

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS PRINCIPAIS ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DA MÁXIMA POTÊNCIA DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Moacyr A. G. de Brito¹, Leonardo P. Sampaio, Guilherme de A. e Melo, Carlos A. Canesin²

Universidade Estadual Paulista – UNESP

Laboratório de Eletrônica de Potência – Departamento de Engenharia Elétrica

Ilha Solteira, São Paulo, Brasil

e-mails: moa.brito@gmail.com¹, canesin@dee.feis.unesp.br²

Resumo - Este artigo apresenta as principais técnicas de extração da máxima potência dos painéis fotovoltaicos (MPPT), realizando comparações no que diz respeito à quantidade de energia extraída em relação à máxima disponível (FR - Fator de Rastreamento), ondulação de potência em regime permanente, respostas dinâmicas e uso de sensores. Através das plataformas MatLab/Simulink® e DSpace, um conversor boost CC-CC foi implementado e conectado a um emulador de painéis solares a fim de verificar apropriadamente cada algoritmo. Os principais resultados experimentais para os métodos convencionais e também para os novos algoritmos desenvolvidos, denominados de IC baseado em PI e P&O baseado em PI, são apresentados. Além disso, a resposta dinâmica e o FR são avaliados através de uma plataforma amigável ao usuário, que é capaz de programar remotamente os simuladores de painéis fotovoltaicos e realizar o cálculo instantâneo do FR. Finalmente, um perfil de insolação diária típica é utilizado para avaliar os principais algoritmos.

Palavras-Chave – Energia Solar, Painéis Fotovoltaicos, Técnicas de MPPT, MPPT Adaptativos, Eficiência Energética.

CONTRIBUTION FOR THE STUDY OF THE MAIN PV MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHODS

Abstract – This paper presents evaluations among the most usual MPPT techniques, doing meaningful comparisons with respect to the amount of energy extracted from the photovoltaic panel in relation to the available power, PV power ripple, dynamic response and use of sensors. Using MatLab/Simulink® and DSpace platforms, a digitally controlled boost DC-DC converter was implemented and connected to a Solar Array E4350B simulator in order to verify the analytical procedures. The main experimental results are presented for conventional MPPT and novel modified MPPT algorithms named IC based on PI and P&O based on PI. Moreover, the dynamic response and the tracking factor are also evaluated using a Friendly User Interface, which is capable of online program power profiles and compute the TF. Finally, a typical daily insulation is used in order

to verify the experimental results for the main PV MPPT methods.

Keywords - PV MPPT Algorithms, PV Power Profile, PV Tracking Factor, Renewable Energy, Photovoltaic Energy.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética aliada à possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais, junto com a crescente preocupação com a preservação ambiental, tem impulsionado pesquisas e o desenvolvimento de fontes de energia renováveis que minimizem o impacto ambiental. Dentre as fontes renováveis, a energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos (PV) é atualmente considerada como sendo a fonte de energia natural mais útil, uma vez que é livre, abundante, não poluente, distribuída ao longo da Terra e participa como fator primário de todos os outros processos de obtenção de energia na terra [1-3]. Além disso, apesar dos fenômenos de reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície da terra seja da ordem de dez mil vezes maior do que o consumo energético mundial [4]. Neste contexto, o conceito de geração distribuída (GD), transformou-se numa possibilidade técnica real e atual, fomentando diversas pesquisas e normatizações em todo o mundo.

Em relação ao Brasil, este possui excelentes níveis de radiação solar, pois está localizado numa faixa de latitude na qual a incidência de radiação solar é muito superior à verificada no restante do mundo, colocando o país em vantagem com relação aos países industrializados no que tange à possibilidade de utilização da energia solar fotovoltaica. Apenas para exemplificar este potencial, a Alemanha, que é um dos países que mais utilizam energia solar, apresenta índices de radiação solar bem inferiores aos do Brasil, onde na região mais favorecida da Alemanha tem-se aproximadamente 1,4 vezes menos radiação solar do que na região menos favorecida do Brasil [4].

Apesar de todas as vantagens apresentadas pela geração de energia através do uso dos painéis fotovoltaicos, a eficiência da conversão de energia é atualmente baixa e o custo inicial para sua implantação ainda é considerada elevada, e desta forma, torna-se necessário a utilização de técnicas de extração da máxima potência (MPPT – Maximum Power Point Tracking) possível destes painéis, para se obter máxima eficiência em operação. Considerando um único PV, é necessário salientar que há apenas um ponto de máxima potência (MPP – Maximum Power Point), e este varia de acordo com as condições climáticas. Os painéis

Artigo submetido em 28/02/2012. Revisado em 09/05/2012. Aceito para publicação em 29/05/2012 por recomendação do editor Henrique A. C. Braga.

fotovoltaicos apresentam características tensão versus corrente não linear, que podem ser observadas na Figura 1, as quais variam de acordo com o nível de radiação solar e de temperatura e que tornam a extração desta máxima potência uma tarefa complexa, considerando-se variações de carga. Para superar este problema, vários métodos para extração da máxima potência têm sido propostos na literatura [5-21], e, uma análise comparativa cuidadosa destes métodos pode resultar em informações importantes para o projeto destes sistemas. Análises parciais foram realizadas em [22-25], entretanto, importantes métodos devem ser adicionalmente analisados com testes mais próximos possível dos reais para compor estratégias mais precisas com relação à escolha do algoritmo a ser implementado.

Portanto, este artigo tem como propósito avaliar as principais técnicas de MPPT apresentadas na literatura, através de modelos em ambiente MatLab/Simulink®, tecendo comparações aprofundadas e mais completas no que diz respeito à quantidade de sensores, ondulação de potência em regime permanente, inicialização do método e quantidade de energia rastreada - FR (que diz respeito à porcentagem de energia solar que pôde ser convertida em elétrica utilizando o algoritmo de MPPT em um dado intervalo de tempo). Além de apresentar os novos algoritmos adaptativos IC e P&O baseados em PI, métodos estes de excelente desempenho.

