

# ESTUDO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PUNTO DE POTÊNCIA MÁXIMA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ATUANDO COMO FONTE AUXILIAR DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Milena Bortolini Hell<sup>1</sup>  
Marcio C. B. P. Rodrigues<sup>2</sup>  
Henrique A. C. Braga<sup>3</sup>

## RESUMO

Neste trabalho, são analisadas e modeladas algumas características de painéis solares fotovoltaicos, visando tornar mais próxima da realidade a simulação computacional de circuitos conversores estáticos que permitam a utilização da energia solar fotovoltaica como fonte auxiliar de energia em veículos elétricos. A curva característica do modelo matemático de painel fotovoltaico obtido para um modelo específico é comparada com a curva fornecida pelo fabricante. São apresentados resultados de simulação computacional do sistema de controle da tensão de saída de um conversor CC-CC buck, visando sua aplicação na carga de baterias de um veículo elétrico. Adicionalmente, são discutidas características do método de rastreamento do ponto de potência máxima de painéis fotovoltaicos conhecidos como perturbação e observação.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica. Veículos Elétricos. Controle de Conversores Estáticos. Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

## INTRODUÇÃO

Atualmente, devido às intensas alterações climáticas previstas para as próximas décadas, são crescentes a preocupação e os esforços da comunidade mundial em relação à diminuição das emissões de poluentes na atmosfera, especialmente dos gases de efeito estufa, resultantes da queima de combustíveis fósseis (RAHMAN, 2003). Parte significativa das emissões de tais gases nas áreas urbanas se deve aos milhares, chegando a milhões em algumas regiões, de veículos que utilizam combustíveis derivados do

---

1 Bolsista BIC/UFJF

2 Professor do IF Sudeste MG

3 Professor Orientador - Departamento de Circuitos Elétricos da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, e-mail: henrique.braga@uff.edu.br

petróleo como fonte de energia (CETESB, 2011), (QUEIROZ, 2006). Nesse contexto, a possibilidade de substituição da frota de veículos atual por veículos elétricos (VE's), alimentados por baterias, surge como um importante fator para a melhoria das condições ambientais, nos centros urbanos, uma vez que não emitem gases de efeito estufa (QUEIROZ, 2006), (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000). Entretanto, limitações tecnológicas relacionadas às baterias, como energia e potência específicas baixas (em comparação à gasolina), vida útil e tempo de recarga, somadas a altos custos são dificultadores da popularização e produção, em escala comercial, desse tipo de VE (MILLER, 2009). Tais limitações podem ser, consideravelmente, minimizadas com o uso de uma fonte de energia auxiliar, geralmente um motor a combustão interna (que opera de forma otimizada, associado a um gerador elétrico, com baixas emissões de gases de efeito estufa), a bordo do veículo (MAGGETTO e VAN MIERLO, 2000), (EHSANI et al., 2000). Nesse caso, tem-se um veículo elétrico híbrido (VEH). Outra categoria de veículo elétrico híbrido é o VEHP (veículo elétrico híbrido *plug-in*), que permite a recarga de suas baterias por meio de sua conexão com a rede elétrica. Células a combustível e supercapacitores também vêm sendo utilizados como unidades auxiliares de fornecimento de energia em VE's (FERREIRA et al., 2008).

Outra possibilidade de fonte auxiliar de energia em HEVs, que vem sendo discutida em alguns trabalhos científicos, é a energia solar fotovoltaica (GADDY, 2003), (SHARAF et al., 2007), (EGIZIANO et al., 2007), (PREITL et al., 2007). Nesse caso, a energia seria gerada durante os períodos de trânsito e de estacionamento do veículo em locais abertos, durante o dia, podendo suprir parte de sua demanda. Módulos fotovoltaicos de filmes finos (silício amorfo) poderiam ser adaptados ao teto do veículo sem comprometer sua estética, fator muito importante na produção de veículos comerciais (GADDY, 2003).

