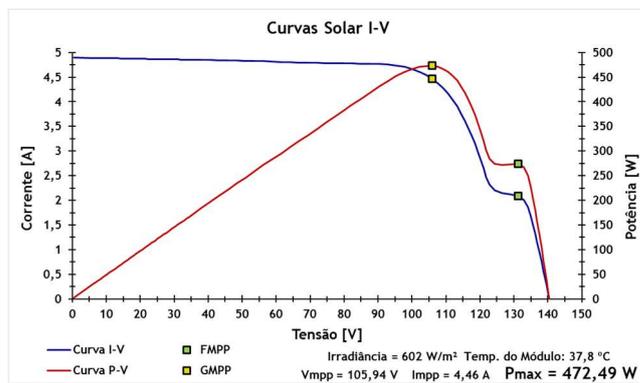
A obtenção das curvas I-V e P-V através do equipamento de medição fotovoltaico Solar I-V foi realizada antes de cada respectivo ensaio feito no protótipo, uma vez que é necessário abrir o circuito para realização dos mesmos. Para cada valor

de irradiância escolhido para realização dos testes, mediu-se as curvas características e, logo em seguida, iniciou-se os testes com o protótipo. Vale ressaltar que existe um pequeno intervalo de tempo entre as medidas feitas pelo equipamento e as medidas realizadas com o protótipo em funcionamento, no entanto, a diferença de irradiância e temperatura entre os ensaios são mínimas, o que permite uma comparação adequada entre os resultados, para verificação da correta operação dos conversores. Nas curvas obtidas há informações da irradiância e temperatura dos painéis no momento da realização do ensaio, assim como a tensão, corrente e a potência representativa do ponto máximo das curvas.

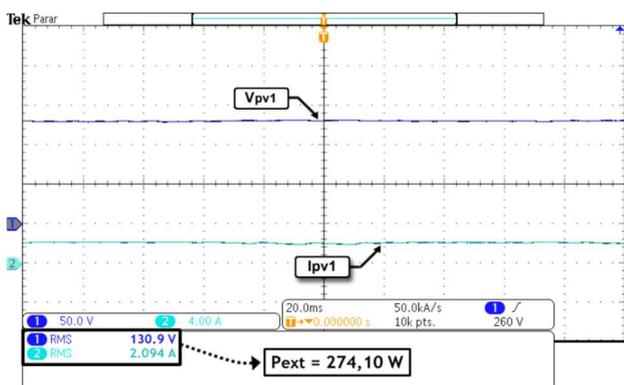
A Figura 9 apresenta a operação do conversor 1 realizando a extração de potência sob condições de irradiância solar não uniforme, conforme mostrado nas Figuras 9 (a) e (b). A Figura 9 (c) ilustra a operação do conversor apenas com a utilização da técnica de MPPT P&O clássica. Como a técnica utilizada não é imune aos efeitos de sombreamento parcial, a operação do conversor ficou no FMPP, pois ao realizar a perturbação da tensão em torno desse ponto não é encontrado valores maiores de potências. Nessa situação, a perda na extração potência pela operação no FMPP foi de aproximadamente 42% da potência total disponível pela *string*. A Figura 9 (d) ilustra as formas de onda de tensão e corrente de entrada do conversor 1 obtidas com o algoritmo para detecção do GMPP habilitado, ficando evidente, a correta operação do conversor na extração da máxima potência disponível.