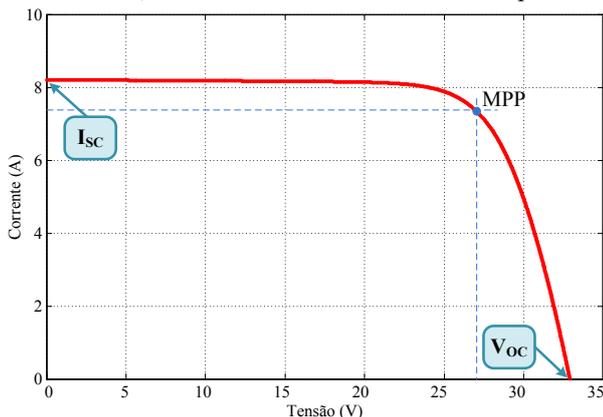


Fig. 1. Característica tensão (versus) corrente não linear do PV.

II. MODELAGEM DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2, onde o modelo mais simples pode ser representado por uma fonte de corrente em antiparalelo com um diodo, e, as não idealidades são representadas pelas inserções das resistências série (R_s) e paralela (R_p).

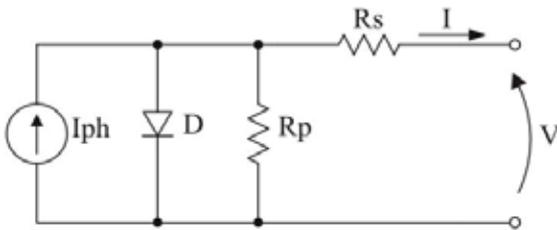


Fig. 2. Circuito equivalente para estudo do PV.

O modelo de simulação do painel fotovoltaico é baseado na corrente de saída de um único PV equivalente, sendo sua equação descrita por (1):

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

Onde: V representa a tensão de saída do PV; I_{ph} a fotocorrente; I_r a corrente de saturação; q a carga elétrica fundamental ($1,6 \times 10^{-19} \text{C}$); η fator de qualidade da junção; T a temperatura (K) e k a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$).

A equação (1) pode ser modificada para apresentar corrente nula quando a corrente I se aproximar da corrente real do PV. Assim (1) se torna (2) em função da própria corrente do PV.

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2)$$

A corrente I, com valor inicial nulo, é utilizada em um processo iterativo que aproxima (2) de sua raiz, utilizando para tal fim o método de Newton-Rhapson (3), o qual procura o zero da função diferenciável.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3)$$

A derivada de (2) é apresentada em (4).

$$f'(I) = -1 - I_r \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} \right] \cdot \frac{q \cdot R_s}{\eta \cdot k \cdot T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (4)$$

De posse das equações (1) a (4) foi criada uma função no ambiente MatLab de forma a simular o PV.

Os principais parâmetros elétricos do PV estão representados na Tabela I.

TABELA I
Parâmetros Elétricos do PV

Potência Máxima	$P_{max} = 200 \text{Wp}$
Tensão no MPP	$V_{MPP} = 26,3 \text{V}$
Corrente no MPP	$I_{MPP} = 7,61 \text{A}$
Tensão de Circuito Aberto	$V_{oc} = 32,9 \text{V}$
Corrente de Curto-Circuito	$I_{sc} = 8,21 \text{A}$
Coefficiente de Temperatura de I_{sc}	$\alpha = 3,18 \times 10^{-3} \text{A}^\circ\text{C}$

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os gráficos de potência versus tensão do painel fotovoltaico em questão, considerando-se variações de irradiação solar e temperatura, respectivamente. As curvas apresentam características não lineares e são fortemente influenciadas pelas condições climáticas.

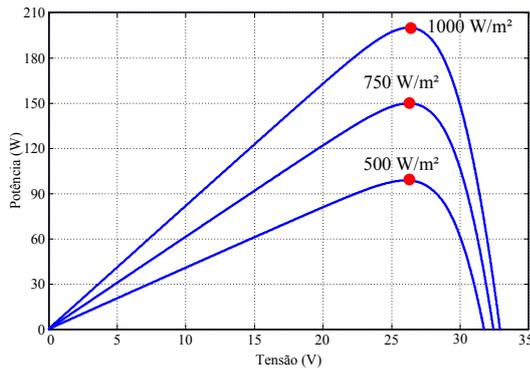


Fig. 3. Característica de potência do PV para diferentes níveis de radiação.

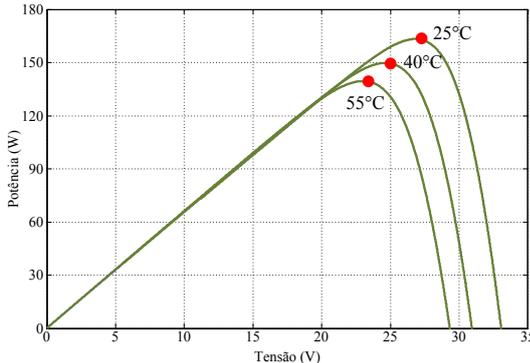


Fig. 4. Característica de potência do PV para diferentes níveis de temperatura.

III. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE MPPT

Nesta seção são apresentados os principais algoritmos de MPPT, sendo eles razão cíclica constante, tensão constante (V_{cte}), perturbação e observação (P&O), P&O modificado, condutância incremental (IC), IC modificado, IC baseado em PI, correlação de ripple, oscilação do sistema e o método baseado em temperatura.

A. Razão Cíclica Fixa

A razão cíclica fixa representa o mais simples dentre os métodos por não necessitar de nenhuma realimentação, onde a resistência aparente da carga é ajustada uma única vez para a potência máxima do painel e não é ajustada novamente, ou seja, este é um método *off-line*.