Apesar de alguns estudos indicarem que em países como o Brasil, com bons índices de irradiação solar, o uso da energia fotovoltaica poderia contribuir de forma significativa no aumento da eficiência de veículos elétricos híbridos (GADDY, 2003), esse tipo de fonte de energia não vem sendo utilizado no sistema de propulsão de veículos elétricos comerciais, mas apenas na alimentação de serviços auxiliares. Isso se deve à superfície reduzida de um automóvel, que possibilitaria a instalação de um arranjo fotovoltaico de potência modesta, insuficiente para propulsão elétrica, mas adequada para, por exemplo, contribuir na climatização do habitáculo do automóvel (TOYOTA MOTORS, 2013). Nesse contexto, este trabalho estuda as características de painéis fotovoltaicos, bem como os conversores estáticos necessários para sua aplicação como fontes auxiliares de energia em veículos elétricos.

## ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

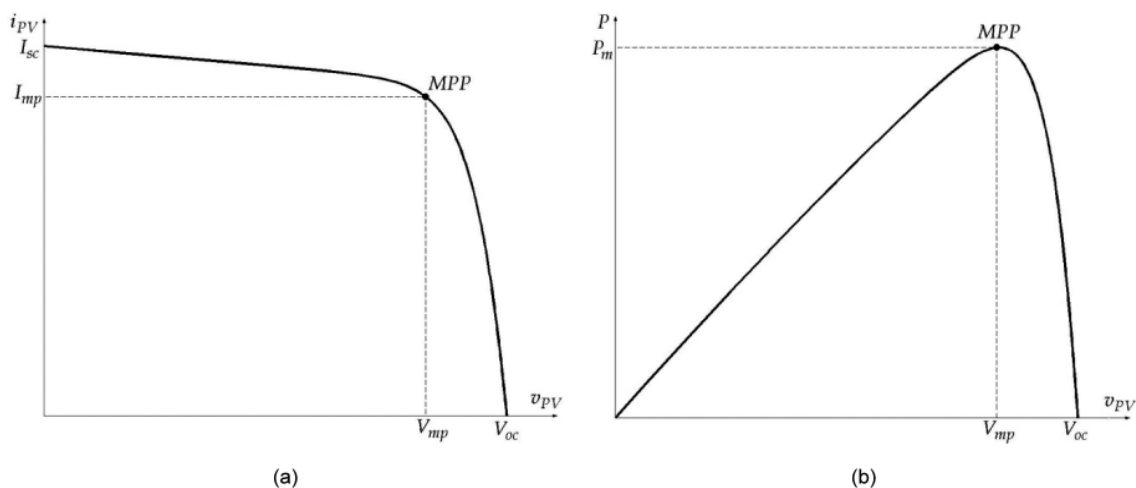
A conversão solar fotovoltaica (PV do inglês *photovoltaic*) é uma das formas de energia alternativa mais citada para substituir os métodos convencionais de geração de eletricidade. Atualmente, a energia fotovoltaica é utilizada nas mais diversas áreas, com o objetivo de geração de energia elétrica aliada às seguintes vantagens: simplicidade de instalação, facilidade de expansão, elevado grau de confiabilidade do sistema, redução das perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumo e pouca necessidade de manutenção. Além disso, nos sistemas fotovoltaicos, a geração de energia elétrica é realizada de forma silenciosa e não poluente.

Um módulo fotovoltaico é um dispositivo que realiza diretamente a conversão de energia solar em elétrica. A condição padrão, na qual são apresentadas as características dos módulos fotovoltaicos,

