

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO RASTREAMENTO DE POTÊNCIA MÁXIMA (MPPT), UTILIZANDO O MÉTODO DE VARIAÇÃO DE CONDUTÂNCIA

Fabio L Albuquerque¹, Sérgio B. Silva², Marcio A. Tamashiro³, Anderson R. Piccini⁴, Geraldo C. Guimarães⁵, Adélio José de Moraes⁶, Guilherme Henrique Bernardes Cunha⁷

^{1,2}Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia do Tocantins, Palmas – Tocantins, ^{3,4,5,6,7} Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – Minas Gerais

¹ fabiolima@ifto.edu.br, ² sergio@ifto.edu.br, ³ tamashiro@ifto.edu.br, ⁴ anderson@ifto.edu.br, ⁵ gcaixeta@ufu.br, ⁶ ajmoraes@ufu.br, ⁷ guilhermhbcunha@gmail.com.

Resumo – Normalmente, os sistemas fotovoltaicos (FV) sofrem alteração em sua produção de energia elétrica devido à variação do índice de insolação e temperatura ambiente, tendo a necessidade destes possuir um controle em sua saída para alterar a tensão fazendo com que funcione sempre com melhor desempenho. Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar o princípio de funcionamento do rastreamento de potência máxima (MPPT) de um sistema FV utilizando o Método da Variação da Condutância. Serão apresentados os conceitos teóricos o fluxograma e o circuito a ser implementado computacionalmente.

Palavras-Chave - Rastreamento de potência máxima (MPPT), sistema FV, Método da Variação da Condutância.

Abstract - The photovoltaic systems (PV) usually undergo changes in their electrical energy production due to the variation of the insolation index and the ambient temperature. Therefore, the PV systems demand a control in their output in order to change the voltage to make them always perform in a better way. Thus, the objective of this paper is to present the principle of the operation of the maximum power tracking (MPPT) of a PV system using the Incremental Conductance Method. There will be presented the theoretical concepts, the flowchart and the circuit to be implemented computationally.

Keywords – Maximum Power Point Tracking (MPPT), PV System, Incremental Conductance Method.

I. INTRODUÇÃO

O aproveitamento de energias renováveis, obtida pela transformação direta de recursos naturais como a força do vento, a energia hidráulica, a biomassa e a energia solar, tem sido uma importante opção na atual conjuntura mundial. Na

Europa, prevê-se que cerca de 15% do consumo total de energia poderá ser atendido a partir da energia renovável, para o ano de 2020 [1]. Com base em dados internacionais, o principal campo de aplicação do sistema FV hoje tem sido a conexão à rede elétrica, especialmente em regiões desenvolvidas como Japão, USA e Europa [2]. Destacam-se entre eles a Alemanha, com o programa “100.000 Telhados Solares” e programas para instalações de sistemas FVs em escolas financiados pelo governo e pelas concessionárias de energia locais [2 – 5].

De acordo com dados divulgados pela SolarBuzz LLC, uma empresa de consultoria sobre energia solar, houve um crescimento de instalações de sistemas solares fotovoltaicos no mundo de aproximadamente 5,65 GW somente em 2008. Este valor é 75% maior do que em 2007. Entre os países que mais instalaram estes sistemas em 2008 está a Espanha com 2,46 GW, a Alemanha com 1,86 GW, Estados Unidos com 0,36 GW, Coreia do Sul com 0,28 GW, Itália com 0,24 GW e Japão com 0,23 GW. Assim, no ano de 2008, a potência instalada no mundo era de 13,8 GW [6], passando para 37 GW em 2010 [7].

Essa expansão da instalação de sistemas solares fotovoltaicos em países da Europa se dá devido aos incentivos dos governos em parceria com as concessionárias de energia elétrica. Pode-se citar como um dos exemplos de incentivo a “nova lei de micro-geração” estabelecida em Portugal. Esta lei implica que a eletricidade produzida por micro-geração utilizando sistemas solares fotovoltaicos deve ser remunerada com um valor seis vezes superior à que se paga em suas contas mensais nos primeiros cinco anos [8].

