



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102022010902-8 A2

(22) Data do Depósito: 03/06/2022

(43) Data da Publicação Nacional:
19/12/2023

(54) **Título:** MÉTODO HÍBRIDO PARA RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE GERADORES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

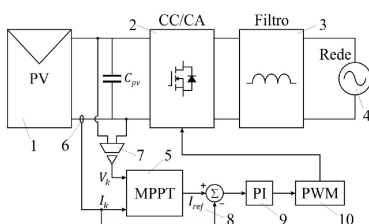
(51) **Int. Cl.:** G05F 1/67; H02S 50/00; H02S 40/30.

(52) **CPC:** G05F 1/67; H02S 50/00; H02S 40/30.

(71) **Depositante(es):** LUGPE TECH LTDA.

(72) **Inventor(es):** VÍCTOR FERREIRA GRUNER; LUIZ CARLOS GILI; JULIO CESAR DIAS; MATHEUS PROTÁSIO DE LIMA; EDUARDO ELLER BEHR; LENON SCHMITZ; GUILHERME BRASIL PINTARELLI.

(57) **Resumo:** MÉTODO HÍBRIDO PARA RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE GERADORES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. A presente invenção refere-se a um método híbrido para controle de geradores de energia solar fotovoltaica, capaz de ativamente rastrear e atingir o estado otimizado da transferência de máxima potência (MPPT) de módulos ou arranjos fotovoltaicos submetidos à diferentes condições climáticas. O método compreende um algoritmo para controle dos interruptores do conversor de potência, baseado na interpretação de sensores de distúrbios de corrente (I_k) e de tensão (V_k) elétrica. O algoritmo possui rotinas de leitura de I_k e V_k , e usa estes parâmetros para determinar o ponto de máxima potência (MPP) a partir do método da condutância incremental (INC) e da corrente de curto-circuito fracionada (FSCC). As rotinas INC e FSCC são implementadas em conjunto. Variações abruptas de condições climáticas impactam I_k e V_k , e, a rotina FSCC corrige o rastreamento realizado pelo método INC. Essa implementação aumenta a eficiência dinâmica do MPPT. O ponto de operação rastreado pelo método pode ser usado como referência de corrente no controle do conversor de potência. O método pode ser utilizado em dispositivos capazes de processar a energia dos geradores fotovoltaicos em geral, e.g., microinversores, inversores string (...).



MÉTODO HÍBRIDO PARA RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE GERADORES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção se refere ao campo de equipamentos e técnicas de controle de geradores de energia solar fotovoltaica e, mais especificamente, se refere ao desenvolvimento de um método de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT). O método consiste em um algoritmo que calcula o ponto otimizado de operação com base em medições de corrente e tensão elétrica de geradores fotovoltaicos (células, módulos ou arranjos fotovoltaicos). O método calcula ativamente o ponto de máxima potência a partir de uma combinação específica de rotinas e dados de condutância incremental e corrente de curto-circuito. A implementação é do tipo controlador dinâmico híbrido, na qual usa-se dois controladores discretos: o primeiro é configurado em alta frequência e usa dados da corrente de curto-circuito fracionada, e o segundo é configurado em baixa frequência e usa dados da condutância incremental. A disposição das partes do controlador é projetada para conter a dinâmica rápida. O invento proposto permite calcular o ponto de máxima potência durante variações abruptas ou não de condições climáticas (*i.e.*, irradiância solar e temperatura) que os geradores estão sujeitos. O método pode ser embarcado ou não em sistemas de geração solar fotovoltaica e, ser implementado em microprocessadores ou microcontroladores. O método pode ser utilizado em dispositivos capazes de processar a energia dos geradores fotovoltaicos, *e.g.*, microinversores e inversores *strings* conectados à rede de distribuição elétrica ou isolados da rede de distribuição elétrica, a exemplo de carregadores de baterias solares, sistemas para bombeamento de água, eletrificação rural, iluminação pública e de emergência, entre outros.

ESTADO DA TÉCNICA

[002] As grandezas elétricas que caracterizam os geradores fotovoltaicos podem ser sintetizadas sob a forma de curvas características não lineares que relacionam a

corrente com a tensão (curva I-V) ou a potência com a tensão (curva P-V) (T. A. Pereira *et al.*, “Design of a Portable Photovoltaic I–V Curve Tracer Based on the DC–DC Converter Method,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 11, no. 2, pp. 552–560, 2021). Os principais pontos pertencentes a essas curvas são: ponto de máxima potência (*Maximum Power Point*, MPP), ponto de circuito aberto e ponto de curto-circuito. A potência fotogerada é nula nos pontos de circuito aberto e curto-circuito e máxima no ponto de máxima potência, tal como o próprio nome sugere, sendo, portanto, o ponto ótimo de operação.

[003] Tais pontos de operação não podem ser assumidos constantes. Fatores ambientais sob os quais não se tem controle, como a irradiância solar e a temperatura, os afetam significativamente (T. A. Pereira *et al.*, “Design of a Portable Photovoltaic I–V Curve Tracer Based on the DC–DC Converter Method,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 11, no. 2, pp. 552–560, 2021). Neste sentido, a caracterização dos módulos fotovoltaicos é descrita não apenas por uma curva, mas por uma família de curvas que contabiliza diferentes cenários de irradiância e de temperatura.

[004] Uma vez que o ponto de máxima potência de geradores fotovoltaicos varia de acordo com as condições climáticas, torna-se necessário rastreá-lo dinamicamente de forma ativa, de modo que a energia fornecida pelo gerador fotovoltaico seja a maior possível. O rastreamento incorreto pode acarretar baixa performance dos geradores, e conseqüentemente, menor geração W/m^2 da planta solar. Na literatura, os sistemas empregados para garantir que os geradores fotovoltaicos operem no ponto ótimo são denominados de rastreadores do ponto de máxima potência ou MPPT, os quais são constituídos por conversores estáticos de potência (*hardware*) e algoritmos de rastreamento e controle (*software*) (A. Reza Reisi *et al.*, “Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 433–443, 2013; S. Lyden & M. E. Haque, “Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015).