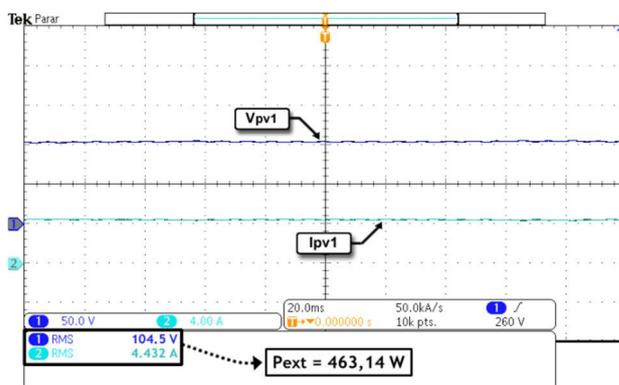
(a)



(b)

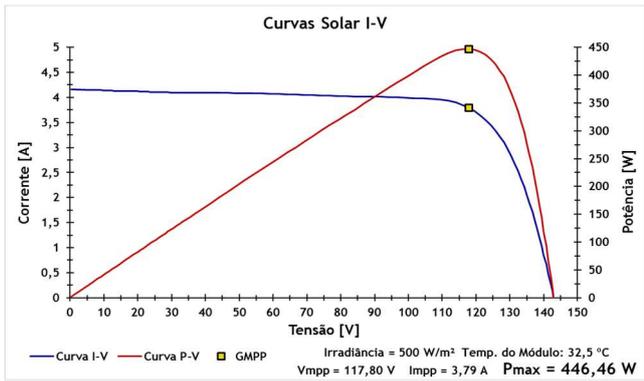


(c)

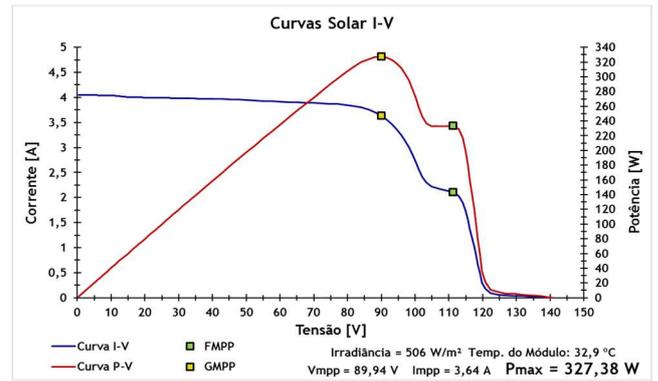


(d)

Fig. 9. a) Sombreamento realizado para o ensaio; b) Curvas I-V e P-V da *string* 1 para irradiância de 602 W/m²; c) Tensão e corrente de entrada do conversor 1 para operação no FMPP; d) Tensão e corrente de entrada do conversor 1 para operação no GMPP.



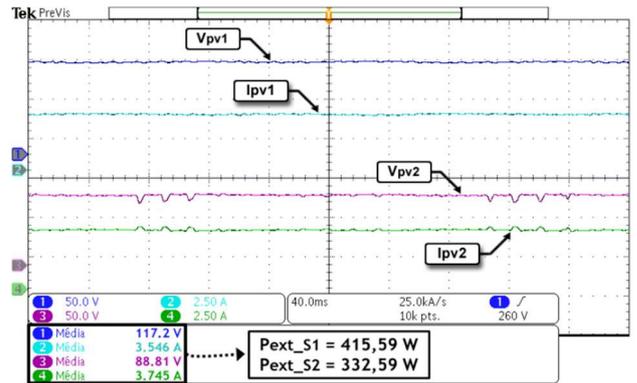
(a)



(b)

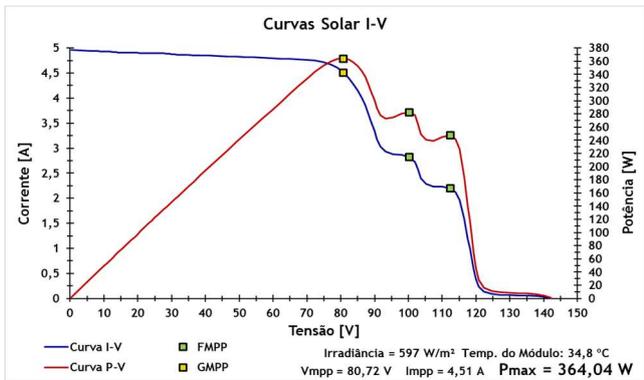


(c)