A Índia também aprovou, de acordo com o seu plano de ação para mudança climática, um plano de US\$ 19 bilhões para fazer do país uma liderança global em energia solar nas próximas três décadas. O projeto prevê uma expansão massiva da capacidade solar instalada e objetiva reduzir o preço da eletricidade gerada por energia solar, igualando-o ao custo da energia produzida por combustíveis fósseis até 2030. A capacidade de geração elétrica com energia solar instalada seria elevada de seus atuais 5 MW para 20 GW até 2020, para 100 GW até 2030 e 200 GW até 2050 [9].

Funcionários do governo chinês assinaram no mês de setembro de 2009 um acordo com uma fábrica de painéis solares norte-americana para construir uma usina de energia fotovoltaica de 2.000 MW no deserto da Mongólia. O projeto da First Solar, a ser concluído em 2019, representa a maior planta solar do mundo. Esse é parte de um parque energético renovável de 11.880 MW a ser construído em Ordos, na



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Mongólia Interior. O parque renovável de Ordos inclui 6.950 MW de energia eólica, 3.900 MW de fotovoltaica, 720 MW de solar térmica e 310 MW de biomassa [10].

No Brasil, o qual é privilegiado pela alta incidência de insolação em seu território e pelas grandes reservas de quartzo para a produção de silício de grau solar, usados na fabricação de painéis solares fotovoltaicos [11], a tendência da aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede ainda não se faz presente de forma significativa. Isso ocorre devido em parte ao custo elevado e por não haver legislação quanto ao uso destes sistemas. Mas já existem iniciativas que sinalizam um aumento da importância desse tipo de sistema. O Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos (GT – GDSF), criado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2008, está estudando requisitos e incentivos para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica para que, em um futuro breve, o Brasil possa ter painéis instalados em telhados de residências e comércio, como já ocorre nos Estados Unidos, Japão e Europa [6]. Este grupo, que terá que elaborar os estudos para propor condições e sugerir critérios para a nova política para a geração fotovoltaica conectada à rede, é coordenado pelo Departamento de Desenvolvimento Energético do MME e também participam dele o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel), a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Salvador (Unifacs) [12]. Os mesmos pesquisadores da UFSC mostraram também que, a partir de 2013, algumas regiões do Brasil já poderão ter preços equivalentes da energia solar fotovoltaica quando comparada com o preço da energia fornecida pela rede elétrica convencional [13].

Em paralelo com as normas a serem elaboradas por este grupo de pesquisa, está tramitando no congresso o “**PROJETO DE LEI Nº 630, de 2003**”, o qual tem a finalidade de constituir fundo especial, com a destinação de recursos para o financiamento da pesquisa e produção de energia elétrica e térmica a partir das fontes solar e eólica [14]. Segundo o autor, o ex-deputado Roberto Gouveia, o aproveitamento da energia solar e eólica tem o potencial de aumentar a segurança energética, propiciar o acesso ao fornecimento de eletricidade a propriedades rurais e comunidades isoladas, evitar a emissão de gases do efeito estufa e promover desenvolvimento tecnológico e econômico. Nesse projeto, há também uma proposta que estabelece que as concessionárias do serviço de distribuição de energia elétrica ficarão obrigadas a adquirir a energia elétrica excedente, produzida por consumidores a partir da fonte solar e injetada na rede, até o limite mensal de 2.000 kWh. É previsto também um desconto de 20% nas tarifas de energia elétrica para aqueles consumidores que instalarem sistemas de aquecimento solar.

De acordo com o Substitutivo ao Projeto de Lei No 630, de 2003, a produção de energia elétrica proveniente das fontes eólica, solar, geotérmica, maremotriz e das ondas do mar terá seu valor remunerado, acrescido de cinquenta por cento da tarifa real cobrada dos consumidores. O projeto prevê, ainda, uma compensação financeira para quem instalar painéis fotovoltaicos em suas casas [15].