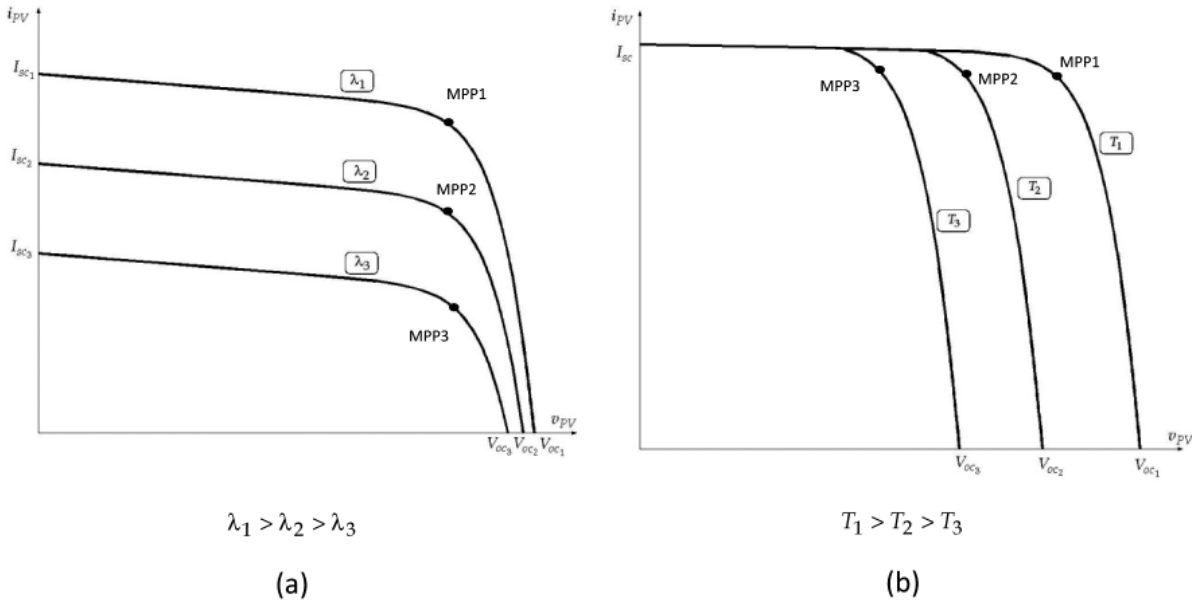
é definida para uma insolação de  $1000 \text{ W/m}^2$  (irradiação recebida na superfície terrestre em um dia claro, ao meio-dia) e uma temperatura nas células de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nessas condições, se dá a potência máxima do módulo fotovoltaico, cuja unidade usual é Wp (Watt-pico) (CRESESEB, 2006). Na Fig. 1, são mostradas as curvas características típicas de um painel fotovoltaico. O ponto, onde o painel é capaz de fornecer sua potência máxima, usualmente denominado MPP (do inglês *maximum power point*), destacado nos dois gráficos, deve preferencialmente ser o ponto de operação de um sistema fotovoltaico, otimizando seu funcionamento.

A intensidade luminosa e a temperatura do painel têm grande influência sobre o comportamento de um módulo fotovoltaico. A corrente gerada aumenta com o aumento da irradiação solar ( $\lambda$ ) que atinge o painel. Já o aumento da temperatura ( $T$ ) faz com que a eficiência do módulo caia, abaixando assim os pontos de operação de máxima potência gerada. Essas variações podem ser observadas na Fig. 2. Como a irradiação solar incidente e a temperatura em um módulo fotovoltaico variam em função das condições climáticas, externas ao sistema fotovoltaico, torna-se necessária a existência de um sistema de rastreamento (ou busca) do ponto de seu ponto de potência máxima, garantindo sua operação otimizada. Esse sistema de rastreamento é usualmente denominado MPPT (do inglês *maximum power point tracker*) e pode aumentar consideravelmente a energia gerada em um módulo fotovoltaico, sem representar aumento significativo do custo total do sistema de conversão energia (ANDERSEN e ALVSTEN, 1995), (ENSLIN et al., 1997). Diversos métodos e algoritmos para MPPT são encontrados na literatura técnica, dentre os quais se destacam a técnica de perturbação e observação (ENSLIN et al., 1997) e condutância incremental (KOUTROULIS et al., 2001).

O gerenciamento da operação de um sistema fotovoltaico é realizado por meio de conversores estáticos, que podem ser conversores CC-CC ou inversores, dependendo da aplicação. Neste trabalho, o estudo está direcionado ao controle das tensões de um conversor CC-CC *buck*, conectado a módulos solares para rastreamento de seus pontos de potência máxima.