B. Método V_{cte}

O método V_{cte} utiliza resultados empíricos, indicando que a tensão no MPP (V_{MPP}) é da ordem de 70% a 80% da tensão em circuito aberto (V_{OC}) do painel fotovoltaico para a condição atmosférica padrão. Entre os diversos pontos de MPP (variando-se as condições atmosféricas), a tensão nos terminais do módulo varia muito pouco, mesmo quando a intensidade da irradiação solar se altera. Assim, assegurando-se que a tensão no módulo permaneça constante é possível operar próximo do MPP. Dessa forma, este algoritmo deve ser utilizado em regiões onde a temperatura varia muito pouco. Um ponto positivo é que apenas um sensor de tensão e apenas uma malha fechada convencional são necessários para se obter o MPP.

C. Método P&O

O método P&O opera periodicamente incrementando ou decrementando a corrente de saída terminal do PV (ou tensão) e comparando a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Caso a corrente varie e a potência aumente, o sistema de controle muda o ponto de operação naquela direção; caso contrário, muda o ponto de operação na direção oposta. Uma vez que o sentido para a variação da corrente é conhecida, a corrente é variada a uma taxa constante. Esta taxa é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a menor oscilação em regime permanente [5,6,17,18,22-25]. Uma versão modificada é obtida quando os passos são alterados de acordo com a distância do MPP, resultando em maior eficiência. Este é um excelente método para a busca do MPP e é independente do painel, entretanto, pode sofrer com mudanças bruscas nas condições climáticas. Comparações interessantes acerca de variações na implementação do P&O podem ser verificados em [7].

D. Método IC e IC baseado em PI

Em relação ao método IC, este é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no MPP ($dp/dv=0$), positiva à esquerda e negativa à direita, vide Fig.4 [7,8,22-25]. Este método busca o MPP da mesma forma que o método P&O, e, também apresenta a versão modificada. Assim, o MPP pode ser obtido em função do incremento na condutância do sistema PV. Através de (5) é possível obter as condições do algoritmo IC (6).

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(v.i)}{dv} = i + v \frac{di}{dv} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} = -\frac{i}{v} \quad (a), \quad \frac{\Delta i}{\Delta v} > -\frac{i}{v} \quad (b), \quad \frac{\Delta i}{\Delta v} < -\frac{i}{v} \quad (c) \quad (6)$$

Onde: (a) representa a condição no MPP; (b) representa a condição à esquerda (c) e à direita do MPP.

Em teoria, as oscilações em regime permanente seriam eliminadas uma vez que a derivada da potência em relação à tensão é nula no MPP. Entretanto, valor nulo para esta derivada raramente ocorre devido a resolução dos controladores digitais. Um ponto chave deste método é que ele não perde facilmente o rastreamento do ponto ótimo em face de mudanças climáticas bruscas e ainda pode ser implementado com versões modificadas [9-10].

O algoritmo IC necessita monitorar a tensão e a corrente de saída do PV como no método P&O. Entretanto, não é necessário calcular a potência do PV. Uma contribuição para a implementação deste método está na adição de um simples controlador PI para melhorar seu desempenho através da minimização do erro entre a condutância atual e a condutância incremental, uma vez que o compensador pode ser atualizado/ajustado de acordo com as necessidades do sistema. Além disso, o controlador pode reduzir as oscilações em regime permanente minimizando os problemas relacionados com a resolução dos controladores digitais. Esse método é uma solução adaptativa já que apresenta passos

variáveis e relativamente grandes quando o PV está longe de seu ponto ótimo, depois esses passos vão se reduzindo de acordo com a distância do MPP e finalmente, quando o MPP é encontrado, o ponto de operação do sistema não é mais alterado, a menos que haja mudança nas condições climáticas.

E. Método Beta

O método beta consiste na aproximação do ponto de máxima potência por meio do equacionamento de uma variável intermediária β , sendo esta variável apresentada por (7).

$$\beta = \ln(I_{PV} / V_{PV}) - c \cdot V_{PV} \quad (7)$$

Onde: $c = (q/(\eta \cdot k \cdot T \cdot N_s))$ é uma constante que depende da carga do elétron, fator de qualidade da junção do painel, da constante de boltzmann, da temperatura e da quantidade de células fotovoltaicas em série (N_s).

Conforme as condições de operação do painel se alteram, o valor de β no ponto ótimo permanece quase constante. Desta forma, β pode ser continuamente calculado utilizando-se a tensão e a corrente do painel e realimentado em uma malha fechada convencional com referência constante [11].

F. Método da Oscilação do Sistema

O método da oscilação do sistema se baseia nos princípios da máxima transferência de potência e utiliza as oscilações para determinar o ponto ótimo de operação. No ponto ótimo a razão entre a amplitude da oscilação e o valor médio da tensão é constante. Esse método necessita apenas sensorar a tensão do PV e pode ser implementado facilmente somente com circuitos analógicos [12,13]. Sua implementação é basicamente caracterizada pelo uso de filtros.

G. Método da Correlação de Ripple

O método da correlação de ripple também se baseia nos princípios da máxima transferência de potência e usa as oscilações na potência obtidos através de filtros passa alta a fim de obter o ponto ótimo. Em outras palavras, as ondulações de alta frequência presentes na potência e na tensão são extraídas pelos filtros, os quais são usadas para o computo de dP/dV [14,15]. Assim, o sinal desta derivada é usado como sinal para indicar a correta região de operação e um integrador garante o MPP. Adicionalmente, a correlação de ripple apresenta dinâmicas elevadas convergindo assintoticamente para o ponto máximo e é realmente possível atingir velocidades de convergência com taxas similares à frequência de chaveamento do conversor fotovoltaico, no entanto, sendo limitadas pelo ganho do controladores do conversor.