[005] Na literatura técnica os algoritmos de rastreamento são normalmente classificados como indiretos e diretos. Os algoritmos indiretos fazem uso de informações previamente armazenadas em bancos de dados, como os valores de tensão, corrente e potência fotogeradas sob diversas condições atmosféricas diferentes. O microcontrolador que executa o algoritmo recebe informações climáticas reais e as compara com aquelas armazenadas para definir os valores de tensão ou de corrente a serem utilizados com referência de rastreamento. Evidentemente, métodos indiretos requerem sistemas de leitura de irradiância solar e temperatura e, portanto, não se justificam economicamente em aplicações de pequeno e médio porte. Em contrapartida, os algoritmos diretos não utilizam informações previamente armazenadas, fazendo uso apenas dos valores medidos de tensão e corrente para verificar a localização do ponto de operação em relação ao MPP e atuar para que convirjam entre si. Geralmente, esses algoritmos apresentam oscilações, pois o sentido de rastreamento é definido em tempo real, a partir das leituras realizadas (A. Reza Reisi *et al.*, “Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 433–443, 2013; S. Lyden & M. E. Haque, “Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015; M. S. Ngan & C. W. Tan, “A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone Photovoltaic Systems,” *2011 IEEE Appl. Power Electron. Colloq.*, pp. 22–27, Apr. 2011).

[006] Dentre os métodos diretos, os mais conhecidos são os métodos: da tensão fracionada de circuito aberto (*fractional open-circuit voltage*, FOCV) (J. J. Schoeman & J. D. Wyk, “A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays,” *1982 IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 361–367, Jun. 1982), da corrente fracionada de curto-circuito (*fractional short-circuit current*, FSOC) (T. Noguchi *et al.*, “Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217–223, 2002), perturba e observa (*perturb and observe*, P&O) (O.

Wasynezuk, "Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3031–3037, 1983) e condutância incremental (*incremental conductance*, INC) (K. H. Hussein, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 1, p. 59, 1995). Extensas revisões sobre os algoritmos de MPPT diretos podem ser encontradas em: A. Reza Reisi *et al.*, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 433–443, 2013; S. Lyden & M. E. Haque, "Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1504–1518, 2015; M. A. G. de Brito *et al.*, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, 2013. Os parágrafos [007] ao [0010] fazem referência à métodos de controle tradicionalmente encontrados na literatura. O parágrafo [0011] faz referência às modificações de métodos tradicionais. O parágrafo [0012] faz referência aos métodos híbridos.

[007] No método FOCV a tensão de referência é calculada a partir da relação aproximadamente linear existente entre a tensão de máxima potência (V_{mp}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}): $V_{mp} \approx k_{oc}V_{oc}$, em que k_{oc} é uma grandeza assumida como sendo constante, mas que, na prática, varia tipicamente no intervalo entre 0,72 e 0,90 de acordo com os níveis de irradiância solar e de temperatura nos quais o gerador fotovoltaico está submetido. Além de k_{oc} ser variável, outra desvantagem do método consiste na necessidade de se interromper periodicamente o fluxo de potência para a leitura de V_{oc} , implicando a suspensão temporária na extração de energia e a redução da eficiência de rastreamento (J. J. Schoeman & J. D. Wyk, "A simplified maximal power controller for terrestrial photovoltaic panel arrays," 1982 *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 361–367, Jun. 1982).

[008] O método FSCC, por sua vez, se baseia na relação aproximadamente linear entre as correntes de máxima potência (I_{mp}) e de curto-circuito (I_{sc}): $I_{mp} \approx k_{sc}I_{sc}$, em

que k_{sc} também é uma grandeza assumida como sendo constante, mas que, na prática, varia tipicamente no intervalo entre 0,85 e 0,95 de acordo com os níveis de irradiância solar e de temperatura nos quais o gerador fotovoltaico está submetido. A necessidade de se interromper periodicamente o fluxo de potência para a leitura da corrente de curto-circuito também implica a suspensão temporária na extração de energia e redução da eficiência de rastreamento. Ademais, a medição da corrente de curto-circuito é problemática, sendo necessário circuitos eletrônicos adicionais para colocar periodicamente o gerador fotovoltaico em curto-circuito (T. Noguchi *et al.*, “Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 217–223, 2002).

[009] Diferentemente do FOCV e do FSCC, o método perturba e observa necessita de leituras simultâneas de tensão e corrente do gerador fotovoltaico. O P&O consiste em um processo iterativo baseado na relação causa e efeito entre a aplicação de perturbações na tensão do gerador fotovoltaico e na observação das variações (ΔP) na potência fotogerada. Basicamente, se em qualquer ponto de operação da curva P-V, a tensão de operação do gerador fotovoltaico for perturbada em uma determinada direção e a potência aumentar ($\Delta P > 0$), conclui-se que a perturbação moveu o ponto de operação do gerador fotovoltaico em direção ao MPP. Logo, o método P&O poderia continuar a perturbar a tensão do gerador fotovoltaico na mesma direção. Em contrapartida, caso a potência diminuir ($\Delta P < 0$), então a mudança no ponto de operação foi além do MPP e algoritmo P&O altera a direção da perturbação (O. Wasynezuk, “Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3031–3037, 1983).

[0010] Por outro lado, o método INC baseia-se no fato de a derivada da potência com relação à tensão em geradores fotovoltaicos ser positiva ($dP/dV > 0$) à esquerda do MPP, negativa ($dP/dV < 0$) à direita do MPP e exatamente nula ($dP/dV = 0$) sobre o MPP. Assim, torna-se possível utilizar informações extraídas do cálculo da derivada dP/dV para determinar a posição do ponto de operação em relação ao de máxima

potência. Para tanto, realiza-se a comparação entre a condutância instantânea (I_k/V_k) e a condutância incremental ($\Delta I/\Delta V$) para determinar o sentido da perturbação que deve ser aplicada a fim de mover o ponto de operação do gerador fotovoltaico em direção ao ponto de máxima potência (K. H. Hussein, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 1, p. 59, 1995).

