

# Rastreamento do Ponto de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos utilizando o Algoritmo de Condutância Incremental Adaptativo

Gilberto Lopes Filho<sup>1</sup>, Ricardo Augusto Pereira Franco<sup>1</sup>, Flávio Henrique Teles Vieira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Universidade Federal de Goiás (UFG)  
Av. Universitária, nº. 1488 – Goiânia – GO – Brasil

gilberto.lopes@ufg.com, ricardofranco3@gmail.com, flavio\_vieira@ufg.br

**Abstract.** *In this work, a new maximum power point tracking algorithm (MPPT) for photovoltaic systems is proposed. The considered system is composed by a photovoltaic panel charging a battery using a buck-type dc-dc converter. Computational simulations are carried out to compare the performance of the MPPT algorithms, analyzing the output voltage and output power behavior at the photovoltaic panel. The evaluation scenarios considered were: using real data of irradiance and temperature. The results of the simulations show that the proposed algorithm provides better performance for the photovoltaic system than the main MPPT algorithms in the literature.*

**Resumo.** *Neste trabalho, um novo algoritmo de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT) para sistemas fotovoltaicos é proposto. O sistema considerado é composto por um painel fotovoltaico que carrega uma bateria usando um conversor CC-CC do tipo buck. Simulações computacionais são realizadas para comparar o desempenho dos algoritmos MPPT, analisando a tensão de saída e o comportamento da potência de saída no painel fotovoltaico. Foi considerado um cenário real, com irradiância e temperaturas medidas no painel fotovoltaico. Os resultados das simulações mostram que o algoritmo proposto fornece melhor desempenho para o sistema fotovoltaico do que os principais algoritmos MPPT da literatura.*

## 1. Introdução

A energia solar fotovoltaica é uma energia limpa e renovável, e tem aumentado sua popularidade nos últimos anos [Leite et al. 2018]. O conjunto de células fotovoltaicas formam um painel fotovoltaico. A geração de energia solar fotovoltaica está relacionada diretamente com o nível de irradiância incidente no painel fotovoltaico [Villalva et al. 2009].

Os painéis fotovoltaicos dificilmente são conectados diretamente a uma carga [Chaves et al. 2016]. No caso da alimentação de uma carga de corrente contínua (cc), esta conexão é feita por meio de um circuito intermediário, geralmente um conversor cc-cc. O conversor cc-cc necessita de um sinal de referência, denominado ciclo de trabalho (*duty cycle*), que determina o ganho de tensão da saída do conversor. Este sinal de referência, quando se trata de painéis fotovoltaicos, é determinado por um algoritmo que rastreia a máxima potência que o painel pode fornecer. Usualmente estes algoritmos são

denominados de algoritmos de Seguimento do Ponto de Máxima Potência ( *Maximum Power Point Tracking* - MPPT).

Em [Moçambique et al. 2011], é analisado o desempenho de um painel fotovoltaico conectado a um conversor cc-cc do tipo elevador de tensão (*boost*), com um controlador *fuzzy* que ajusta a tensão de máxima potência. Em [Carvalho et al. 2011], os autores apresentam uma abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência baseada no método Perturbe e Observe, medindo-se apenas a corrente de saída do painel. Em [Villalva 2010], é apresentada uma comparação entre alguns algoritmos de MPPT quando os painéis são conectados a uma carga qualquer com tensão constante. Em [Pallavee Bhatnagar and Nema 2013], os autores realizam uma análise de vários algoritmos MPPT distintos. Os trabalhos analisados se diferem entre si em aspectos como complexidade, custo de implementação, eficiência, sensores utilizados, acurácia no seguimento do ponto de máxima potência quando a temperatura e irradiância variam.

Neste trabalho, diferente dos anteriormente mencionados, propõe-se que o ponto de operação do painel fotovoltaico seja ajustado de acordo com o erro em relação à máxima potência que ele pode fornecer (calculado por meio de uma expressão com origem na derivada da curva *P-V* em relação à tensão) e à derivada da potência no tempo. Mais especificamente, propõe-se um algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência tendo como base o algoritmo de condutância incremental [Hussein et al. 1995] mas que considera a convergência do erro de estimação de máxima potência e a derivada da potência no tempo. Para o cenário de aplicação do algoritmo proposto, considera-se um painel fotovoltaico alimentando uma bateria por meio de um conversor cc-cc do tipo buck. São analisados os desempenhos de quatro algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência em comparação ao algoritmo proposto neste trabalho. As simulações são realizadas no ambiente computacional MATLAB/SIMULINK [MathWorks nd].

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a modelagem do painel fotovoltaico utilizada na simulação; a Seção 3 apresenta os principais algoritmos MPPT conhecidos na literatura; a Seção 4 apresenta o algoritmo de MPPT proposto neste trabalho, a metodologia empregada para avaliação de desempenho dos algoritmos considerados; os resultados das simulações dos algoritmos MPPT e as comparações de desempenho são mostrados na Seção 5; a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

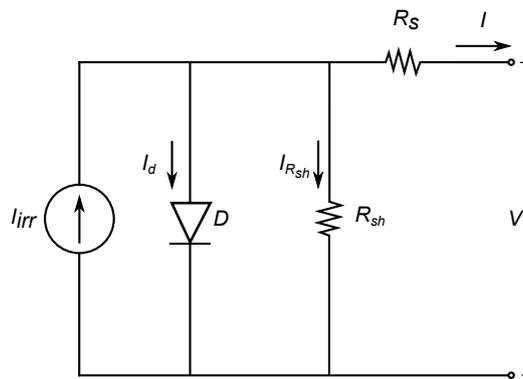
## 2. Modelo do painel fotovoltaico

O modelo do painel fotovoltaico com um diodo (*Single Diode Model* - SDM) é o modelo escolhido para este trabalho. Esta escolha se justifica pois o equacionamento do modelo de um diodo provê uma boa representação do painel fotovoltaico [Villalva et al. 2009]. O circuito elétrico do SDM é apresentado na Figura 1.