H. Método da Temperatura

Outra opção interessante está no uso de métodos baseados em temperatura, onde a problemática da variação de temperatura, a qual modifica severamente o MPP, pode ser evitada. Para este fim, um sensor de temperatura de baixo custo pode ser utilizado e sua leitura atualiza o algoritmo de

MPPT, mantendo a busca correta do ponto ótimo. Este método é similar ao método V_{cte} e por este motivo é simples de ser implementado [16,19-21]. A equação que rege o método da temperatura é apresentado por (8).

$$V_{MPP}(t) = V_{MPP}(T_{ref}) + T_{Kvoc}(T - T_{ref}) \quad (8)$$

Onde: V_{MPP} é a tensão de máxima potência, T a temperatura da superfície do PV, T_{Kvoc} o coeficiente de temperatura de V_{MPP} e T_{ref} a temperatura de referência (STC).

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O modelo médio do conversor CC-CC boost foi utilizado para simular a variação de carga controlada em ambiente MatLab/Simulink®. Foi adicionada uma oscilação no modelo médio para representar o efeito do ripple de corrente no indutor. Todos os testes foram realizados considerando-se as mesmas variações de temperatura e de irradiação solar com degraus tanto positivos quanto negativos. A Figura 5 apresenta a resposta de alguns dos melhores algoritmos de MPPT avaliados onde a máxima potência está destacada em azul (linha tracejada) e o gráfico (linha contínua) em vermelho representa a potência extraída.

Com o objetivo de comparar e adequar apropriadamente cada algoritmo de acordo com a aplicação torna-se necessário estipular medidas de desempenho para que possam ser utilizados critérios de comparação. Além das medidas típicas de respostas dinâmicas, também há métricas adicionais que são utilizadas nestes casos. Como a energia transmitida é essencial para a utilização do PV como fonte de energia, uma medida muito importante é o fator de rastreamento (FR), que trata do percentual de energia disponível que foi convertida.

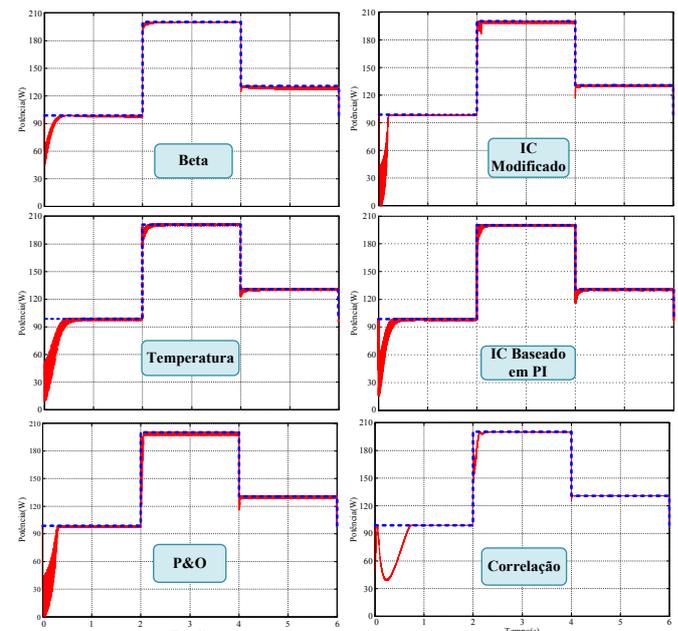


Fig. 5. Potência extraída do PV com alguns dos melhores métodos.

A ondulação (*ripple*) de tensão em regime permanente também é de vital importância, pois há um limite de *ripple*

para que o painel permaneça efetivamente no ponto de máxima potência. Para que o algoritmo de MPP alcance o patamar de 98% de energia extraída, a ondulação de tensão no MPP não deve ultrapassar 8,5% [26]. Outros fatores como simplicidade de implementação, número de sensores e custo também são desejáveis. O FR está apresentado na Figura 6, e de acordo com estes dados, os algoritmos P&O e IC modificados, IC baseado em PI, correlação de ripple, temperatura e beta se destacaram, tendo os algoritmos IC baseado em PI e beta extraído a maior quantidade de energia frente a estas condições, sendo da ordem de 98,5% e 98,3% respectivamente.

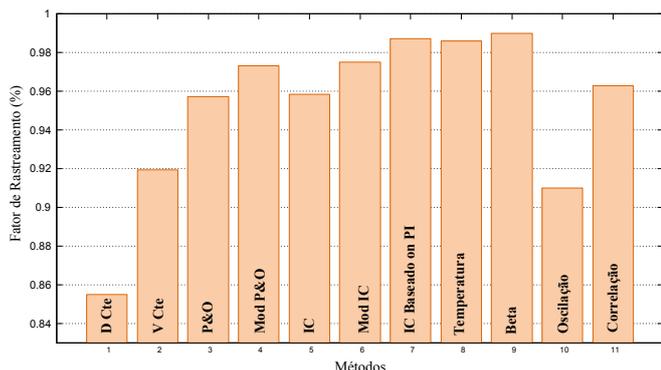


Fig. 6. Percentual de energia extraída do PV - FR.

A ondulação em regime permanente da potência extraída pode ser verificada na Figura 7, tendo como destaque os algoritmos beta, IC baseado em PI e temperatura por possuírem as menores ondulações em regime permanente. Os métodos de MPPT também devem ser comparados com relação à sua resposta dinâmica, ou seja, como se comportam quando a potência no painel é mínima e rapidamente alterada para a condição nominal. Apenas para teste, o degrau resultante de potência varia instantaneamente de 10W para 200W, e, pode ser avaliado através da Figura 8. De acordo com esses resultados, se verifica que os métodos IC baseado em PI, correlação de ripple e IC modificado se destacam, sendo o método IC modificado o que apresenta menor tempo para alcançar o regime permanente de máxima potência, tempo da ordem de 0,2 s. Apenas para destacar, os métodos IC e P&O apresentaram os mesmos índices de qualidade, uma vez que se baseiam no mesmo princípio de busca de MPPT, que é dP/dV nulo no MPP [27].

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O arranjo experimental composto pelos emuladores de PVs, osciloscópio, conversor e laptop podem ser visualizados na Figura 9.