[0011] De maneira geral, os métodos P&O e INC são os mais populares, sendo utilizados em diversas aplicações e produtos comerciais. Por esse motivo, diversos trabalhos propõem modificações nesses algoritmos para melhorar a sua performance em determinadas situações. Em M. A. Abdourraziq *et al.*, "A new variable step size INC MPPT method for PV systems," *2014 Int. Conf. Multimed. Comput. Syst.*, no. 1, pp. 1563–1568, Apr. 2014; KR1020110059327, "Control Apparatus And A Method For Maximum Power Point Tracking In A Photovoltaic System, Capable Of Reducing Ripple In Normal State," J. W. Park & B. K. Kang, depositado em 2009, o método INC é modificado para operar com passo variável, melhorando a sua dinâmica de rastreamento. Outro método INC modificado, de passo variável, mas com uma estrutura mais simplificada, ideal para uso em microcontroladores de baixo custo, é apresentada em N. E. Zakzouk *et al.*, "Improved performance low - cost incremental conductance PV MPPT technique," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 10, no. 4, pp. 561 – 574, 2016. Em CN101697423, "Non-Active Disturbance Maximum Power Tracking Method In Photovoltaic Grid-Connected Inverting System," S. Jianhui *et al.*, depositado em 2009, é mostrado um método de implementação de P&O em microprocessadores para processamento digital de sinal (*digital signal processing*, DSP), implementado na forma de interrupções. Em KR1020100098870, "Photovoltaic Power Generating System, An Apparatus And A Method For Tracking Maximum Power Of A Solar Cell, Capable Of Supplying The Maximum Power Of The Solar Cell To A Load Regardless Of The Condition Of The Load," M. K. Shin & S. B. Lee, depositado em 2009, é mostrado uma implementação do P&O e os circuitos de instrumentação de tensão e corrente para um conversor. Em KR1020110059327, "Control Apparatus And A Method For Maximum Power Point Tracking In A

Photovoltaic System, Capable Of Reducing Ripple In Normal State,” J. W. Park & B. K. Kang, depositado em 2009, é mostrado uma implementação de passo variável para o INC (usando informação da corrente de saída e da variação de potência) e o uso de um limiar inferior para definir uma tensão constante como referência do sistema de controle com objetivo de diminuir a ondulação de tensão. Em WO2012119257, “Photovoltaic System Maximum Power Point Tracking,” T. Lipan, depositado em 2011, é mostrado a implementação computacional do método P&O (algoritmo, variáveis e passo). Em KR101223611, “Photovoltaic Power Generation Control System For Estimating Maximum Power By Using Perturbation And A Measuring Method With Variable Voltage Increment And A Method Thereof For Maximizing A Power Loss By Self-Induced Vibration,” K. S. Chae & D. H. Kim, depositado em 2012, é mostrado uma modificação no algoritmo do método P&O para minimizar oscilações em torno do ponto MPP. Em IN277650895, “Photovoltaic System To Track The Maximum Power Point For Maximum Power Extraction And Method Thereof,” B. Singh *et al.*, depositado em 2018, é mostrado um arranjo de controle preditivo e adaptativo para ser utilizado com P&O e INC, em que o controle preditivo estima a corrente que será adquirida no próximo ciclo, e usa essa informação para melhorar a performance do conversor.

[0012] Outros métodos são denominados híbridos, por combinarem o P&O e o INC com características específicas de alguns métodos clássicos da literatura. Por exemplo, em H. Patel & V. Agarwal, “Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689–1698, 2008, o método FOCV é utilizado em conjunto com P&O na tentativa de se detectar sombreamento parcial em módulos fotovoltaicos. O método proposto em S. K. Kollimalla & M. K. Mishra, “A new adaptive P&O MPPT algorithm based on FSCC method for photovoltaic system,” *2013 Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol.*, pp. 406–411, Mar. 2013, melhora o P&O ao utilizar perturbações de corrente, ao invés de perturbações de tensão, e ao implementar o FSCC na sua inicialização. Um MPPT híbrido de dois estágios é proposto em Jieming Ma *et al.*, “A hybrid MPPT method for Photovoltaic systems via estimation and

revision method,” *2013 IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, no. 1, pp. 241–244, May 2013, na qual primeiramente o MPP é estimado indiretamente por cálculo numérico para, em seguida, implementar o P&O de forma mais precisa. De maneira similar, em H. A. Sher *et al.*, “A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1426–1434, 2015; “An Efficient and Cost-Effective Hybrid MPPT Method for a Photovoltaic Flyback Microinverter,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1137–1144, 2018, outro método híbrido de dois estágios é proposto. No primeiro estágio, a corrente de curto-circuito é mensurada e o MPP é estimado pelo FSCC. Em seguida, o método P&O com passo reduzido assume o rastreamento a fim de evitar grandes oscilações em torno do MPP. Similarmente, em WO2013105008, “Solar Power Converter And Method Of Controlling Solar Power Conversion,” H. Wang *et al.*, depositado em 2013, além da leitura da corrente de curto-circuito, é realizada a medição da tensão de circuito aberto para pré-determinar a região do MPP, após isso, aplica-se método P&O com passo reduzido. Em US20110175454, “Dual-Loop Dynamic Fast-Tracking MPPT Control Method, Device, And System,” B. J. Williams & S. B. Sandbote, depositado em 2011, é proposto a implementação de um algoritmo de controle híbrido (rastreamento MPPT rápido e um algoritmo de controle lento); porém, não há detalhamento do método MPPT. Em KR101256433*, “Solar Light Power Generating System Of A Maximum Power Point Tracking Method Using Pv Current Capable Of Improving Responding Speed Over A Limit,” Y. W. Yoo & D. H. Kim, depositado em 2013, é proposto um sistema híbrido que considera a informação da corrente de curto-circuito para corrigir variações abruptas (somente redução de radiação); porém, não há informação sobre a implementação computacional desse sistema.

[0013] Conforme previamente mencionado, quaisquer alterações climáticas criam variações de tensão e corrente elétrica nos terminais de geradores fotovoltaicos. As variações abruptas, contudo, são mais rápidas e podem não ser imediatamente detectadas pelos métodos de MPPT encontrados na literatura, especialmente os tracionais (P&O, INC, FSCC e FOCV), levando o gerador a operar demasiadamente

longe do MPP por muito tempo (independentemente de usar passo variável ou não), reduzindo a eficiência de todo o sistema. Assim, torna-se importante desenvolver um método de rastreamento de máxima potência com dinâmica rápida o suficiente para detectar tais condições climáticas abruptas e encontrar o MPP de forma mais eficiente.