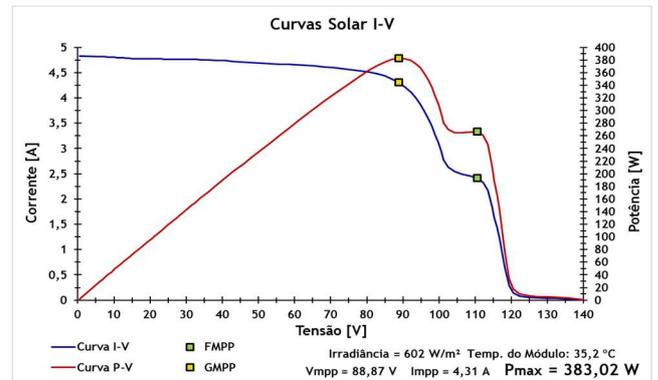


(d)

Fig. 10. a) Curvas I-V e P-V da *string* 1 para irradiância de 500 W/m²; b) Curvas I-V e P-V da *string* 2 para irradiância de 506 W/m²; c) Sombreamento realizado na *string* 2 para o ensaio; d) Tensão e corrente de entrada dos conversores 1 e 2.



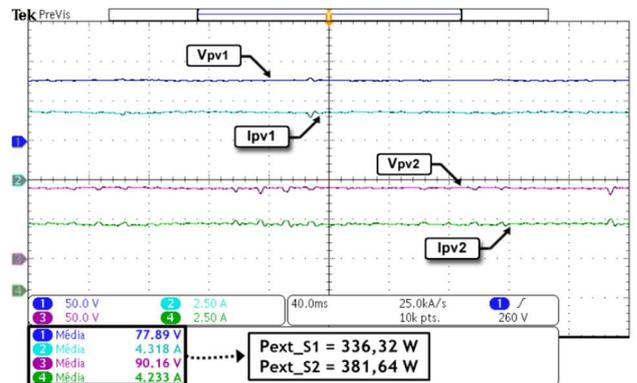
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11. a) Curvas I-V e P-V da *string* 1 para irradiância de 597 W/m²; b) Curvas I-V e P-V da *string* 2 para irradiância de 602 W/m²; c) Sombreamento realizado nas *strings* 1 e 2 para o ensaio; d) Tensão e corrente de entrada dos conversores 1 e 2.

A Figura 10 apresenta os resultados referentes à extração de potência de forma independente sob condições de sombreamento parcial em uma das *strings*. As Figuras 10 (a) e (b) ilustram as curvas características obtidas para as *strings* 1 e 2, respectivamente. A *string* 1 opera sob condições de irradiância uniforme, enquanto a *string* 2 opera sob condições de sombreamento parcial, conforme ilustrado na Figura 10 (c). A Figura 10 (d) ilustra o resultado experimental obtido para as condições apresentadas, nessa situação, o algoritmo GMPP está habilitado, e a operação dos conversores está no ponto de máxima potência de suas respectivas curvas.

Os painéis utilizados na *string* 1 são semelhantes aos da *string* 2, logo as máximas potências disponíveis são próximas.

Com o sombreamento realizado, a diferença nas potências extraídas pelas *strings* foi significativa, evidenciando assim, o prejuízo causado pelos sombreamentos parciais, que poderia ser mais elevado caso o conversor 2 não estivesse operando no GMPP.

A Figura 11 apresenta os resultados referentes à extração de potência de forma independente com sombreamento parcial em ambas as *strings*. As curvas características são apresentadas nas Figuras 11 (a) e (b). O sombreamento realizado nas *strings* é ilustrado na Figura 11 (c). A Figura 11 (d) ilustra o resultado experimental obtido e, também nessa situação, o algoritmo está habilitado, havendo correta operação dos conversores no GMPP.