Outro passo importante para o Brasil aconteceu no Núcleo Tecnológico de Energia Solar da Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Rio Grande do Sul (NT-Solar). Este, com tecnologia inovadora e totalmente brasileira, começou a fabricar placas fotovoltaicas em agosto de 2009. Porém, para produção em escala industrial será necessária ainda a criação de uma indústria. Se criada, há a possibilidade de a produção anual ser entre 10 a 50 MW [16], fazendo com que o Brasil tenha condições de se tornar um dos líderes tanto na produção de equipamentos para geração solar fotovoltaica como na própria geração de energia dessa fonte.

Dentro desse contexto, quando todas essas projeções vierem a ser realidade em relação ao crescimento dos sistemas fotovoltaicos, será necessário ampliar e aprimorar os conhecimentos relacionados ao comportamento deste tipo de geração distribuída quando conectado à rede elétrica. Nesse caso, o principal problema consiste na aleatoriedade da geração primária de energia, pois esta, além de produzir eletricidade apenas no período diurno, sofre alterações de acordo com o índice de insolação e temperatura ambiente. Assim, a necessidade de instalar junto a este sistema um rastreador de potência máxima (MPPT) que ajusta a tensão do sistema FV no valor de máxima produção de potência quando variar o índice de insolação e temperatura é necessário para ter um melhor aproveitamento do sistema a ser implementado.

II. DESEMPENHO DA CÉLULA SOLAR FV COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E A INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

A temperatura e a intensidade de radiação solar são os fatores mais importantes quando se considera a utilização das células solares para a geração de eletricidade.

Em relação aos efeitos da temperatura sobre uma célula FV, o desempenho desta é apresentado na Figura 1, onde se verifica um pequeno aumento na corrente e uma considerável diminuição na tensão de circuito aberto quando da ocorrência da elevação de temperatura.

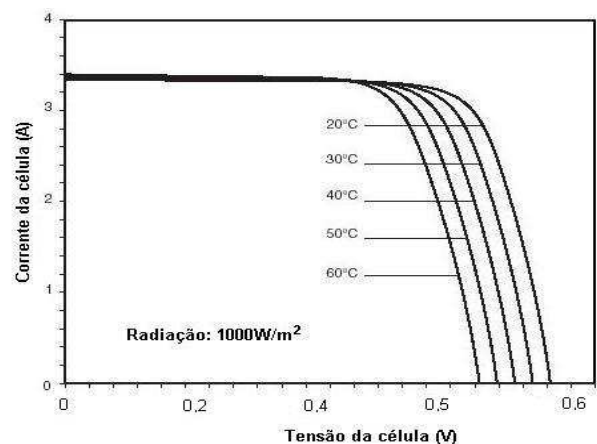


Figura 1: Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura

Observa-se também pela Figura 2 que, com o aumento da temperatura, a potência máxima da célula sofre um decréscimo considerável.

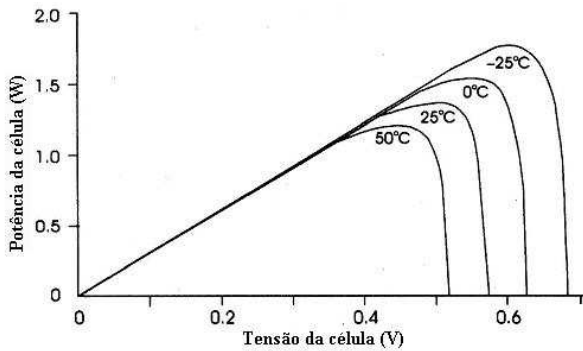


Figura 2: Dependência da característica potência x tensão com a temperatura

Para o índice de insolação, de acordo com a Figura 3, com o aumento deste, a corrente aumenta linearmente e a tensão de circuito aberto logaritmicamente.