[0014] Tipicamente os métodos híbridos são justamente desenvolvidos para tornar os métodos tradicionais mais eficientes na busca pelo MPP. Contudo, a maioria dos métodos híbridos até então desenvolvidos não são rápidos o suficiente para rastrear alterações climáticas abruptas, principalmente as de irradiância solar. O método proposto, por outro lado, verifica continuamente a possibilidade de ter ocorrido tais tipos de variações climáticas a partir da utilização de conceitos do método FSCC em conjunto com o método INC. Cabe ressaltar que, apesar de o método proposto também ser baseado no FSCC, ele não coloca ativamente o gerador fotovoltaico em curto-circuito, o que diferencia o método proposto dos métodos híbridos de S. K. Kollimalla & M. K. Mishra, “A new adaptive P&O MPPT algorithm based on FSCC method for photovoltaic system,” *2013 Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol.*, pp. 406–411, Mar. 2013; H. A. Sher *et al.*, “A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1426–1434, 2015; “An Efficient and Cost-Effective Hybrid MPPT Method for a Photovoltaic Flyback Microinverter,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1137–1144, 2018; WO2013105008, “Solar Power Converter And Method Of Controlling Solar Power Conversion,” H. Wang *et al.*, depositado em 2013, os quais suspendem temporariamente a extração de energia, ao efetivamente curto-circuitar o gerador fotovoltaico, reduzindo a eficiência de rastreamento. O método proposto, por sua vez, usa uma implementação que não necessita curto-circuitar o gerador, reduzindo complexidade, custo e perdas de energia. Ademais, saliente-se que, apesar de KR101256433*, “Solar Light Power Generating System Of A Maximum Power Point Tracking Method Using Pv Current Capable Of Improving Responding Speed Over A Limit,” Y. W. Yoo & D. H. Kim, depositado em 2013, também propor um sistema que detecta decréscimos abruptos

de irradiância solar a partir do valor da corrente de curto-circuito sem a necessidade de circuitos adicionais, este sistema não é capaz de detectar acréscimos abruptos de irradiância solar, não expõe o uso da relação aproximadamente linear entre as correntes de máxima potência e de curto-circuito, e também não revela um método sistemático para implementação em um sistema computacional.

[0015] É importante destacar que rastreadores de máxima potência são constituídos por conversores estáticos de potência (*hardware*) e algoritmos de rastreamento e controle (*software*). O invento proposto mostra um procedimento para encontrar o ponto de máxima potência durante variações abruptas ou não das condições climáticas. Ressalva-se que existem documentos do campo de conhecimento de eletrônica de potência que mostram soluções de conversores estáticos, topologias, circuitos de potência e instrumentação. Estas soluções não são alvo desse relatório descritivo (referências: CN101697423, “Non-Active Disturbance Maximum Power Tracking Method In Photovoltaic Grid-Connected Inverting System,” S. Jianhui *et al.*, depositado em 2009; WO2017062097, “Solar Power Conversion System and Method,” W. J. PREMIERLANI *et al.*, depositado em 2017; GB2547670, “Ultra Efficient Micro-Inverter,” A. A. Macfarlane, depositado em 2016; WO2017163690, “Power Conversion System and Power Conversion Device,” A. Kikuti *et al.*, depositado em 2017). Além disso, existem documentos que mostram algoritmos de controle de conversores fotovoltaicos ou conversores completos, porém sem detalhar o método de rastreamento de máxima potência, estes são apresentados em sequência: Os seguintes documentos não detalham o algoritmo de MPPT: US20110175454, “Dual-Loop Dynamic Fast-Tracking MPPT Control Method, Device, And System,” B. J. Williams & S. B. Sandbote, depositado em 2011; EP2372486, “Method And Arrangement of Tracking The Maximum Power Point Of A Photovoltaic Module,” C. Antonio *et al.*, depositado em 2011; US20120069602, “Method And Arrangement For Tracking The Maximum Power Point Of A Photovoltaic Module,” E. Gerardo *et al.*, depositado em 2011; US20120075898, “Photovoltaic Power Converters And Closed Loop Maximum Power Point Tracking,” S. James & B. Y. F., depositado em 2010; JP2013069267, “Maximum Power Point Tracking For Power Conversion System And

Method For The Same,” T. Zhuohui *et al.*, depositado em 2012; KR243433323, “Photovoltaic Power Generation System,” J. W. Jin, depositado em 2017; US20180006579, “Control Device of Inverter,” Y. Matsuoka & T. Ambo, depositado em 2015; KR1020190007783, “Photovoltaic Power Generation System And Maximum Power Point Tracking Method Thereof,” H. S. Kim, depositado em 2017. Os seguintes documentos mostram o algoritmo de rastreamento MPPT em conjunto com um sistema de geração; porém não mostram a implementação para lidar com o problema de variação abrupta das condições climáticas: US20120026758, “Apparatus And Method For Controlling Switch Of Flyback Converter For Solar Generating System,” L. T. Won *et al.*, depositado em 2011 (com algoritmo MPPT do tipo P&O com de detecção e sincronismo com rede elétrica), US20130077366, “Solar Energy Generation System Tracking Adaptive Maximum Power Point And Its Method,” K. K. Hwan *et al.*, depositado em 2011 (com algoritmo MPPT adaptativo), e KR1020100098870, “Photovoltaic Power Generating System, An Apparatus And A Method For Tracking Maximum Power Of A Solar Cell, Capable Of Supplying The Maximum Power Of The Solar Cell To A Load Regardless Of The Condition Of The Load,” M. K. Shin & S. B. Lee, depositado em 2009; WO2012119257, “Photovoltaic System Maximum Power Point Tracking,” T. Lipan, depositado em 2011; US20120075898, “Photovoltaic Power Converters And Closed Loop Maximum Power Point Tracking,” S. James & B. Y. F., depositado em 2010; US20130286698, “Power Converting Apparatus, Operating Method Thereof, And Solar Power Generation System,” T. W. Lee *et al.*, depositado em 2012; US20150013744, “Photovoltaic System,” D. H. Kim *et al.*, depositado em 2014 (com algoritmo tradicional P&O ou INC).