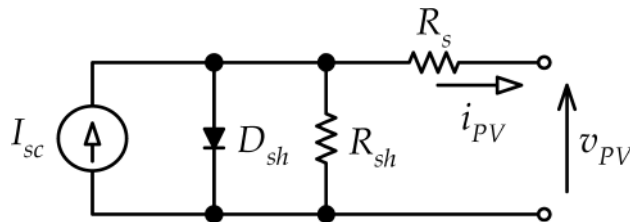
**Figura 1** - Curvas características típicas de um painel fotovoltaico (a) Corrente-tensão; (b) Potência-tensão



**Figura 2** - Variação das características de um painel PV devido à (a) Variação na irradiação solar incidente; (b) Variação na temperatura das células

## MODELAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

A curva característica apresentada na Fig. 1(a) é representada analiticamente por (1) e pode ser sintetizada através do circuito equivalente exibido na Fig. 3 (KOUTROULIS et al., 2001). No desenvolvimento das simulações computacionais do sistema de controle do conversor CC-CC *Buck*, foi utilizado um modelo matemático descrito em (CASARO e MARTINS, 2008), implementado aqui, utilizando-se os *softwares* MATLAB e PSIM. Os parâmetros desse modelo foram baseados no módulo fotovoltaico de silício policristalino BP SX-120, de 120 W<sub>p</sub>, fabricado pela BP Solar, disponível no Laboratório Solar Fotovoltaico da UFJF. Na Fig. 4(b), é mostrada uma família de curvas características corrente-tensão simulada, utilizando-se o modelo implementado, para  $\lambda=1000$  W/m<sup>2</sup> e diversas temperaturas. Tais curvas apresentam, como pode ser facilmente observado, grande conformidade com a equivalente família de curvas, fornecida pelo fabricante do módulo fotovoltaico, apresentada na Fig. 4(a) (BP SOLAR, 2001).



**Figura 3** - Circuito equivalente de um painel PV.

$$i_{PV} = I_{sc} - \frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{R_{sh}} - I_{os} e^{\left[ \frac{q}{AKT} (v_{PV} + i_{PV} R_s) - 1 \right]} \quad (1)$$

onde:

$i_{PV}$ e $v_{PV}$	Corrente e tensão no painel
$I_{sc}$	Corrente gerada (curto-circuito)
$R_s$	Resistência série
$R_{sh}$	Resistência “ <i>shunt</i> ”
$I_{os}$	Corrente de saturação reversa do painel
$A = 1,92$	Fator de idealidade da junção p-n
$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K	Constante de Boltzmann
$T$	Temperatura das células, K