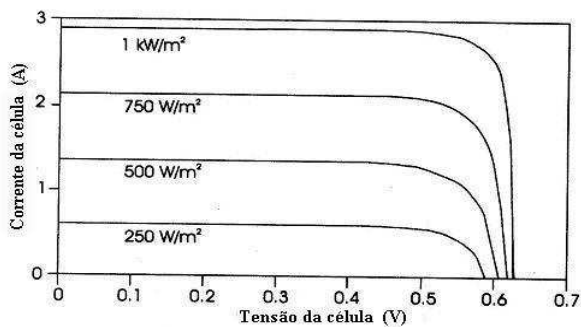


Figura 3: Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação

Observa-se também, através da Figura 4, que a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento do índice de iluminação.

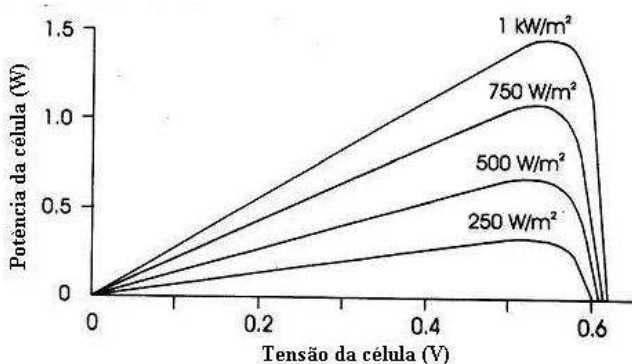


Figura 4: Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação

Assim, tanto em relação à variação da temperatura da célula FV quanto em relação à variação do índice de insolação, a tensão do ponto de potência máxima (Figuras 2 e 4) sofre alteração, diminuindo o rendimento desta.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MPPT

O princípio de funcionamento do MPPT utilizado baseia-se no método da variação da condutância [17]. Este método consiste na variação do ponto de atuação do sistema em torno do ponto da tensão de máxima potência do sistema FV (VPPM), sendo observado pelas derivadas instantâneas de potência e tensão. Assim, para $dP/dV > 0$ o sistema passa a atuar em um ponto no qual V é maior que o anterior e para $dP/dV < 0$ o sistema atua em um ponto com V menor que o anterior. Então, este método atua na verificação do declive da curva de potência em função da tensão, de forma a encontrar o ponto de potência máxima, no qual o declive é zero, como mostra a Figura 5 [18].

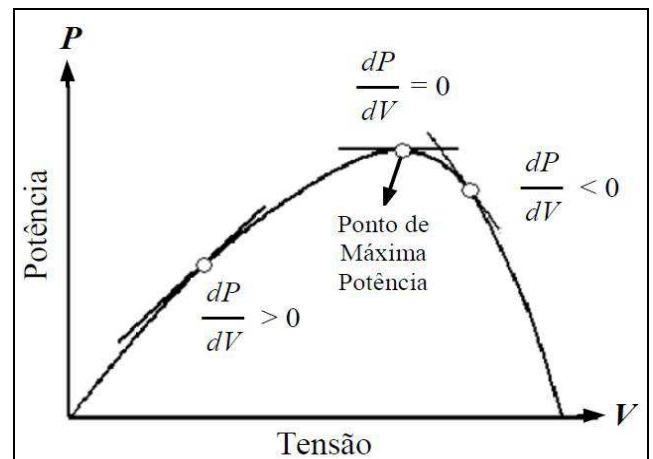


Figura 5: Curva P-V com ponto de máxima potência.

O fluxograma do método de controle utilizado é mostrado na Figura 6.