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0016] A caracterização da presente invenção é feita por meio de desenhos representativos do método híbrido para rastreamento da máxima potência de geradores de energia solar fotovoltaica. A partir das figuras elaboradas, que expressam a melhor forma ou forma preferencial de se realizar o método ora idealizado, se fundamenta a parte descritiva do relatório, mediante uma numeração

detalhada e consecutiva, em que se esclarecem aspectos que possam ficar subentendidos pela representação adotada, de modo a determinar claramente a proteção ora pretendida. Estas figuras são meramente ilustrativas, podendo apresentar variações, desde que não fujam do inicialmente pleiteado:

A figura 1 ilustra um esquemático de conversor de potência típico de gerador fotovoltaico, com leituras de tensão e corrente, sistema de rastreamento MPPT, sistema de controle e modulador PWM.

A figura 2 ilustra o diagrama de blocos do microcontrolador (entradas, saídas, amostrador analógico-digital, algoritmo de rastreamento proposto com FSCC e INC, blocos de controle e modulador PWM) e chave de potência do conversor de potência.

A figura 3 ilustra o fluxograma do algoritmo de rastreamento proposto, que contém rotinas de FSCC e INC, cada qual com sua frequência de atualização característica, de modo que a variável I_{ref} é acessível a ambas as rotinas.

A figura 4 ilustra os resultados de simulação do método híbrido de MPPT proposto aplicado a um gerador fotovoltaico, *e.g.*, microinversor, comparado ao método INC tradicional com passo variável.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[0017] O método proposto pode ser executado em forma de algoritmo para controlar um gerador de energia solar fotovoltaica. A implementação pode variar em função da tecnologia e do local de processamento. Por exemplo, pode ser embarcado em um microcontrolador no gerador. Neste caso o algoritmo pode controlar ativamente o gerador de forma a obter o máximo rendimento para um determinado conjunto de painéis. O controle híbrido ativo busca corrigir perturbações criadas por variações climáticas. Sugere-se implementar o algoritmo no microcontrolador primário de um microinversor. O algoritmo pode ser implementado em qualquer tecnologia comercial de microcontrolador ou microprocessador disponível a pessoa física ou jurídica no mercado nacional (brasileiro).

[0018] Conforme ilustra a Figura 1, tipicamente, a energia gerada por um gerador solar fotovoltaico (1) é processada por um conversor estático de potência (2) seguido por um filtro de saída (3), os quais fazem a interface de conexão com a rede de distribuição (4). Para que a máxima potência que pode ser fornecida pelo gerador seja extraída pelo sistema, deve-se utilizar algum método de MPPT (5) que opera a partir das leituras de corrente elétrica (6) e tensão elétrica (7). O MPPT fornece um sinal de referência (8) que deve ser comparado com um dos sinais medidos. O erro resultante dessa comparação pode ser compensado por um controlador do tipo proporcional-integral (PI) (9) e então ser utilizado pelo modulador de largura de pulso (*pulse-width modulador* - PWM) (10) que ativa o conversor estático de potência.

[0019] Na presente invenção sugere-se que o método seja implementado em um microcontrolador (1), tal como representa a Figura 2. Os sinais de tensão e corrente elétrica medidos passam por filtros passa-baixa (2) antes de serem amostrados (3) no microcontrolador e convertidos em sinais digitais por conversores A/D (4). Os sinais digitais amostrados são então utilizados pelo algoritmo (5) do método híbrido proposto, o qual fornece o valor de corrente de referência (6) que coloca o gerador no MPP. Assim como em outros métodos, o sinal de referência pode ser comparado (7) com o sinal lido e o erro compensado por um controlador PI (8). O sinal de saída do controlador PI pode passar por um retentor de ordem zero (*zero-order hold* - ZOH) (9) seguido pelo modulador PWM (10), onde finalmente deixa o microcontrolador. Visto que microcontroladores tipicamente não possuem capacidade de corrente suficiente para acionar os interruptores ativos de conversores estáticos de potência, o sinal modulado PWM pode utilizar um atuador (*driver*) (11) para controlar a chave de potência (geralmente do tipo MOSFET ou IGBT) do conversor (12).

[0020] O método híbrido de MPPT proposto é descrito na Figura 3 em forma de fluxograma. De maneira geral, ele é composto por variações de dois métodos tradicionais: o INC (1) e o FSCC (2), os quais operam de forma simultânea. O método INC é implementado com tamanho de passo variável, o qual depende do módulo da razão entre as variações de potência e de tensão elétrica, e resulta em uma corrente

de referência ao invés de tensão, como no método original. No caso do método FSCC, ao invés de curto-circuitar periodicamente o gerador fotovoltaico para realizar medições da corrente de curto-circuito, desvios severos de corrente I_k e tensão V_k são continuamente verificados, em cada iteração, a fim de identificar a ocorrência de variações climática abruptas. Nesses casos, o método INC implementado faz com que a operação do gerador fotovoltaico divirja do MPP e passe a operar nas proximidades da corrente de curto-circuito. Assim, o algoritmo FSCC pode utilizar a sua expressão tradicional $I_{ref} \approx k_{sc} I_{sc}$ para selecionar uma nova referência de corrente para sobrepor a fornecida pelo método INC. Essa nova referência de corrente não necessariamente coloca o gerador fotovoltaico exatamente no MPP, mas o aproxima do MPP, permitindo que o método INC reencontre o MPP mais rapidamente. Ademais, cabe salientar que, para uma operação adequada, os métodos FSCC e INC devem operar com frequências de atualização diferentes, que podem ser variáveis ou não. O método INC deve ser mais lento, com valores de frequência tipicamente utilizados nos métodos tradicionais, enquanto o método FSCC deve operar com frequências maiores, a fim de continuamente verificar a ocorrência de variações climáticas abruptas.