A fim de elucidar o comportamento da tensão no barramento CC e também da razão cíclica de trabalho dos conversores *Boost* frente a variações na irradiação solar, realizou-se o teste de aumento de 400 W/m² para 800 W/m² em ambiente controlado (auxiliado por um emulador solar), apenas com a *string* 1 conectada, com rampa de 7 segundos. A temperatura dos módulos fotovoltaicos foi mantida constante em 25 °C.

A resposta obtida está mostrada na Figura 12. Fica evidente que com o aumento gradual na irradiação solar a tensão do barramento V_{bar} praticamente não se alterada, reflexo de um bom controle efetuado pelo inversor *multistring*. Nesse caso, a razão cíclica de trabalho do conversor pode ser observada por meio da tensão nos terminais da *string* 1, uma vez que essas se relacionam. Percebe-se que a tensão V_{pv} também contém pouca variação, o que já era esperado, uma vez que o aumento de irradiação está ligado principalmente à elevação da corrente dos módulos fotovoltaicos. Tal corrente, por sua vez, acompanha, em tempo real, o aumento da irradiância, destacando assim, a boa atuação da técnica utilizada para extração de energia.

Por fim, como o controle de tensão do barramento CC é de responsabilidade do inversor, não há variações significativas em termos de razão cíclica de trabalho dos conversores CC-CC de entrada, mesmo em períodos transitórios como elucidado no resultado mostrado. Deve-se notar que pequenas variações em D_{boost} são inevitáveis, uma vez que existe uma ondulação característica de 120 Hz na tensão V_{bar} e o controle dos conversores *Boost* deve adaptar a razão cíclica a fim de manter a operação na tensão de máxima potência da *string* a todo instante.

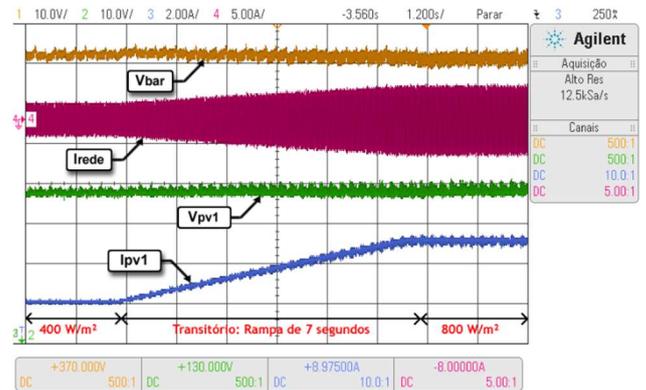


Fig. 12. Comportamento da tensão do barramento CC frente à variação de razão cíclica em caso de aumento na irradiação solar.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta estudo e implementação de uma estrutura de Inversor Solar Bidirecional (ISB) monofásico do tipo *multistring* com a utilização de um algoritmo de controle desenvolvido especificamente para detecção do ponto global de máxima potência sob todas as condições de operação. Destaca-se que não foi evidenciado na literatura o uso desses dois artifícios juntos para maximização da energia produzida, representando assim, uma importante contribuição deste trabalho.

Os resultados experimentais apresentados comprovam a eficácia do algoritmo utilizado, onde há operação no ponto global de máxima potência sob as diferentes condições que foram impostas, incluindo condições de sombreamentos complexos, em que podem surgir mais do que 3 MPPs. Destaca-se ainda a facilidade de implementação e pouca utilização de memória do microcontrolador. Já com o algoritmo desenvolvido inativo, a operação do conversor ficou em um ponto de máximo local e, nessa situação, a perda na extração de energia chegou a 42% da potência total disponível. Tem-se ainda a maximização da energia extraída pela utilização de uma estrutura do tipo *multistring* devido ao controle de MPPT realizado de forma independente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (processos APQ-01219-13 e TEC-PPM-00031-14), ao CNPq (processos 406845/2013-1, 472457/2013-6, 304252/2013-1 e 304307/2013-0) pelo incentivo financeiro concedido a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] H. BS, Budiyanto, R. Setiabudy, "Review of Microgrid Technology", in *International Conference on QiR (Quality in Research)*, pp. 127-132, 2013.
- [2] E. B. Pereira, F. R. Martins, S. L. Abreu, R. Rüter, *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 1ª ed., São José dos Campos, 2006.
- [3] International Energy Agency, "Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy", 2014. [Online]. Disponível: <https://www.iea.org/publications/>

freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf. [Acesso em 2017].