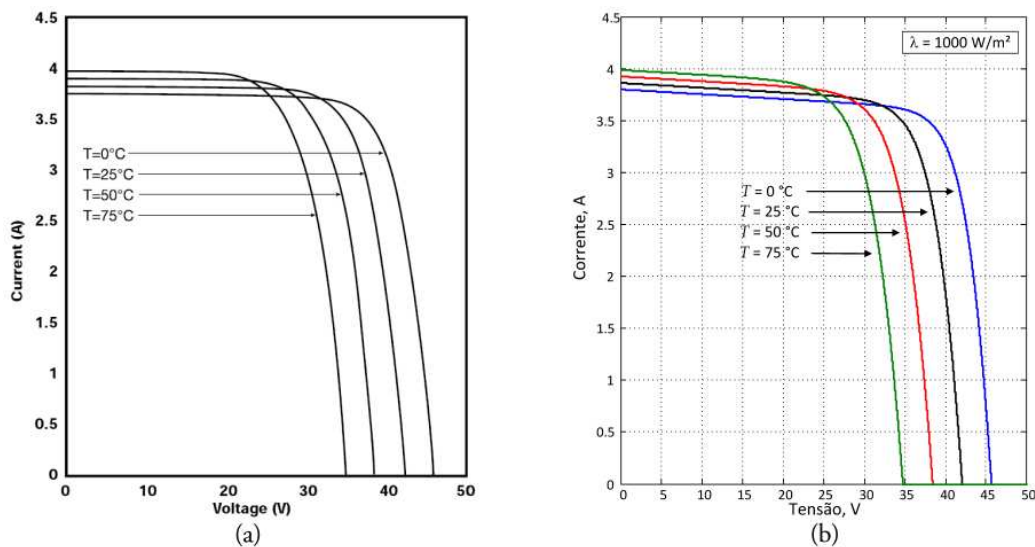


Figura 4 - Curvas características corrente-tensão do módulo fotovoltaico BP SX-120 ( $\lambda=1000 \text{ W/m}^2$ )  
 (a) Folha de dados do fabricante; (b) Modelo matemático implementado.

## CONVERSOR CC-CC BUCK

Para realizar o aproveitamento da energia solar fotovoltaica é necessário realizar o condicionamento dos níveis de tensão e corrente gerados pelos módulos fotovoltaicos, de modo que possam ser adequados às características da carga a ser alimentada. É importante salientar que apenas um módulo fotovoltaico de 120 Wp, como o utilizado nas modelagens deste trabalho, não é capaz de alimentar todos os serviços auxiliares de um veículo, mas pode contribuir, por meio da sua energia gerada, para melhoria do desempenho do VE (GADDY, 2003).

Neste trabalho, como o objetivo inicial seria alimentar uma bateria automotiva de 12 V, foi utilizado um conversor CC-CC *buck*, cujo circuito é mostrado na Fig. 5, possibilitando adequação de níveis de tensão e corrente, além de proporcionar o MPPT e o controle da carga dessa bateria. Para isso, foi realizado o projeto desse conversor, de acordo com a metodologia descrita em (MEHL, 2013), utilizando-se os parâmetros apresentados na Tab. 1. O sistema de controle desse conversor foi dimensionado utilizando-se controladores “Tipo 2”, conforme procedimento proposto em (VENABLE, 1983). A Fig. 6 traz resultados de simulação (obtidos com o *software* PSIM) do comportamento

dinâmico do conversor projetado. São consideradas duas condições: durante a energização do circuito e na presença de perturbações na tensão de referência (em  $t = 5$  ms, variando de 12 V para 13 V), na tensão de entrada (em  $t = 8$  ms, variando de 34 V para 35 V) e na carga (em  $t = 11$  ms, variando de 10 A para 11 A). Em todos os casos testados em simulação, o conversor apresentou bom desempenho dinâmico, com baixo sobressinal e rápida acomodação.