[0021] A característica marcante desse invento é uma particular associação dos cálculos da condutância incremental (INC) e da corrente de curto-circuito fracionada (FSCC) com objetivo de colaborar com o rastreo em condições climáticas abruptas. INC e FSCC são computados a partir da medição de tensão elétrica e da corrente elétrica. A rotina periódica de INC e FSCC é projetada para ocorrer em regimes de tempos diferentes, que podem ser adaptativos ou não. O controlador discreto é disposto de uma forma que corrige o algoritmo de INC com parâmetros obtidos com o método FSCC. Essa particular combinação resulta em um novo método MPPT híbrido de alta velocidade, que é mais rápido que os encontrados na literatura, principalmente quando submetido a condições climáticas com variações abruptas. A maior velocidade é possível devido a dinâmica rápida do controle híbrido apresentado nesse documento. Os métodos MPPT encontrados na literatura não possuem dinâmica suficientemente rápida para rastrear transições abruptas, ou necessitam

circuitos extras para curto-circuitar ativamente o gerador fotovoltaico para implementar o FSCC. Esses fatos implicam atraso no rastreamento do MPP e, portanto, resultam em menor geração W/m^2 da planta solar.

[0022] Por fim, cabe reforçar que o ponto de máxima transferência de potência depende das condições climáticas que o módulo está submetido. Quaisquer alterações climáticas alteram a posição ótima de operação de um gerador fotovoltaico (*i.e.*, o MPP), de modo que alterações abruptas têm maior impacto no desvio do MPP. Os métodos de rastreamento do MPP encontrados na literatura (*i.e.*, métodos de MPPT) não são otimizados para rastreamento em situações de condições climáticas com variações abruptas, devido aos seguintes fatos: o método não possui dinâmica rápida o suficiente, ou, necessita de implementação de circuitos adicionais que causam interrupção temporária da extração de energia elétrica. O proposto método híbrido para rastreamento da máxima potência de geradores de energia solar fotovoltaica, por sua vez, viabiliza encontrar o ponto de máxima potência durante variações abruptas ou não das condições climáticas (*i.e.*, irradiância solar e temperatura) em que os geradores estão sujeitos. Este método é projetado com dinâmica mais rápida e sem necessidade de circuitos adicionais ou interrupção temporária da geração de energia. Sugere-se a utilização deste método em dispositivos capazes de processar a energia de quaisquer geradores fotovoltaicos, *e.g.*, microinversores e inversores *strings* conectados à rede de distribuição elétrica ou isolados da rede de distribuição elétrica, a exemplo de carregadores de baterias solares, sistemas para bombeamento de água, eletrificação rural, iluminação pública e de emergência, entre outros.

EXEMPLOS DE CONCRETIZAÇÕES DA INVENÇÃO

[0023] O algoritmo de MPPT proposto é especialmente apropriado para microinversores fotovoltaicos baseados na topologia *flyback* – a mais comumente utilizada em microinversores comerciais. O seu emprego nesses tipos de dispositivos pode ser avaliado por meio de *softwares* de simulação computacional. Como exemplo, o método híbrido proposto foi testado com o *software* comercial PLECS (Plexim GmbH, Technoparkstrasse 1, 8005 Zurich, Switzerland) utilizando uma topologia *flyback*

aplicada ao módulo fotovoltaico Jinko Tiger Pro 72HC de 550 W (JKM550M-72HL4). A Figura 4 ilustra o funcionamento do método híbrido proposto em comparação ao método INC clássico com passo variável. Nessa simulação, a irradiação solar foi reduzida de 1000 W/m^2 para 500 W/m^2 no instante $t = 2 \text{ s}$ e aumentada novamente de 500 W/m^2 para 1000 W/m^2 no instante $t = 4 \text{ s}$. Em ambas as situações o método INC tradicional com passo variável necessita de mais de 1 (um) segundo para encontrar o MPP enquanto o método híbrido proposto detecta o MPP quase que instantaneamente. Conclui-se, portanto, que, diante de variações abruptas de irradiância, o método proposto apresenta uma maior velocidade de rastreamento, o que resulta em uma maior eficiência dinâmica.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) de geradores de energia solar fotovoltaica caracterizado por:

- medir periodicamente a tensão elétrica (V_k) e a corrente elétrica (I_k) do módulo ou arranjo fotovoltaico;
- processar V_k e I_k com a combinação dos métodos da condutância incremental (INC) e da corrente de curto-circuito fracionada (FSCC);
- aplicar o algoritmo do método INC com seus parâmetros devidamente ajustados para identificar iterativamente a corrente no ponto de máxima potência;
- empregar uma variação do método FSCC para reajustar o rastreamento do MPP realizado pelo método INC durante variações abruptas de condições climáticas;
- impor a corrente de máxima potência a um módulo ou arranjo fotovoltaico por meio de um conversor estático de potência.

2. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por realizar amostragem das variáveis elétricas de tensão V_k e corrente I_k em faixa de frequência de aquisição de 10 Hz a 10 kHz, em ciclos adaptativos ou não, ou preferencialmente 1 kHz.

3. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por processar periodicamente o método INC de 1 até 100 ciclos/segundo ou preferencialmente 10 ciclos/segundo, e o método FSCC de 100 até 10 mil ciclos/segundo ou preferencialmente 1 mil ciclos/segundo, ou periodicamente adaptativos ou não.

4. Método de acordo com a reivindicação 1 a 3 caracterizado por armazenar os valores amostrados das variáveis elétricas de tensão e de corrente da iteração anterior para determinação das variações de tensão (ΔV) e de corrente (ΔI) necessárias para implementação dos métodos INC e FSCC.