- [4] A. Ingegnoli, A. Iannopolo, "A Maximum Power Point Tracking algorithm for stand-alone Photovoltaic systems controlled by low computational power devices", in *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, pp. 1522-1527, 2010.
- [5] G. Escobar, C. N. M. Ho e S. Pettersson, "Maximum power point searching method for partial shaded PV strings", in *38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 5726-5731, 2012.
- [6] K. S. M. Raza, H. Goto, O. Ichinokura, H.-J. Guo, "An Improved and Very Efficient MPPT Controller for PV Systems subjected to Rapidly Varying Atmospheric Conditions and Partial Shading", in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2009.
- [7] N. A. Bader, H. A. Khaled, J. F. Stephen, W. W. Barry, "A Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Systems in Microgrids", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, n° 4, pp. 1596-1606, Abril 2013.
- [8] K. Chen, S. Tian, Y. Cheng, L. Bai, "An Improved MPPT Controller for Photovoltaic System Under Partial Shading Condition", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, n° 3, pp. 978-985, 2014.
- [9] M. Boztepe, F. Guinjoan, G. V. Quesada, S. Silvestre, A. Chouder, E. Karatepe, "Global MPPT Scheme for Photovoltaic String Inverters Based on Restricted Voltage Window Search Algorithm", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n° 7, pp. 3302-3312, 2014.
- [10] M. E. Başoğlu, B. Çakir, "Experimental Evaluations of Global Maximum Power Point Tracking Approaches in Partial Shading Conditions" in *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017.
- [11] E. Winter, D. N. Micha, N. Y. Klein, M. P. Pires, P. L. Souza, "Simulation of InGaAs/InGaP Multiple Quantum Well Systems for Multijunction Solar Cell", in *32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)*, 2017.
- [12] Y. Okada, Y. Shoji, C.-Y. Hung, D. J. Farrell, T. Sogabe, "High Density Quantum Dot Solar Cells for Concentrating Photovoltaics (CPV)", in *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017.
- [13] W. T. Costa, *Modelagem, Estimção de Parâmetros e Método MPPT para Módulos Fotovoltaicos*. Tese de Doutorado, UFES, Vitória, 2010.
- [14] Y.-H. Ji, D.-Y. Jung, C.-Y. Won, B.-K. Lee, J.-W. Kim, "Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition", in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009.
- [15] P. C. Todd, *UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design*, Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [16] S. Jain, V. Agarwal, "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems", *IET Electrical Power Applications*, vol. 1, no. 5, pp. 753 - 762, August 2007.
- [17] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, n° 5, pp. 1292-1306, September/October 2005.
- [18] R. Faranda, S. Leva, V. Maugeri, "MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison", in *IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1-6, 2008.
- [19] L. Xie, J. Qi, G. Weng, Y. Zhang, "Multi-level PV Inverter with Photovoltaic Groups Independent MPPT Control", in *17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 829-834, 2014.
- [20] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*, Pearson Education, 5ª ed., 2011.
- [21] R. C. Dorf, R. H. Bishop, *Sistemas de Controle Modernos*, LTC, 8ª ed., Rio de Janeiro, 2001.
- [22] F. Neves, "Controlador PID digital: Uma modelagem prática para microcontroladores - Parte 1," 2014. [Online]. Disponível: <https://www.embarcados.com.br/controlador-pid-digital-uma-modelagem-pratica-para-microcontroladores-parte-1/>. [Acesso em 2017].
- [23] L. P. Pires, *Projeto e Desenvolvimento de um Inversor Solar Ponte Completa Bidirecional para Microrredes CC conectadas à rede CA em baixa tensão*. Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 2016.

