

# ANÁLISE E PROJETO DE UM CONVERSOR EMULADOR DE PAINEL FOTOVOLTAICO

Gustavo Martins Prado<sup>1</sup>, Gustavo Brito de Lima<sup>2</sup>, Danillo B. Rodrigues<sup>2</sup>, Luiz Carlos G. de Freitas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> – Universidade Federal de Uberlândia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG.

<sup>2</sup> – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba – MG.

gustavomartinsprado@gmail.com; gustavo.brito.28@gmail.com

**Resumo** - Este trabalho tem como objetivo a análise e desenvolvimento de um conversor capaz de emular o comportamento da curva de corrente por tensão (*I versus V*) de painéis fotovoltaicos típicos (na faixa de 0 a 300Wp). A curva *I x V* do painel foi modelada em termos de uma equação polinomial de tal forma a gerar uma referência de corrente com base na tensão de saída do painel. Para imposição da corrente foi utilizado um conversor Buck alimentado por um retificador não controlado tradicional. Serão apresentados os resultados de simulação computacional do conversor emulando um conjunto de 8 painéis fotovoltaicos totalizando uma potência de 1,08 kW.

**Palavras-Chave** – Conversor Buck, conversores CC-CC, emulador solar, energias renováveis, painéis fotovoltaicos.

## ANALYSIS AND PROJECT OF PHOTOVOLTAIC PANEL EMULATOR CONVERTER

**Abstract** – This paper aims at the analysis and development of a converter capable of emulating the behavior of the voltage-current curve (*I versus V*) of typical photovoltaic panels. The *I x V* curve of the panel was modeled in terms of a polynomial equation to generate a current reference based on the panel output voltage. For imposition of current, it used a Buck converter powered by a traditional non-controlled rectifier. The computer simulation results of the converter will be presented by emulating a set of 8 photovoltaic panels with a total power of 1 kW.

**Keywords** – Buck converter, DC-DC converters, renewable energy, photovoltaic panels, solar emulator.

### I. INTRODUÇÃO

O mercado de energias renováveis cresce rapidamente e a eletricidade advinda da energia solar, particularmente, se mostra como a grande promessa para atendimento quase que integral da demanda energética no futuro. A inserção do conceito de Microredes (do inglês *Microgrids*) no Sistema

Elétrico atual através da instalação de pequenas centrais fotovoltaicas e a ideia de uma produção energética independente fomenta a sede de economia de energia e de sustentabilidade dos consumidores.

Alguns países como Alemanha e China oferecem subsídios e financiamentos para a instalação de micro centrais fotovoltaicas conectadas à rede além de um sistema de compensação na forma de créditos de energia para os usuários que produzem mais energia do que a consumida, o que encoraja ainda mais os possíveis usuários.

Entretanto, o custo dos equipamentos e da própria instalação desses sistemas ainda é muito alto e, além disso, ainda há muitos estudos em andamento para aperfeiçoamento do uso dos sistemas fotovoltaicos [1].

Nesse contexto, observando a importância da inserção desse tipo de energia na atual conjuntura dos Sistemas Elétrico de Potência e ainda notando o custo ainda alto da mesma, este artigo mostra estudos realizados na área de energia solar fotovoltaica aliada a dispositivos de eletrônica de potência para o desenvolvimento de dispositivos e técnicas que auxiliam no aprimoramento dos estudos acerca destes sistemas. Com esse pretexto tem-se o desenvolvimento de um conversor capaz de emular o comportamento de painéis fotovoltaicos.

### II. EMULADOR FOTOVOLTAICO

Por ser um sistema de alto custo e devido à dependência da utilização do sistema por completo para realização de testes e estudos com o mesmo, as dificuldades para a realização do aprimoramento da eficiência e do rendimento desses sistemas são muitas.

Uma possível solução para esse impasse seria a utilização do chamado emulador fotovoltaico. Esse dispositivo possui as mesmas características de um painel fotovoltaico além das vantagens de requerer menos espaço se comparado ao módulo solar, de não depender das condições climáticas para realizar a simulação, de possibilitar a simulação dos diferentes tipos de células fotovoltaicas (monocristalina, policristalina, amorfa, entre outras) além de poder testar todos os componentes do sistema.

Por essas razões, com o intuito de atribuir essas vantagens citadas, este documento tem por finalidade a implementação



de um emulador solar utilizando conversor CC-CC do tipo Buck.

O conversor tem como principal intuito simular as configurações do painel fotovoltaico, gerando uma corrente de acordo com a tensão de saída do painel. A Figura 1 o diagrama de blocos do sistema.