5. Método de acordo com a reivindicação 1 a 4 caracterizado por identificar iterativamente o ponto de máxima potência por meio da comparação da condutância instantânea ($-I_k/V_k$) com a condutância incremental ($\Delta I/\Delta V$).
6. Método de acordo com a reivindicação 1 a 5 caracterizado por atualizar a corrente de referência (I_{ref}) de máxima potência com passo variável, o qual depende do módulo da razão da variação de potência (ΔP) em relação a variação de tensão (ΔV) multiplicado por um fator unidimensional N de 0,001 até 0,1 ou preferencialmente 0,01 para uma boa relação de compromisso entre velocidade de rastreamento e oscilação em torno do ponto de máxima potência.
7. Método de acordo com a reivindicação 1 a 6 caracterizado por identificar mudanças climáticas abruptas a partir da variação de tensão (ΔV) mensurada, a qual não deve ser superior a 10% da tensão de máxima potência, ou a partir da leitura atual de corrente I_k , a qual não deve ser superior a 50% da leitura de corrente I_k realizada na iteração anterior, armazenada na variável I_k' .
8. Método de acordo com a reivindicação 1 a 7 caracterizado por utilizar uma variação do método FSCC com ksc de 85% até 95% ou preferencialmente de 90%, o qual corresponde a relação percentual média entre a corrente de máxima potência e a corrente de curto-circuito.
9. Método de acordo com a reivindicação 1 a 8 caracterizado por utilizar uma estratégia de controle em malha fechada para garantir que a corrente de referência I_{ref} de máxima potência seja imposta a entrada do conversor estático de potência e, conseqüentemente, ao módulo ou arranjo fotovoltaico.
10. Método de acordo com a reivindicação 1 a 9 caracterizado por sua implementação lógica em microcontroladores, microprocessadores, computadores embarcados ou não, ou circuitos semelhantes, na forma de uma ou mais funções auxiliares, e.g. rotinas e *tasks*.