DADOS BIOGRÁFICOS

Cláudio José de Oliveira Júnior, nascido em Uberlândia - MG em 1991, é Engenheiro Eletricista (2014), mestre (2017) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e atualmente cursando doutorado na mesma instituição, no Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP). Suas áreas de interesse incluem conversores CC-CC, inversores solares e sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Lucas Pereira Pires, nascido em Catalão - GO em 1992, possui bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) no ano de 2014. Desenvolveu seus estudos de mestrado no NUPEP (Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 2016 na área de inversores

bidirecionais. Atualmente faz parte do mesmo núcleo desenvolvendo seu estudo de doutorado na área de inversores fotovoltaicos de baixo custo. Seus principais interesses envolvem estudos de microrredes CC e sistemas fotovoltaicos conectados e desconectados da rede elétrica.

Luiz Carlos de Freitas, nascido em Monte Alegre (MG), em 1952, é engenheiro eletricista (1975) pela Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU-FEELT, Uberlândia / MG) mestre (1985) e doutor (1992) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC-INEP), Florianópolis (SC). Atualmente é professor titular da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da UFU, Bolsista de Produtividade em Pesquisa 1B do CNPq, vinculado ao Núcleo de Eletrônica de Potência (NUPEP) da mesma Universidade. Possui 54 artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, e mais de 200 artigos publicados em conferências relacionados ao desenvolvimento de conversores CC-CC, CC-CA e CA-CC com comutação suave e retificadores multipulsos. Orientou 20 dissertações de mestradados e seis teses de doutorado como orientador principal. Desde 1996 é pesquisador com bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq. O professor Luiz Carlos de Freitas publicou no PESC'92, no APEC'93, no PESC'93 e na IEEE *Transactions on Power Electronics* - janeiro/1995, a evolução de células de comutação suave que promovem a entrada e saída de condução de interruptores com tensão zero, as quais têm sido amplamente utilizadas em pesquisas relativas à Eletrônica de Potência desde então.

Ernane Antônio Alves Coelho, nascido em Teófilo Otoni, Minas Gerais, em 1962, é engenheiro eletricista (1987) pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, mestre (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis e doutor (2000) pela Universidade Federal de

Minas Gerais, Belo Horizonte. Atualmente é professor associado 2 da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, vinculado ao Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Uberlândia, Minas Gerais. Sua área de atuação envolve inversores PWM, paralelismo de inversores, correção do fator de potência e novas tecnologias usando controle digital.

Luiz Carlos Gomes de Freitas, nascido em Uberlândia - MG em 1976, é engenheiro eletricista (2001), mestre (2003) e doutor (2006) pela Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU - FEELT). Atualmente é professor associado da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU, vinculado ao Núcleo Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), e bolsista de Produtividade em Pesquisa 2 do CNPq. Sua área de atuação é eletrônica de potência e suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, técnicas de comutação não dissipativa, conversores CC-CC e CA-CC, inversores, retificadores híbridos, técnicas de controle utilizando DSP e aplicações da eletrônica de potência em sistemas de geração distribuída. Em 2012 recebeu o *Prize Paper Award from IEEE-IAS-Industrial Automation and Control Committee* por sua contribuição no desenvolvimento de retificadores híbridos.

Danillo Borges Rodrigues, nascido em Uberlândia (MG), em 1986, é engenheiro eletricista (2011), mestre (2013) e doutor (2016) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) e pesquisador colaborador do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência da UFU (NUPEP). Suas áreas de interesse incluem retificadores híbridos e técnicas de controle digitais em conversores utilizados para mitigação de conteúdos harmônicos de corrente e compensação de afundamentos de tensão.