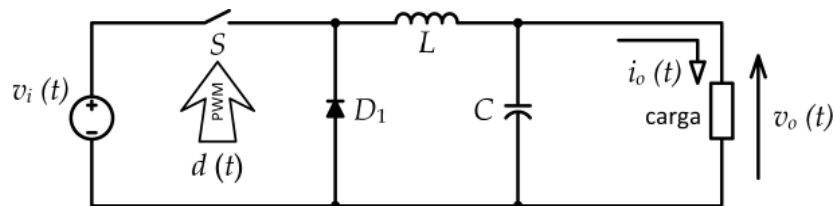


Figura 5: Circuito elétrico do conversor estático CC-CC buck

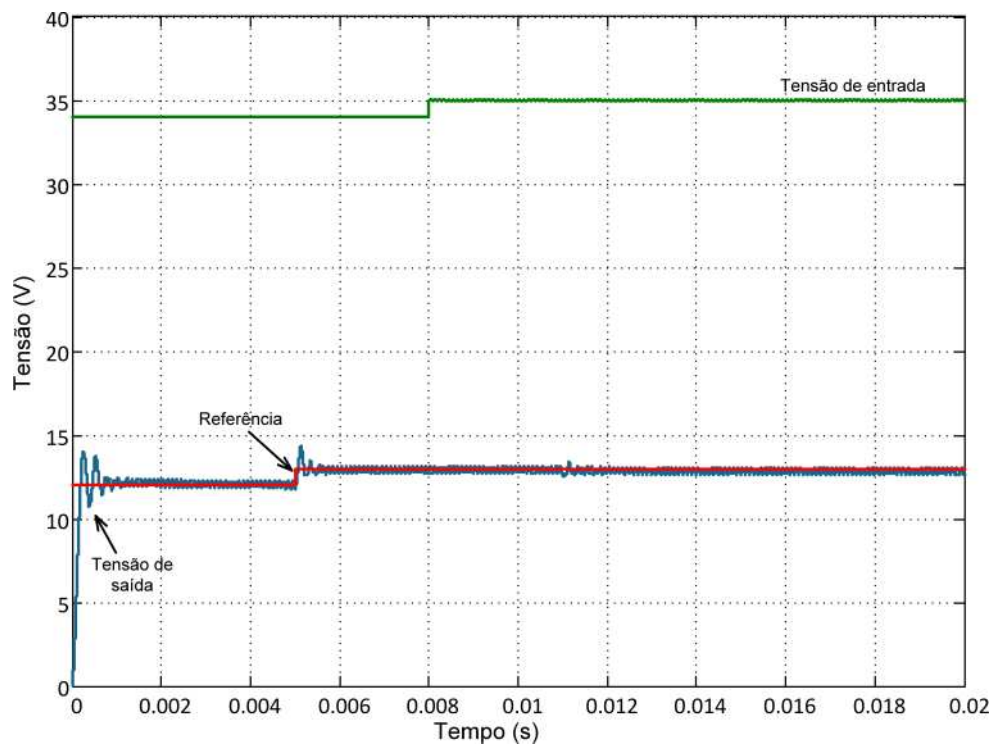


Figura 6 - Controle da tensão de saída do conversor buck.

Tabela 1 - Parâmetros do Conversor CC-buck

Tensão de entrada	34 V
Tensão de saída	12 V
Potência de saída	120 W
Frequência de chaveamento	25 kHz
Ondulação de corrente no indutor	10%
Máxima ondulação na tensão de saída	1%

## RASTREAMENTO DO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA

Neste trabalho, foi estudado o algoritmo MPPT conhecido como “Perturbação e Observação” (P&O) (SOBREIRA JR. et al., 2011), que consiste em medir a potência gerada, aplicar uma perturbação e observar o comportamento do sistema. Esse método pode ser realizado pela aplicação de um aumento ou de diminuição na razão cíclica (D) do conversor CC-CC buck, verificando se a potência gerada aumentou ou diminuiu. Partindo do ponto  $P_1$ , conforme ilustrado na Fig. 7(a), aplica-se uma perturbação  $\Delta p$  por meio da variação da razão cíclica do conversor (D). Em seguida, observa-se o comportamento da potência na entrada do conversor CC-CC (por exemplo, observa-se um aumento da potência gerada). Continua-se a aplicação de sucessivas perturbações nesse mesmo sentido, enquanto for observado aumento da potência gerada. Quando o sistema passa pelo ponto de potência máxima, a potência convertida pelo painel começa a diminuir (ponto  $P_2$ ). Nesse instante, muda-se a direção da perturbação  $\Delta p$  aplicada, reduzindo a razão cíclica do conversor CC-CC. Tem-se, então, o conversor operando entre os dois pontos adjacentes ao ponto de potência máxima. Na Fig.7(b) é apresentado o fluxograma do algoritmo do método P&O. Apesar de existirem outras técnicas de rastreamento de máxima potência, o método P&O é muito confiável e bastante adotado na prática (KNOPF, 1999), devendo ser empregado, com implementação em microcontrolador, em um desdobramento futuro deste trabalho. Para uma revisão detalhada sobre outros métodos, pode-se recorrer a Brito et al. (2013).