DESENHOS

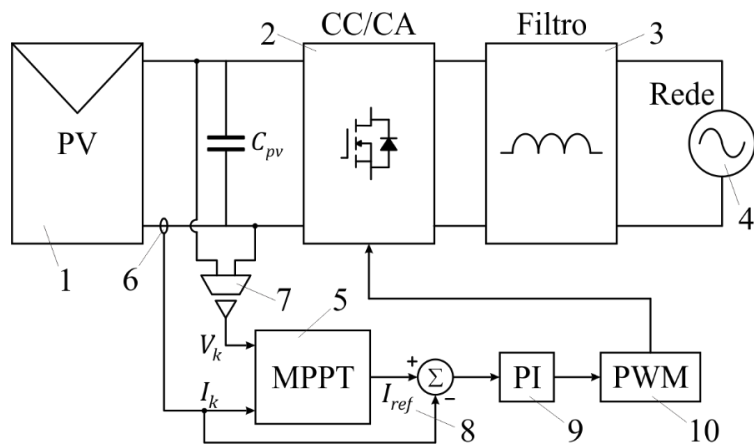


Figura 1

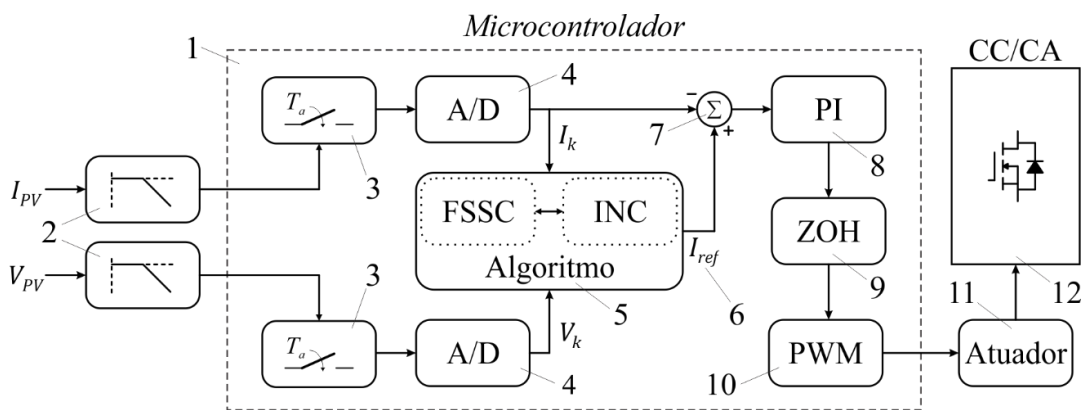


Figura 2

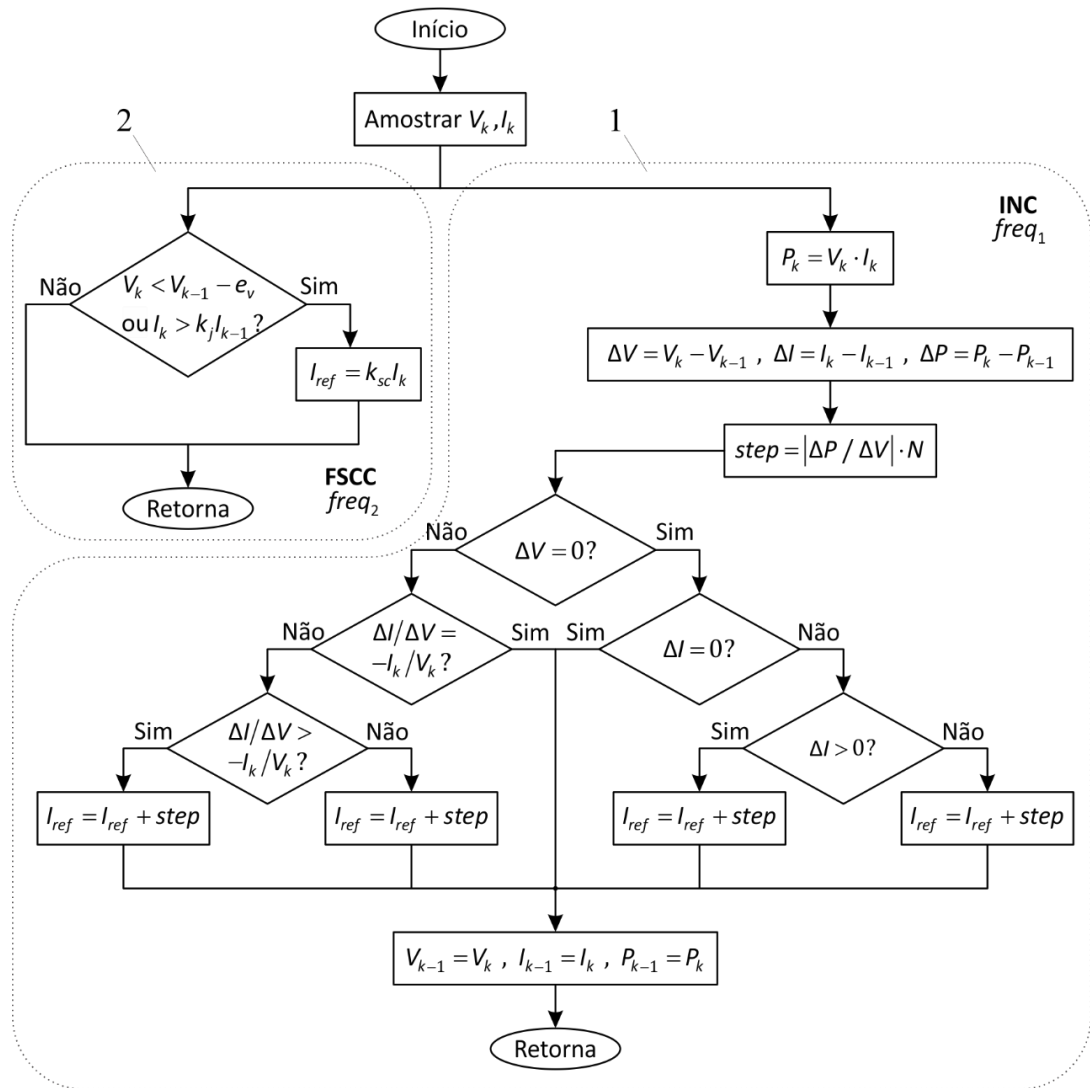


Figura 3

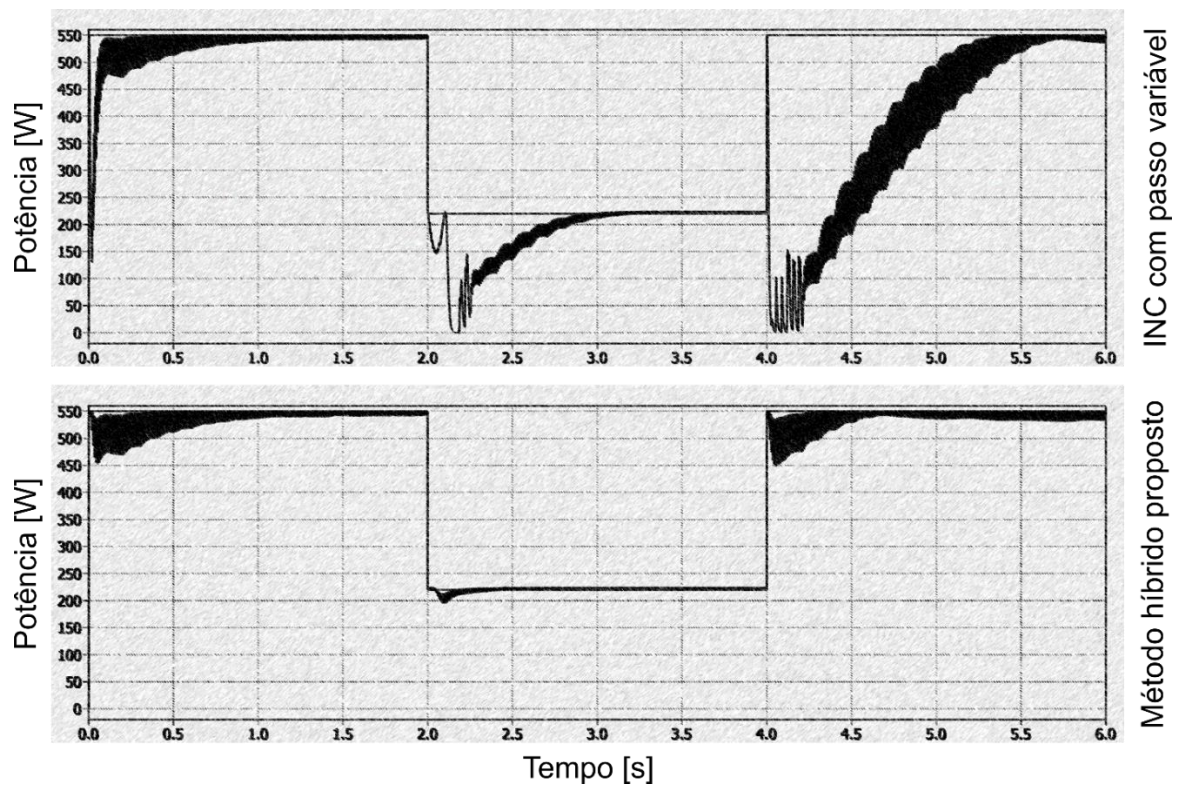


Figura 4

RESUMO**MÉTODO HÍBRIDO PARA RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA DE GERADORES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

A presente invenção refere-se a um método híbrido para controle de geradores de energia solar fotovoltaica, capaz de ativamente rastrear e atingir o estado otimizado da transferência de máxima potência (MPPT) de módulos ou arranjos fotovoltaicos submetidos à diferentes condições climáticas. O método compreende um algoritmo para controle dos interruptores do conversor de potência, baseado na interpretação de sensores de distúrbios de corrente (I_k) e de tensão (V_k) elétrica. O algoritmo possui rotinas de leitura de I_k e V_k , e usa estes parâmetros para determinar o ponto de máxima potência (MPP) a partir do método da condutância incremental (INC) e da corrente de curto-circuito fracionada (FSCC). As rotinas INC e FSCC são implementadas em conjunto. Variações abruptas de condições climáticas impactam I_k e V_k , e, a rotina FSCC corrige o rastreamento realizado pelo método INC. Essa implementação aumenta a eficiência dinâmica do MPPT. O ponto de operação rastreado pelo método pode ser usado como referência de corrente no controle do conversor de potência. O método pode ser utilizado em dispositivos capazes de processar a energia dos geradores fotovoltaicos em geral, *e.g.*, microinversores, inversores *string* online ou offline, carregadores de baterias ou sistemas de bombeamento de água.