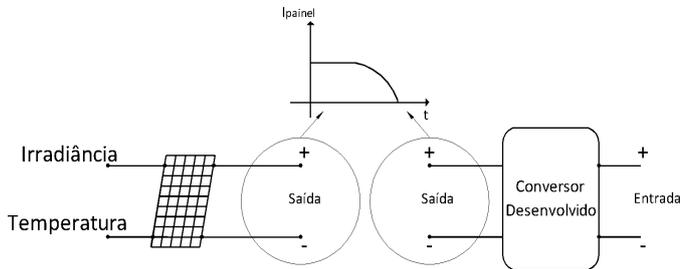


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema a ser desenvolvido.

### III. CARACTERÍSTICA DO PAINEL FOTOVOLTAICO

A Figura 2 apresenta o circuito equivalente de um painel fotovoltaico. A literatura apresenta como opção a representação do modelo ideal. No entanto essa representação simplifica muito o circuito e desconsidera as perdas acarretando uma diferença nos resultados. No modelo real tem-se a consideração das resistências em série e em paralelo, as quais são responsáveis respectivamente pelas perdas por condução e corrente de fuga, tornando assim o modelo próximo a realidade [2].

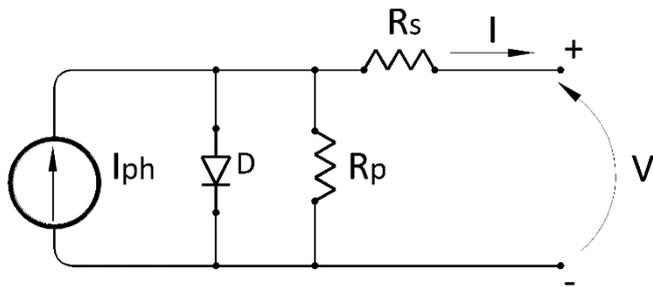


Fig. 2. Circuito equivalente do painel fotovoltaico.

A partir deste circuito é possível chegar na equação que rege o painel aplicando a primeira Lei de Kirchhoff (Lei das Correntes). Fazendo assim as devidas manipulações matemáticas tem-se a equação (1) [3]:

$$I = I_{ph} - I_r * \left( e^{q * \frac{V + I * R_s}{\eta * k * T}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

- V, I – Tensão e corrente de saída da célula fotovoltaica;
- $I_{ph}$  – Fotocorrente;
- $I_r$  – Corrente de saturação reversa da célula;
- $R_s, R_p$  – Resistência série e paralela da célula;
- q – Carga do elétron =  $1.6 \times 10^{-19}$  C;
- $\eta$  – Fator de qualidade da junção p-n;
- k – Constante de Boltzmann =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K;
- T – Temperatura da Célula, em Kelvin.

Com esta equação é possível obter as curvas I x V e P x V da célula fotovoltaica a partir de processos iterativos. Essas curvas variam com o nível de radiação solar ( $W/m^2$ ) e temperatura ( $^{\circ}C$ ). Na Figura 3 estão representados o comportamento da corrente e da tensão quando se varia a temperatura ou a radiação solar de acordo com o *datasheet* Kyocera modelo KD135SX-UPU:

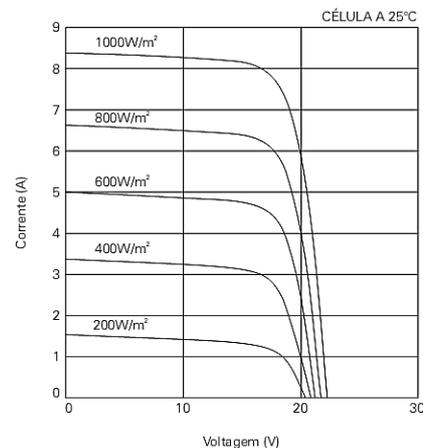


Fig. 3. Curvas do painel IxV para irradiações diferentes.

### IV. CONVERSOR EMULADOR

Foram testados diversos conversores CC-CC com o objetivo de observar qual possui o melhor comportamento para este tipo de aplicação.

Dentre os conversores testados estão os seguintes: Cuk, Buck Síncrono, Sepic, Zeta, Boost e Buck. A partir das simulações foi possível observar que o conversor Buck se comportou melhor para essa aplicação.