Os algoritmos foram implementados de forma digital através da plataforma dsPACE ACE1104, a qual emula o DSP TMS320F240, e os principais resultados experimentais são apresentados nesta seção. Os degraus de irradiação e de temperatura são configurados através do emulador fotovoltaico E4350B. O conversor Boost opera com uma frequência de chaveamento de 50kHz enquanto que o sistema de controle apresenta frequência de amostragem em 10kHz.

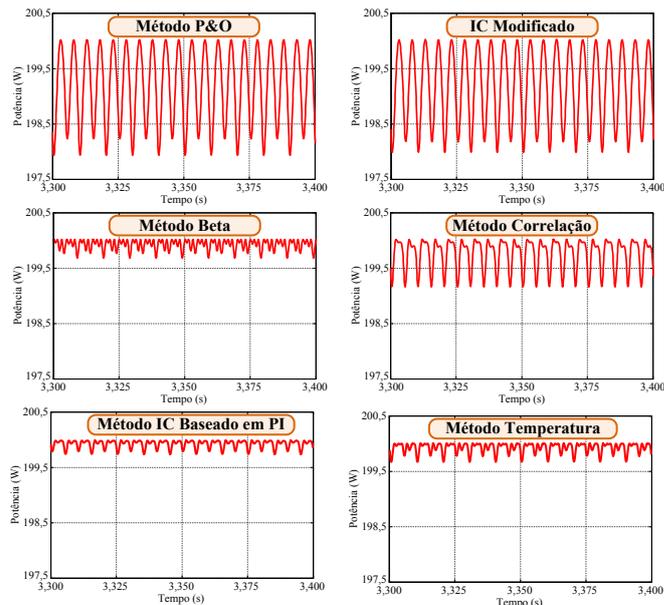


Fig. 7. Oscilação de potência em regime permanente (200Wp).

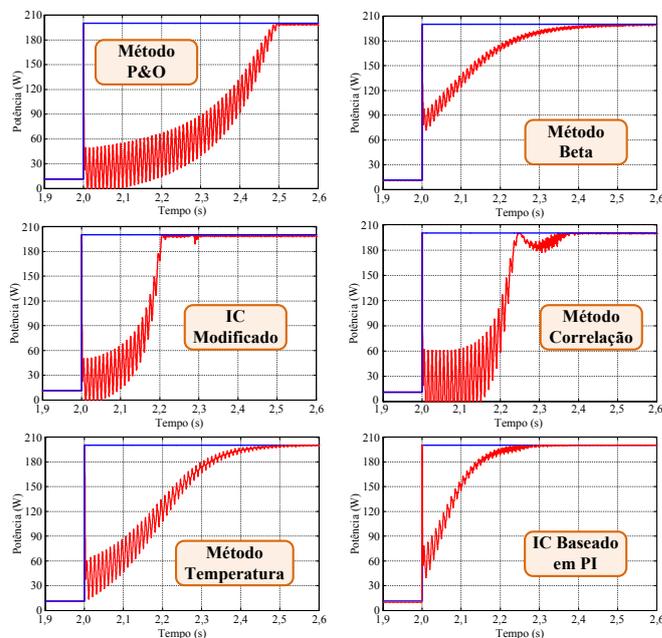


Fig. 8. Comportamento dinâmico dos MPPTs (10W - 200W).



Fig. 9. Arranjo laboratorial.

É possível verificar na Figura 10 a resposta dinâmica dos algoritmos Beta, V_{cte} , P&O e IC. Estes algoritmos apresentaram excelente resposta dinâmica. Todos foram capazes de alterar a potência de saída do PV em menos de 20ms quando submetidos a uma mudança brusca de potência

(100W-200W e vice-versa). Apenas o método V_{cte} apresentou uma precária inicialização levando cerca de 1,6s para alcançar o regime permanente a partir da potência nula. O método beta apresentou um bom tempo para a inicialização sendo de aproximadamente 500ms. Experimentalmente os algoritmos P&O e IC se destacaram com respeito a sua inicialização, mas as constantes perturbações em regime permanente representam perdas de energia. Dentre os algoritmos avaliados o método da correlação de ripple apresentou o melhor tempo para a inicialização, i.e, tempo da ordem de 50ms para atingir a máxima potência a partir do estado nulo, comprovando que este algoritmo pode ter velocidade de resposta próxima à múltiplos da frequência de chaveamento. Essa dinâmica pode ser visualizada na Figura 11.

Com o intuito de facilitar as avaliações experimentais e o computo do FR, um sistema de aquisição e supervisão foi implementado na plataforma C++ *Builder*. A interface gráfica amigável ao usuário pode ser visualizada nas Figuras 12 e 13. Com este sistema é possível programar remotamente o emulador com degraus de irradiação e de temperatura formando perfis de potência. A comunicação é realizada via *GPIO-USB* para troca de informações entre PC e o emulador de PVs. A avaliação da potência extraída pode ser observada na Figura 14, onde P_{MAX} representa a máxima potência disponível e P_{MPPT} representa a energia convertida. Um perfil mais próximo ao diário foi aplicado como demonstrado na Figura 15 e uma boa resposta a este perfil representa um

ganho adicional em relação ao estudo da habilidade de extração de energia em face de condições mais reais. Simularam-se as características diárias das 6 da manhã às 6 da tarde. A tabela II resume as características principais dos algoritmos de MPPT analisados.

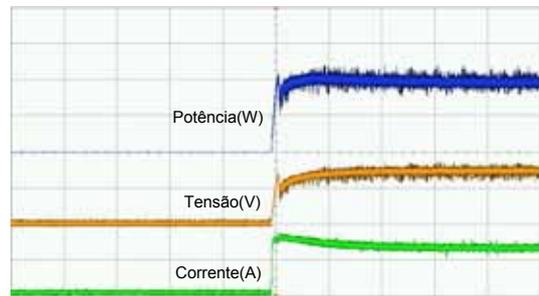


Fig. 11. Inicialização do método da correlação. Escalas: Potência (100W/div); Tensão (20V/div); Corrente (5A/div) e tempo: 20ms/div.