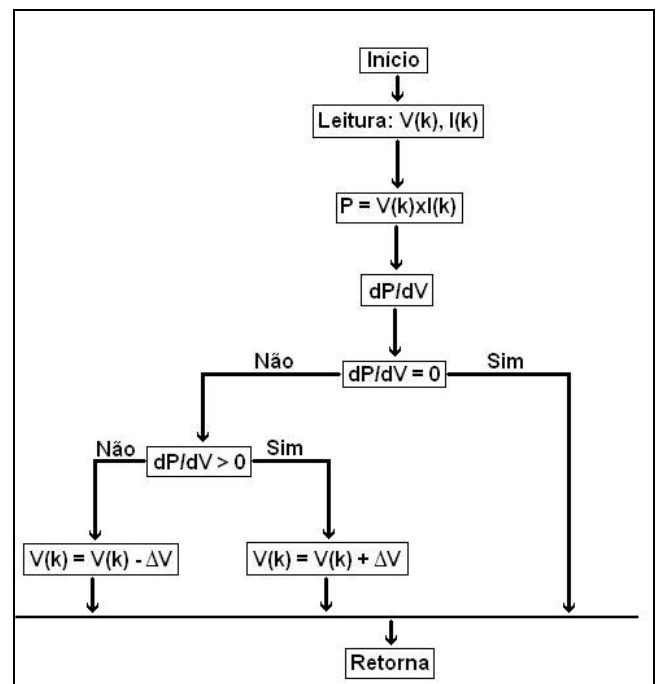


Figura 6: Fluxograma do algoritmo do controle utilizado no método da variação da condutância.

IV. CIRCUITO DA UNIDADE DE CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC.

O conversor utilizado para realizar a variação da tensão VFV, buscando o ponto de geração de potência máxima é o boost, utilizando o chaveamento PWM. Neste conversor, a tensão VFV no capacitor do lado do sistema FV é variável, mantendo constante a tensão V_{CC} do capacitor do lado do inversor, como mostra a figura 7.

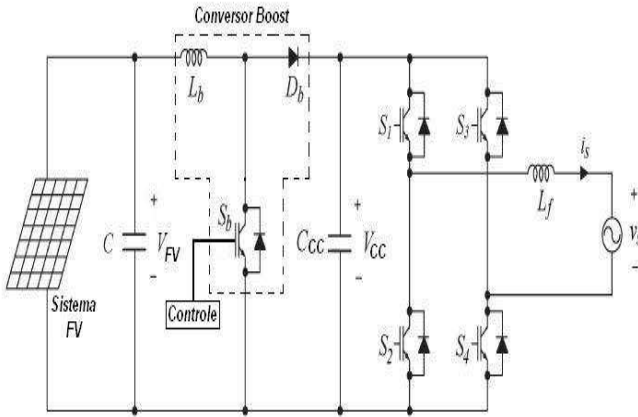


Figura 7: Conversor CC-CC boost conectado ao sistema FV

A tensão VFV é regulada pelo boost conforme a equação 1 [19].

$$VFV = V_{CC} \times \left(\frac{T_{OFF}}{T_{OFF} + T_{ON}} \right) = V_{CC} \times \left(\frac{T_{OFF}}{T} \right) \quad (1)$$

Onde:

$T = T_{OFF} + T_{ON}$ Período total do ciclo de

chaveamento;

T_{ON} Período do ciclo em que a chave está conduzindo (fechada);

T_{OFF} Período do ciclo em que a chave está isolada (aberta).

Observa-se pela equação 1 que a tensão VFV aumenta com o aumento do período do ciclo em que a chave está aberta e diminui com o aumento do período em que a chave está fechada.

Quando o sistema FV está operando em um ponto inferior ao de máxima potência, em que $VFV < VPPM$ ou $dP/dV > 0$, o controle deverá atuar de forma a aumentar o período do ciclo em que a chave do conversor está aberta, proporcionando o aumento da tensão de saída do painel FV. Para o caso em que $VFV > VPPM$ ou $dP/dV < 0$, o período do ciclo em que a chave do conversor está aberta deve diminuir, aumentando o período em que a chave do conversor deve estar fechada, visando a diminuição no valor da tensão do painel FV.

Assim, a tensão VFV do sistema FV é mantida no valor de geração de máxima potência através da variação do chaveamento PWM do conversor boost.

Na Figura 8 é mostrado o diagrama do circuito de controle de chaveamento do conversor CC-CC. O princípio de funcionamento deste controle é baseado nas referências [18] e [20].