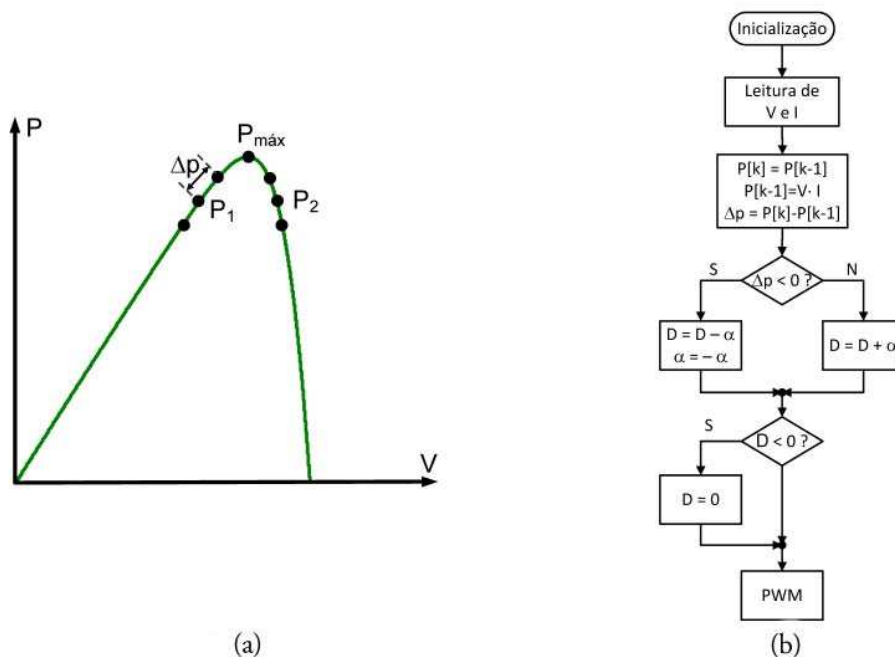


Figura 7 - Método de rastreamento do ponto de potência máxima P&O. Representação gráfica; (b) Fluxograma

## CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de arranjo fotovoltaico para sua simulação de forma integrada a conversores chaveados. Foram utilizados para esse fim os *softwares* MATLAB e PSIM. A simulação do modelo proposto, segundo os dados de catálogo do módulo comercial BP SX-120, resultou em características muito similares às originais. Também foram apresentados os conceitos

necessários para a execução de projetos e simulações de sistemas de controle por modo tensão de conversores estáticos.

Finalmente, foi apresentada uma forma de rastrear o ponto de potência máxima por meio do método da perturbação e observação (P&O), que basicamente consiste em medir a potência de entrada, aplicar uma perturbação e observar o comportamento do sistema. O aproveitamento otimizado da potência gerada em painéis fotovoltaicos permite maior eficiência para a utilização em diversas aplicações como, por exemplo, no uso da energia solar fotovoltaica como fonte auxiliar de em veículos elétricos.

A implementação experimental do sistema proposto, com o MPPT realizado por microcontrolador, além de sua aplicação na alimentação de serviços auxiliares de veículos elétricos são propostas de trabalhos futuros.

## STUDY OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUES FOR PHOTOVOLTAIC MODULES OPERATING AS AN AUXILIARY POWER SOURCE IN HYBRID ELECTRIC VEHICLES

### ABSTRACT

This paper analyzes and models some solar photovoltaic modules characteristics in order to allow more realistic computer simulations of power converters applied to the employment of photovoltaic energy as auxiliary power units in electric vehicles. The mathematical model I-V curve obtained for a specific photovoltaic module is compared to the curve from device datasheet. Simulation results of DC-DC buck converter output voltage control, in order to investigate its application on electric vehicle battery recharge, are presented. Additionally, perturbation and observation maximum power point tracking method characteristics are also discussed.

**Keywords:** Solar Photovoltaic Energy. Electric Vehicles. Power Converter Control. Maximum Power Point Tracking (MPPT).

### REFERÊNCIAS

ANDERSEN, M.; ALVSTEN, B.. 200 W Low Cost Module Integrated Utility Interface for Modular Photovoltaic Energy Systems. *Proceedings of the 21<sup>st</sup> IEEE IECON (IECON'95)*, p. 572-577, 1995.