Durante os testes experimentais, o algoritmo P&O também foi implementado usando um controlador PI digital culminando no método adaptativo P&O baseado em PI. Similar ao método IC adaptativo, esta implementação apresentou resultados muito mais interessantes com relação ao fator de rastreamento e reduzidas oscilações em regime permanente. Desta forma, esta nova implementação também foi submetida ao mesmo perfil de potência diário e os resultados podem ser avaliados na Figura 15.

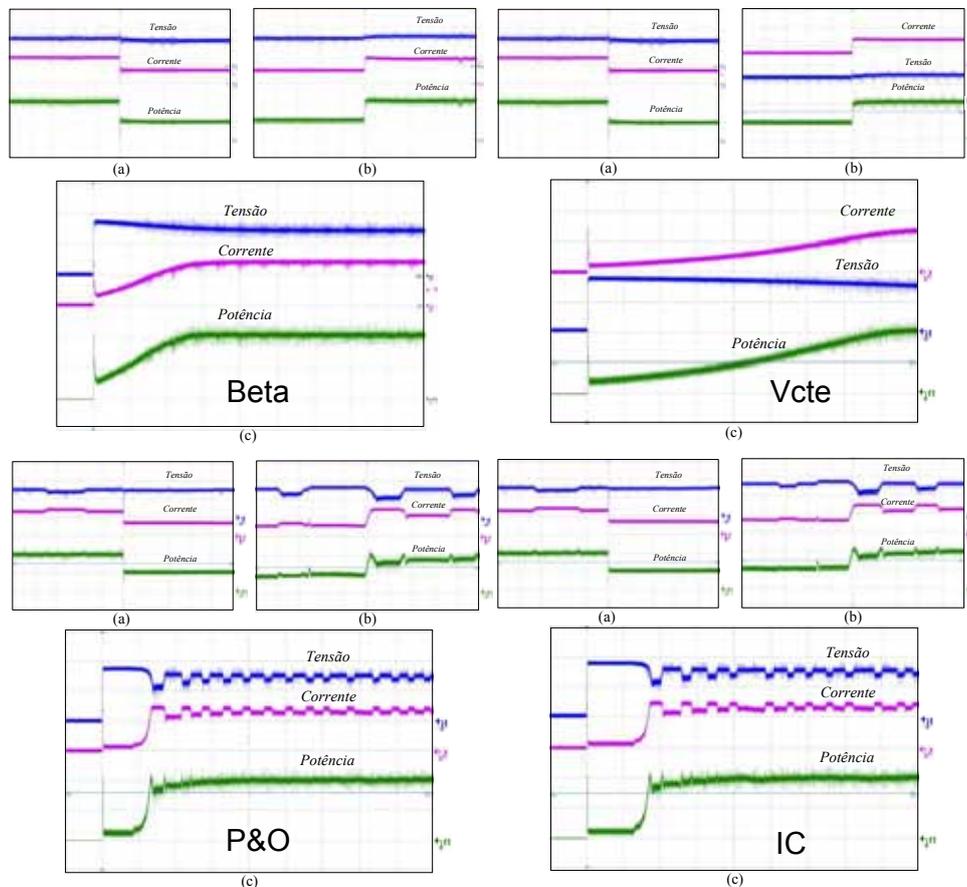


Fig. 10. Comportamento dinâmico dos algoritmos de MPPT. (a) Degrau negativo (200W-100W); (b) degrau positivo (100W-200W); (c) Inicialização (0W-200W). Escalas: Tensão (20V/div); Corrente (5A/div); Potência (100W/div) e Tempo: (a) e (b) (20ms/div) e (c) (200ms/div).



Fig. 12. Interface gráfica amigável ao usuário - Operação fixa.



Fig. 13. Interface gráfica amigável ao usuário - Perfil de Potência.

Normalmente, em associações de múltiplos PVs e em sombreamento, pode ocorrer o surgimento de mais de um ponto de máxima potência. Assim, para sistemas de maior potência é interessante realizar um estágio prévio de pré-escaneamento da curva do PV encontrando o máximo global [28] e em seguida iniciar o algoritmo de MPPT propriamente dito, os quais foram discutidos e apresentados. Este escaneamento da curva deve ser realizado periodicamente e em intervalos de 10 a 15 minutos, quando se verifica que o sistema será constantemente afetado pelo sombreamento.

IV. CONCLUSÕES

Atualmente o uso da energia fotovoltaica é uma realidade, e a disseminação deste tipo de energia se tornará extremamente importante para a minimização dos problemas energéticos e ambientais. Neste contexto, as técnicas de MPPT são de extrema importância para extrair a máxima potência disponível dos PVs. Dentre os métodos avaliados, Beta apresentou-se como uma boa solução com relação ao ótimo fator de rastreamento, reduzida oscilação de potência em regime permanente, boa resposta transitória e complexidade média de implementação. É interessante frisar que os métodos IC e P&O modificados, IC baseado em PI e P&O baseado em PI merecem destaque como alternativas de desempenho superior e ainda são independentes do tipo/fabricante dos PVs. Os métodos IC baseado em PI e P&O baseado em PI apresentaram os melhores fatores de rastreamento mesmo em face de condições de perfis de potência mais realistas e também apresentam boa resposta

transitória. Entretanto, realizar divisões matemáticas não é simples e neste caso a implementação digital é ainda mais interessante. A ideia da implementação dos algoritmos de MPPT através de controladores digitais podem ser estendidos a todos os outros algoritmos se for possível minimizar funções de erro. É interessante salientar que a diferença de desempenho entre os melhores algoritmos é tênue, tendo esses algoritmos que ser analisados para cada caso específico. No entanto, este artigo se mostra como um interessante meio de guia para a escolha dos melhores algoritmos para implementação. Para redução de custos é interessante adotar o método da temperatura, uma vez que este sensor é de custo reduzido e apresenta desempenho muito bom. No entanto, este método é dependente das características do PV. Finalmente, para o caso de sistemas com constante sombreamento, um passo inicial de pré-escaneamento da curva do PV é interessante para garantir a localização do ponto de máximo global e em seguida iniciar os algoritmos propriamente ditos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e ao CNPq pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