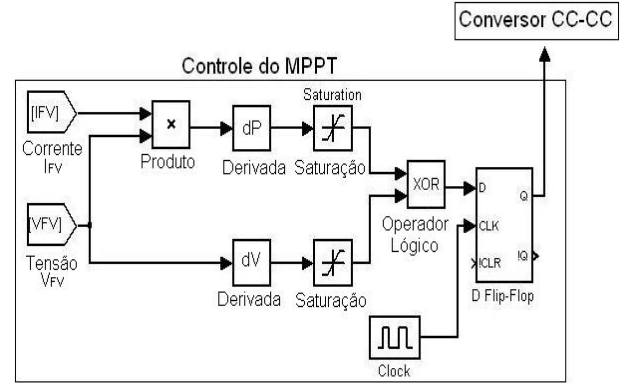


Figura 8: Diagrama do circuito de controle de chaveamento do conversor CC-CC

É observado pelo diagrama da Figura 8 que o controle do chaveamento do conversor CC-CC boost é realizado através de sensores de tensão e corrente do sistema FV, que ao multiplicá-los e passarem pelo derivador obterão os valores das derivadas da tensão e potência (dV, dP). Esses valores de derivadas podem ser negativos ou positivos, de acordo com a posição do gráfico da potência do sistema FV, como é mostrado na figura 5.

Nos blocos de saturação, os valores positivos são limitados em 1 e os valores negativos em 0. Assim, quando o operador lógico receber os sinais das derivadas da tensão e da potência este fornecerá o sinal 0 ou 1 para o flip-flop de acordo com a combinação mostrada nas Tabelas 1 e 2.

TABELA 1

Princípio de funcionamento da lógica do controle

Situação	dP	dV	Saída do bloco de saturação		Saída do operador lógico
			dP	dV	
$V < VMPP$	> 0	> 0	1	1	0
$(dP/dV) > 0$	< 0	< 0	0	0	0
$V > VMPP$	< 0	> 0	0	1	1
$(dP/dV) < 0$	> 0	< 0	1	0	1

TABELA 2

Princípio de funcionamento da lógica do controle

Situação	Saída do operador lógico	Chave	T_{OFF}	VFV
$V < VMPP$	0	Aberta	Aumenta	Aumenta
$(dP/dV) > 0$	0	Aberta	Aumenta	Aumenta
$V > VMPP$	1	Fechada	Diminui	Diminui
$(dP/dV) < 0$	1	Fechada	Diminui	Diminui