Nas Figuras 4 e 5 tem-se o circuito e a resposta do conversor Buck, com o seu controle, o qual é possível observar o comportamento do mesmo perante a esta aplicação:

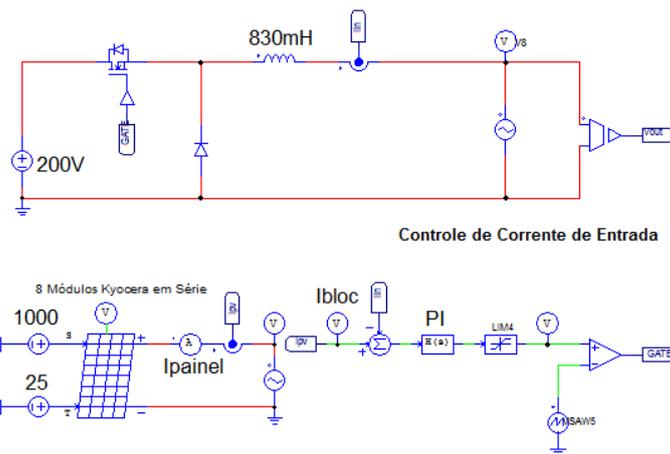


Fig. 4. Circuito do conversor Buck.

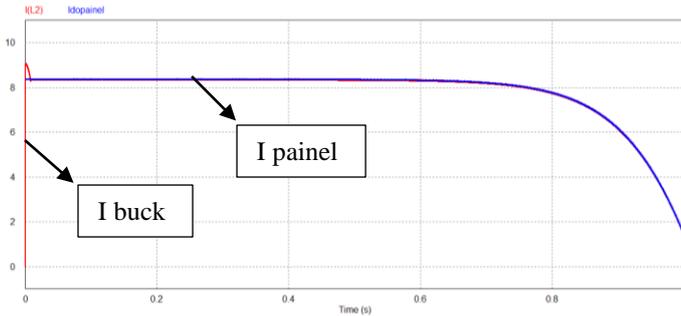


Fig. 5. Corrente do indutor do conversor Buck e corrente extraída do painel.

Nota-se na Figura 5 que a corrente imposta na saída do conversor Buck coincide com corrente extraída do painel fotovoltaico, comprovando sua eficácia para esta aplicação.

## V. EQUAÇÃO DO PAINEL E CONTROLE

No circuito da Figura 4 a referência de corrente do conversor Buck foi obtida através da aquisição da corrente de saída do painel fotovoltaico. Para fins práticos esta referência de corrente deve ser obtida através de um modelo do painel. Caso fosse utilizado a equação equivalente do painel fotovoltaico seria necessário empregar métodos numéricos o que tornaria uma programação muito complexa e dispendiosa para o controle. Portanto, optou-se por obter a equação do painel utilizando uma equação polinomial de tal forma a representar matematicamente o comportamento da corrente *versus* a tensão do painel fotovoltaico. Simulou-se 8 painéis em série com uma irradiação de 1000W e temperatura de 25°C para utilizar os pontos gerados da curva  $I \times V$ . Adquiridos os pontos, utilizou-se a ferramenta de regressão linear para encontrar a equação. Para isso utilizou-se um site especializado [4] em algumas ferramentas matemáticas e obteve-se a seguinte equação (2).

$$I = -5.8217633 * 10^{12} * V^6 + 2.269578 * 10^9 V^5 - 3.409692 * 10^7 V^4 + 2.427606 * 10^5 V^3 - 8.176954 * 10^4 V^2 + 1.121462 * 10^2 V^1 + 8.330345 \quad (2)$$

Com esta equação é possível gerar a referência de corrente com base na tensão de saída do painel. Destaca-se que ao utilizar outras especificações de arranjos de painel, como o acréscimo de painéis em série ou em paralelo, deve-se mudar a equação (2) de tal forma a representar sua característica  $I \times V$ . Nas Figuras 4 e 5 tem-se a comparação da corrente obtida pela equação em confronto com a corrente do painel:

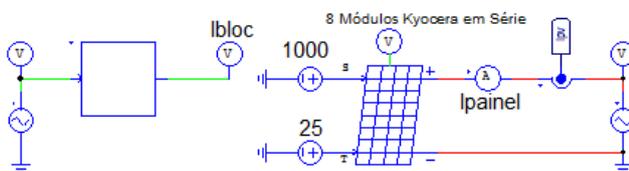


Fig. 6. CBlock utilizado para substituir o painel.