BRITO, M. A. G.; SAMPAIO, L. P.; MELO, G. A. ; CANESIN, C. A. Contribuição ao estudo dos principais algoritmos de extração da máxima potência dos painéis fotovoltaicos. *Eletrônica de Potência*, Campo Grande, v. 17, n. 3, jun./ago. 2012.

BP SOLAR. *BP SX 120 120 - Watt Multicrystalline Photovoltaic Module*. 2001.



- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C.. Simulação de Arranjos Fotovoltaicos Integrados à Eletrônica de Potência. In: *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA'2008)*. Juiz de Fora: UFJF, 2008.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). *1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo*, São Paulo, 2011.
- CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito). *Energia Solar – Princípios e Aplicações*. 2006. Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_solar.htm](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar.htm)>. Acesso em: 02 de janeiro de 2013.
- EGIZIANO, L.; GIUSTINIANI, A.; LISI, G., PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.. Experimental Characterization of the Photovoltaic Generator for a Hybrid Solar Vehicle. In: *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, p. 329-334, June, 2007.
- EHSANI, M.; Y. GAO; EMADI, A.. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles - Fundamentals, Theory, and Design*. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- ENSLIN, J. H. R.; WOLF, M. S.; SNYMAN, D. B.; SWIEGERS, W.. Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 44, n. 6, 1997.
- FERREIRA, A. A.; J. A. POMILIO; G. SPIAZZI, SILVA, L. A.. Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. n.1, p. 107-115, 2008.
- GADDY, E. Photovoltaics for Hybrid Automobiles. In: *Proceedings of the Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka, Japan, 2003.
- KNOPE, H. *Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle*. 1999. Master of Science in Electrical and Computing Engineering Thesis, Portland State University, USA, 1999.
- KOUTROULIS, E.; KALAITZAKIS, K.; VOULGARIS, N. C.. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 15, n. 1, p. 46-54, 2001.
- MAGGETTO, G.; VAN MIERLO, J. Electric and Electric Hybrid Vehicle Technology: A Survey. In: *Proceedings of the 2000 IEE Seminar on Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles*, p. 1-11, 2000.
- MEHL, E. L. M.. *Aplicação do Modelo Linear de Vorpérian ao Conversor tipo Buck*. Disponível em <[www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/modelamento-buck.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/modelamento-buck.pdf)>. Acesso em: 02 de janeiro de 2013.
- MILLER, J. M. Energy Storage System Technology Challenges facing Strong Hybrid, Plugin and Battery Electric Vehicles. In: *Proceedings of the 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'09)*, Dearborn, p. 4-10, 2009.

PREITL, Z.; BAUER, P.; KULCSAR, B.; RIZZO, G.; BOKOR, J. Control Solutions for Hybrid Solar Vehicle Fuel Consumption Minimization. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Vehicle Symposium*. Istanbul, 2007.

QUEIROZ, J. F. *Introdução do veículo híbrido no Brasil: evolução tecnológica aliada à qualidade de vida*. 2006. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2006.

RAHMAN, S.; Green Power: What Is It and Where Can We Find It. *IEEE Power & Energy Magazine*, v. 1, n. 1, p. 30-37, 2003.

SHARAF, A. M.; OZKOP, E.; ALTAS, I. H. A Hybrid Photovoltaic Array-Battery Powered EV-PMDC Drive Scheme. In: *Proceedings of the 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference*, 2007.

SOBREIRA JR, P. A.; VILLALVA, M. G.; A. A., FERREIRA, BARBOSA; P. G., BRAGA, H. A. C.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT, E. Comparative Analysis of Current and Voltage-Controlled Photovoltaic Maximum Power Point Tracking. In: *Anais do XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP'2011)*. Bonito: UTFPR. 2011.

TOYOTA MOTORS, *Toyota Prius Hybrid*. 2013. Disponível em: <<http://www.toyota.com/prius-hybrid/features.html>>. Acesso em: 02 de janeiro de 2013.

VENABLE, H. D. The K Factor: A New Mathematical Tool for Stability Analysis and Synthesis. In: *Proceedings of 10th Powercon*. San Diego, p. 22-24, March 1983.