De acordo com as Tabelas 1 e 2, observa-se que com esta lógica de chaveamento através do operador lógico, controlando o Flip-Flop, faz-se a variação do T_{OFF} , buscando sempre o valor de tensão para o ponto de fornecimento de potência máxima (MPPT) em determinada condição de irradiância e temperatura.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o comportamento do desempenho dos sistemas FVs de acordo com a variação do índice de insolação e temperatura. Além disso, foi mostrado o princípio de funcionamento do rastreamento de potência máxima (MPPT) de um sistema FV, utilizando o Método da Variação da Condutância. Este método foi modelado para que o sistema FV trabalhe sempre em condições de fornecimento de potência máxima para as condições ambientais. Assim, através da análise teórica do fluxograma e do circuito a ser implementado, observa-se a praticidade e eficiência do método.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cresesb “A Estratégia do Reino Unido Para Energias Renováveis: 15% da energia gerada será proveniente de fontes renováveis até 2020” julho 2010. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/informe14.pdf. Acesso em: 12/09/2010.
- [2] Erge, T., Hoffmann, V. V., Kiefer K.; “The German Experience With Grid-Connected PV Systems” Solar Energy, vol. 70, nº 6 pp 479-487, 2001.
- [3] Cocian Luís F. E., Santos João C. V.; “Sistemas Fotovoltaicos: Uma alternativa para a geração de energia elétrica” Revista Lumière, julho de 2000.
- [4] Decker B., Jahn U.; “Performance of 170 Grid Connected PV Plants in Northern Germany – Analysis of Yields and Optimization Potentials”. Solar Energy, Vol. 59 pp. 127-133, 1997.
- [5] Conti, S.; Raiti, S.; Tina. G.; Vagliasindi, U.; “Integration of Multiple PV Units in Urban Power Distribution Systems” Solar Energy 75 (2003) 87-94.
- [6] Cresesb informe 13, “Um breve panorama das energias solar fotovoltaica e eólica no Brasil e no mundo”. Dezembro 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/informe13.pdf>. Acesso em: 12/09/2009.
- [7] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), “2010, Market Outlook” Disponível em: http://www.epia.org/uploads/media/Market_Outlook_2010.pdf. Acesso em: 23/09/2011.
- [8] FF Solar: Sistemas de Energias Alternativas Portugal, Lda. Disponível em: <http://www.microgeracao.info/index.php/forum?func=view&id=13&catid=3#13>. Acesso em: 12/04/2009.
- [9] Clipping Energia Global - Ano I - No.21. “Índia aprova plano de US\$ 19 bi por liderança em energia solar”. Disponível em: <http://www.energiaglobal.com.br/clipping/ano01/num21/#Noticia>. Acesso em: 15/08/2010.
- [10] Clipping Eletrônico - Departamento de Comunicação Social - PUC-Campinas. 09/09/2009. “China fará maior usina solar do mundo no deserto mongol” Disponível em: <http://www.puccamp.br/servicos/detalhe.asp?id=46782>. Acesso em: 10/12/2009.
- [11] Inovacao Tecnologica. “O que é necessário para que o Brasil brilhe na energia solar?” Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=o-necessario-brasil-brilhe-energia-solar&id=010175090701>. Acesso em: 12/08/2009.
- [12] Ministério de Minas e Energia – MME. “Relatório do Grupo de Trabalho em Sistemas Fotovoltaicos – GT-GDSF/ Ministério de Minas e Energia”. Brasília – Brasil, 2009. 222 p.
- [13] Inovação Tecnológica. “Energia solar no Brasil pode ser vantajosa a partir de 2013”. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-solar-no-brasil-pode-ser-vantajosa-a-partir-de-2013&id=010115081002>. Acesso em: 12/01/2010.
- [14] PROJETO DE LEI No 630, de 2003. “Comissão Especial Destinada a Proferir Parecer ao Projeto de Lei Nº 630, de 2003, do Senhor Roberto Gouveia, que Altera o ART. 1º da Lei Nº 8.001, de 13 de Março de 1990, Constitui Fundo Especial Para Financiar Pesquisas e Fomentar a Produção de Energia Elétrica e Térmica a Partir da Energia Solar e da Energia Eólica, e dá Outras Providências” (PL 0630/03 – FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA).
- [15] Clipping Energia Global - Ano I - No.29. “Câmara vota projeto que incentiva uso de fontes renováveis” Disponível em: <http://www.energiaglobal.com.br/clipping/ano01/num29/#Noticia>. Acesso em: 12/10/2010.
- [16] Clipping Energia Global – Ano I – No 25. “País produz placas que transformam energia solar em elétrica”. Disponível em: <http://www.energiaglobal.com.br/clipping/ano01/num25/#Noticia>. Acesso em: 12/10/2010.
- [17] Hua, C., Shen, C., “Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system.” In: Power Electronics Specialists Conference, 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, vol. 1, pp. 86–93.
- [18] Trindade, M., Martins, J. S., Afonso J. L., “Sistema para Otimização da Extração de Energia de Painéis Solares Fotovoltaicos”. ENER’05 – Conferência Sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal, Figueira da Foz, Portugal. 5-7 de Maio de 2005, ISBN: 972-8822-02-02, pp. 1.165-1.170.
- [19] Ahmed, A., “Eletrônica de Potência” Tradução: Bazán Tecnologia e Linguística; Revisão Técnica: João Antonio Martino. São Paulo – SP. Prentice Hall, 2000.
- [20] Carrijo, D. R., Ferreira, R. S., Guimarães, S. C. JR., Camacho, J. R., “Uma Proposta de Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de um Pannel Fotovoltaico”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. 12-16 de setembro de 2010, Bonito-MS.