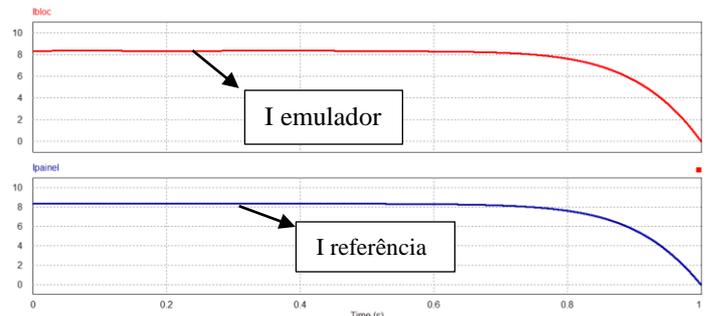


Fig. 7. Resposta do CBlock contendo a equação (2) e a painel I versus V.

A Figura 9 apresenta o diagrama de blocos simplificado da estrutura. Com base em [5] é possível estabelecer a modelagem matemática utilizando-se a técnica de espaço de estado médio de maneira a se obter a equação para  $G_{IL/d}$ . Realizado o projeto do PI pode-se inseri-lo no circuito de controle juntamente com a equação encontrada para obter a referência desejada. Utilizando-se a ferramenta *Sisotool* do software MATLAB versão 2014, projetou-se o compensador da malha de corrente  $G(s)$  que tem a seguinte função de transferência (3):

$$G(s) = 1.1492 * \frac{s + 2340}{s} \quad (3)$$

Através da função de transferência mostrada em (3) foi possível analisar a estabilidade do controlador baseando-se no método do lugar das raízes e do diagrama de Bode.

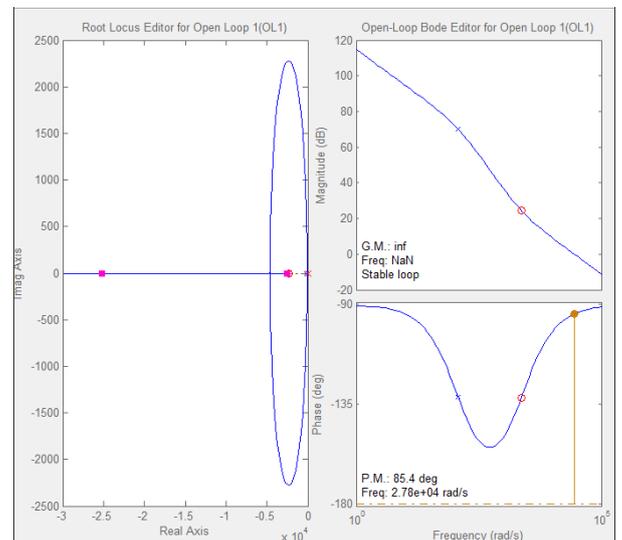


Fig. 8. Análise de Estabilidade.

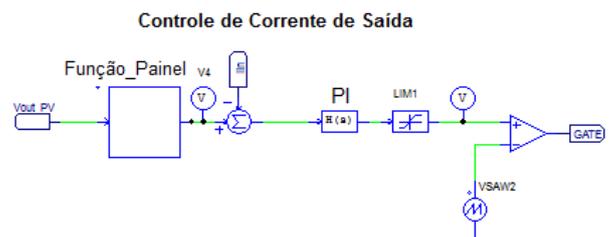


Fig. 9. Controle do Buck emulador.

Na entrada do bloco denominado “Funcao\_Painel” tem-se o referencial de tensão ( $V_{out\_PV}$ ) obtido da saída do conversor Buck. Para este valor de tensão tem-se uma corrente correspondente, calculada através da equação (2) que está embarcada no bloco “Funcao\_Painel”. Este valor de corrente será a referência do conversor Buck. Dessa forma, através de um controle PI tradicional, a corrente de saída do conversor Buck será forçada a igualar-se à corrente de referência.

## VI. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Com o circuito estruturado foi possível dar início às simulações para comprovação dos gráficos e teorias já apresentadas.

Para alimentar o conversor Buck optou-se por um utilizar um retificador de onda completa não controlado tradicional com um filtro LC. Para projeto do filtro LC utilizou-se o método de variáveis de estado [5].

Na Figura 10 é apresentado o circuito completo do emulador.

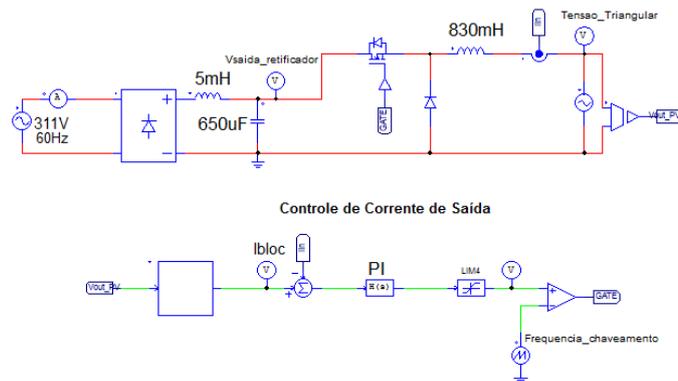


Fig. 10. Circuito emulador Buck.