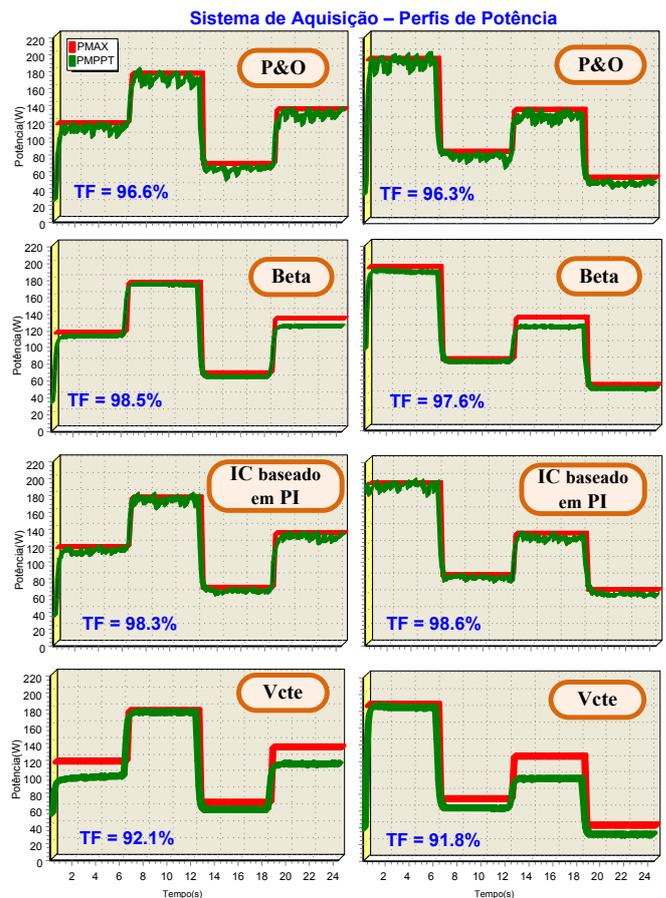


Fig. 14. Potência extraída pelos algoritmos de MPPT.

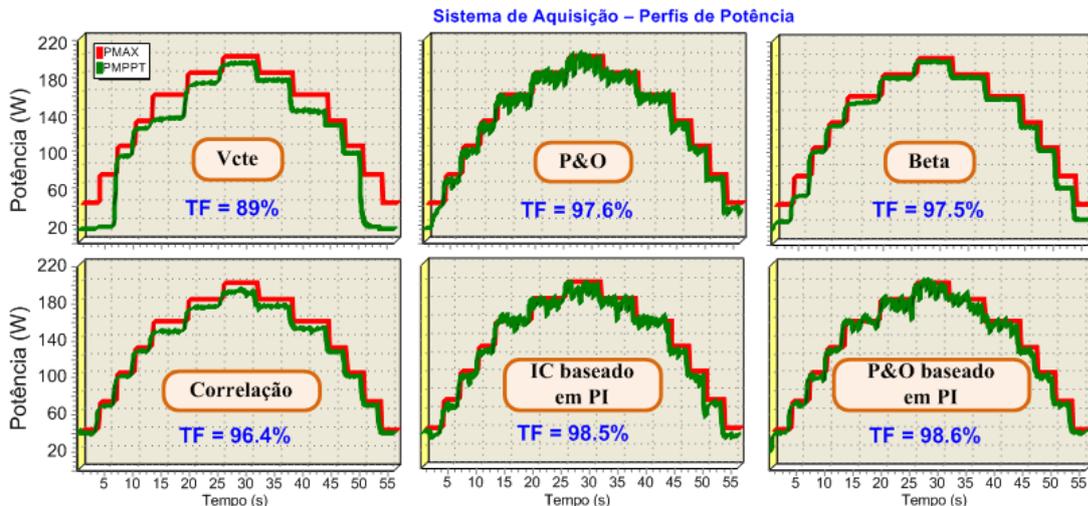


Fig. 15. Perfil de potência similar ao diário – Computo do FR.

TABELA II
Principais Características dos Algoritmos de MPPT

Método	Dependente do PV	Fator de Rastreamento (FR)	Implementação	Eficaz	Sensores
Dcte	Não	Ruim	Muito Simples	Não	-
Vcte	Sim	Razoável	Simple	Não	V
P&O	Não	Bom	Simple	Sim	V,I
IC	Não	Bom	Médio	Sim	V,I
P&O Modificado	Não	Muito Bom	Complexo	Sim	V,I
P&O baseado em PI	Não	Excelente	Médio	Sim	V,I
IC Modificado	Não	Muito Bom	Complexo	Sim	V,I
IC baseado em PI	Não	Excelente	Médio	Sim	V,I
Beta	Sim	Excelente	Médio	Sim	V,I
Oscilação do Sistema	Sim	Razoável	Simple	Não	V
Correlação de Ripple	Não	Bom	Complexo	Sim	V,I
Temperatura	Sim	Muito Bom	Simple	Sim	V, Temperatura