A Figura 11 ilustra a curva da corrente emulador juntamente com sua referência para a tensão variando deste 0V até o valor em circuito aberto.

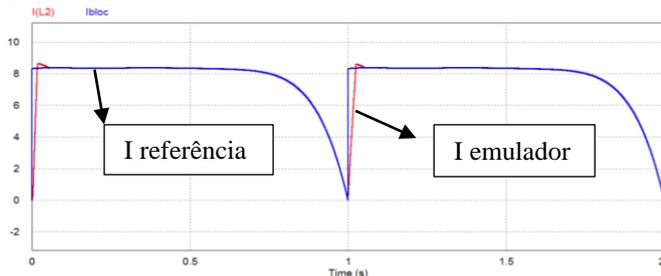


Fig. 11. Curva da corrente do emulador e saída da equação (2).

A Figura 12 ilustra a curva de corrente *versus* tensão para um conjunto formado por 8 painéis conectados em série. Nota-se que a única diferença é a transição do ponto de tensão de circuito aberto para o ponto de corrente de curto circuito, onde se tem uma variação brusca dos parâmetros de referência.

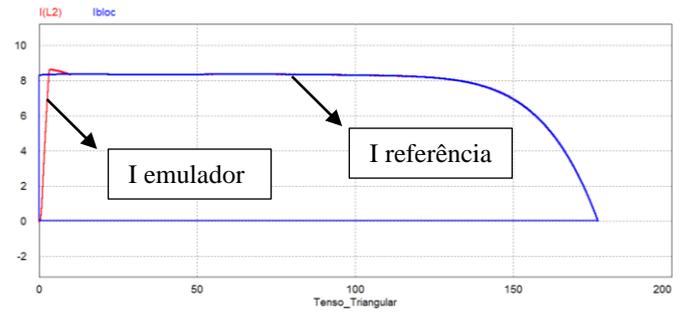


Fig. 12. Curva Corrente versus Tensão do emulador.

Na Figura 13 tem-se a tensão do retificador de alimentação do conversor Buck. Apesar de não regulada a tensão de saída do retificador manteve-se estável, girando em torno de 300V, sendo este nível de tensão adequado para operação do conversor Buck.

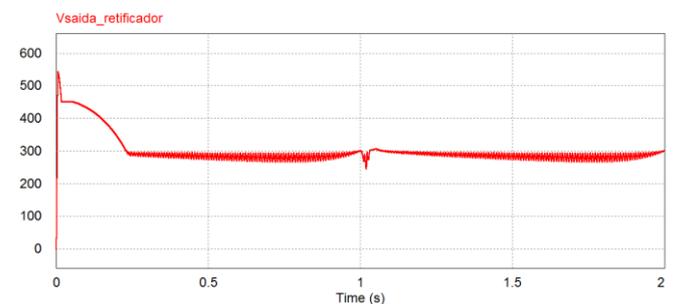


Fig. 13. Tensão do retificador no emulador.

## VII. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta a simulação de um emulador de painel solar utilizando um conversor CC-CC alimentado por um retificador não controlado tradicional. Os resultados revelaram que o conversor Buck foi eficiente no que tange a emulação da curva  $I \times V$  verificada em painéis fotovoltaicos típicos além de comprovar os resultados já apresentados por [3], tornando adequada sua utilização na construção de um emulador solar. Na versão final deste trabalho os autores apresentarão os resultados computacionais desta estrutura aplicada em um sistema de *smart-grids* típico para fins de comparação entre a resposta do emulador proposto com a resposta obtida através do conjunto de painéis fotovoltaicos.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PRIEB, C., W., M., “Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos” Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Junho 2002.
- [2] LIMA, G. B. “Análise E Desenvolvimento De Um Novo Conversor CA-CC Híbrido Monofásico Com Controle Digital Baseado Em DSP”. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [3] DOLA, D., TAUFIK, “Simulation of A Photovoltaic Emulator” IEEE North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-7, Setembro de 2010.

- [4] AUTOR DESCONHECIDO.  
“<http://www.xuru.org/rt/PR.asp#CopyPaste>” acessado em 21/08/2015.
- [5] COSTA, A. V., “Proposta de Técnica para Aumento de Suportabilidade a afundamentos Temporários de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável”, Doutorado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.