REFERÊNCIAS

- [1] H. Cha and S. Lee. "Design and Implementation of Photovoltaic Power Conditioning System using a Current based Maximum Power Point Tracking". In: *IAS Annual Meeting*, 43, 2008, pp. 1-5.
- [2] J. Kwon; et al. "Photovoltaic Power Conditioning System With Line Connection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1048-1054, 2006.
- [3] A. Pandey; et al. "A simple Single-Sensor MPPT Solution", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 698-700, 2007.
- [4] I. T. Salamon and R. Rütther. "Potencial Brasileiro da Geração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica: Análise de Paridade de Rede". In: *IX Encontro nacional e V latino Americano de conforto no ambiente construído*, 9, 2007, Ouro Preto.
- [5] W. Li; et al. "A Smart and Simple PV Charger for Portable applications". In: *APEC*, 25, 2010, p. 2080-2084.
- [6] W. L. Yu; et al. "A DSP-Based Single-Stage Maximum Power Point Tracking PV Inverter". In: *apec*, 25, 2010, pp. 948-952.
- [7] A. K. Abdelsalam; A. M. Massoud; S. Ahmed and P. N. Enjeti. "High-Performance Adaptive Perturb and Observe MPPT Technique for Photovoltaic-Based Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 04, pp. 1010-1021, 2011.
- [8] G. C. Hsieh; et al. "Variable Frequency Controlled Incremental Conductance Derived MPPT Photovoltaic Stand-Along DC Bus System." In: *APEC*, 23, 2008, p. 1849-1854.
- [9] R. A. Mastromauro; M. Liserre; T. Kerekes and A. Dell'acqua. "A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System with Power Quality Conditioner Functionality", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4436-4444, 2009.
- [10] F. Liu; S. Duan; B. Liu and Y. Kang. "A variable step size INC MPPT method for PV systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 07, pp. 2622-2628, 2008.
- [11] S. Jain and V. Agarwal. "A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaics Systems", *IEEE Power Electronics Letters*, vol.2, no.3, pp. 16-19, 2004.
- [12] B. M. Ho; H. S. Chung and W. L. Lo. "Use of System Oscillation to Locate the MPP of PV Panels", *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, no. 1, pp.1-5, 2004.
- [13] B. M. Ho and H. S. Chung. "An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, pp. 953-962, 2005.

- [14] D. Casadei; et al. "Single-Phase Single-Stage Photovoltaic Generation System Based on a Ripple Correlation Control Maximum Power Point Tracking", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 562-568, 2006.
- [15] T. Esham; et al. "Dynamic Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays Using Ripple Correlation Control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, pp. 1282-1291, 2006.
- [16] M. Park and I. A. Yu. "Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell". In: *IECON*, 30, 2004.
- [17] N. Femia; G. Petrone; G. SPagnuolo and M. Vitelli. "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp.963-973, 2005.
- [18] M. M. Casaro; D. C. Martins. "New method of MPPT Application for dual-stage inverters",. In: *Brazilian Power Electronics Conference - COBEP 2007*, pp. 676-681.
- [19] N. Mutoh; T. Matuo; K. Okata and M. Sakai. "Prediction-Data-Based Maximum-Power-Point-Tracking Method for Photovoltaic Power Generation Systems". In: *IEEE PESC*, 33, 2002, pp. 1489-1894.
- [20] R. F. Coelho; F. M. Concer; D. C. Martins. "A MPPT Approach Based on Temperature Measurements Applied in PV Systems". In: *IEEE ICSET*, 2010, pp. 1-6.
- [21] G. J. Yu; Y. S. Jung; I. Choi and J. H. Song. "A Novel Two-Mode MPPT Control Algorithm based on Comparative Study of Existing Algorithms". In: *PVSC 2002*, 29, 2002, pp. 1531-1534.
- [22] R. Faranda; S. Leva and V. Maugeri. "MPPT Techniques for PV Systems: Energetic and Cost Comparison". In: *PESGM08*, 9, 2008, pp. 1-6.
- [23] M. C. Cavalcanti; K. C. Oliveira; G. M. S. Azevedo and F. A. S. Neves. "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems", *Eletrônica de Potência*, vol. 12, pp. 163-171, 2007.
- [24] T. Esham and P. L. Chapman. "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [25] M. A. G. Brito; L. G. Junior; L. P. Sampaio and C. A. Canesin. "Evaluation of MPPT Techniques for Photovoltaic Applications". In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics - ISIE*, 20, pp.1039-1044, 2011.
- [26] S. B. Kjaer; J. K. Pedersen and F. Blaabjerg. "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292 - 1306, 2005.
- [27] M. Liserre; T. Sauter and Y. J. Hung. "Future Energy Systems - Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid through Industrial Electronics", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 4, nl. 1, pp.18-37, 2010.
- [28] E. Koutroulis; F. Blaabjerg. "A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 184-190, 2012.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP), em 1982. É engenheiro eletricitista (2005) e mestre (2008) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente, está desenvolvendo projeto de pesquisa de Doutorado em Engenharia Elétrica pela UNESP-FE/IS, desenvolvendo seu trabalho dentro das dependências do Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), desta instituição. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, técnicas de correção ativa do fator de potência, controle digital e conversores CC-CC, uso de DSPs e FPGAs, inversores isolados e em conexão com a rede de distribuição de energia elétrica.

Leonardo Poltronieri Sampaio, Possui mestrado em Engenharia Elétrica (Eletrônica de Potência) pela Universidade Estadual Paulista (2010), pelo Laboratório de Eletrônica de Potência- LEP, campus de Ilha Solteira - SP, onde também se graduou em Engenharia Elétrica (2008). Atualmente é pesquisador associado ao LEP. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando nos seguintes temas: aproveitamento de energias alternativas e renováveis, aplicações para PVs, desenvolvimento de ferramentas educacionais através da linguagem Java para o auxílio ao ensino em Eletrônica de Potência, análise e modelagem de conversores estáticos de potência, desenvolvimento Web com PHP/MySQL, programação em Java, Delphi, Visual Basic, C/C++.

Guilherme de A. e Melo, nascido em Presidente Prudente (SP), em 1976, é engenheiro eletricitista (2001), mestre (2006) e doutor (2010) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Atualmente é professor colaborador do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP e está associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP). Suas principais áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, energias renováveis, conversores CC-CC e CA-CC e sistemas de controle digital.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavinia (SP), em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS, Ilha Solteira (SP)), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC INEP, Florianópolis (SC)). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), é editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics e ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores, fontes de alimentação chaveadas, aplicações da energia fotovoltaica, reatores para iluminação, técnicas de correção ativa do fator de potência e técnicas modernas de ensino de eletrônica de potência.