Aplicando a Lei de Kirchhoff das Correntes no circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico, apresentado na Figura 1, e realizando algumas manipulações algébricas, obtém-se a equação característica do modelo SDM:

$$I = I_{irr} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + IR_s}{N_s n V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

onde  $I_{irr}$  é corrente fotogerada,  $I_0$  é a corrente que flui através do diodo em função da tensão,  $I_{R_{sh}}$  é a corrente em  $R_{sh}$ ,  $N_s$  corresponde ao número de células em série que



**Figura 1. Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico (Modelo com um Diodo)**

compõem o módulo fotovoltaico,  $V$  e  $I$  são os valores de tensão e corrente de saída do painel, respectivamente, e  $V_t$  corresponde à tensão térmica (V)

Para realizar as simulações deste trabalho, foi escolhido o painel fotovoltaico Kyocera KC200GT [Kyocera nd]. As características elétricas deste painel nas Condições Padrões de Teste (*Standart Test Conditions*) são:  $I_{mp} = 7,61A$ ,  $V_{mp} = 26,3V$ ,  $P_{max} = 200W$ ,  $I_{sc} = 8,21A$ ,  $V_{oc} = 32,90V$ ,  $N_s = 54$ .

A curva de potência do painel fotovoltaico em função da tensão pode ser traçada para vários valores de irradiâncias. É desejável que o painel sempre opere na máxima potência, independente das condições ambientais, como temperatura e irradiância. Caso um algoritmo de MPPT não seja utilizado, o painel fotovoltaico operaria em um ponto da curva P-V abaixo do valor máximo, diminuindo valor da energia gerada.

### 3. Algoritmos de seguimento de ponto de potência máxima

A potência fornecida pelo painel fotovoltaico depende das condições ambientais (irradiância e temperatura) e da carga nele conectada. Assim, a impossibilidade de escolher arbitrariamente as condições climáticas faz com que todo o controle de potência seja feito por meio da carga vista pelo painel. Isso é realizado por meio de um conversor cc-cc. Para controlar a potência fornecida do painel para a carga, ajusta-se o ciclo de trabalho do conversor conforme desejado. A busca do ciclo de trabalho do conversor cc-cc que fornece a maior potência que o painel pode prover, para uma dada irradiância e temperatura, geralmente é realizada por meio de Algoritmos de MPPT.

Existem vários métodos de rastreamento do ponto de máxima potência propostos na literatura. As principais características desejadas nestes algoritmos são: rápida resposta dinâmica, erro pequeno em regime permanente, robustez a distúrbios, alta eficiência em diferentes níveis de potência. Neste trabalho são avaliados quatro algoritmos de MPPT conhecidos na literatura em diferentes cenários doravante descritos, sendo eles:

1. Fração da tensão de circuito-aberto [Villalva 2010];
2. Algoritmo Perturbe e Observe (P&O) [Moçambique 2012];
3. Algoritmo de Condutância Incremental [Hussein et al. 1995];
4. Algoritmo de Condutância Incremental com passo variável [Loukriz et al. 2016];

Neste trabalho, aprimoramentos para o algoritmo apresentado em [Loukriz et al. 2016] são propostos, avaliando seu desempenho comparado ao dos outros quatro algoritmos supracitados.

### 3.1. Fração da tensão de circuito-aberto

Este método consiste em fixar a tensão do painel fotovoltaico em um valor calculado a partir da tensão de circuito aberto. De acordo com [Esrám 2007], é possível escrever a tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) em função da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), conforme a Equação (2).

$$V_{mp} = V_{oc} \cdot k_v \quad (2)$$

onde  $k_v$  é a constante de proporcionalidade que depende das características do dispositivo fotovoltaico. Normalmente esta constante possui valor entre 71% e 76% [Esrám 2007].

### 3.2. Algoritmo Perturbe e Observe

Este método consiste em perturbar a tensão do painel fotovoltaico periodicamente, ou seja, aumentar ou decrementar este valor, e verificar o comportamento da potência. Se houver um aumento de potência, deve-se manter a perturbação no mesmo sentido, caso contrário, inverte-se o sentido da perturbação. Quando o ponto de máxima potência é alcançado, a tensão do painel oscila continuamente em torno deste ponto [Moçambique 2012].

### 3.3. Algoritmo de Condutância Incremental

O Algoritmo de Condutância Incremental baseia-se no cálculo da derivada da curva  $P$ - $V$  do painel fotovoltaico. Quando o valor da derivada é positivo, significa que o ponto de operação encontra-se na subida da curva. Por outro lado, quando a derivada é negativa, o ponto de operação encontra-se na descida da curva. O ponto de máxima potência é alcançado quando a derivada é nula [Villalva 2010].

O sistema tenta, portanto, encontrar o ponto na curva de potência onde  $\frac{dP}{dV} = 0$ . Desenvolvendo esta expressão, tem-se:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \approx I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (3)$$

Portanto, é possível perceber que:

- Caso  $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0$ , o ponto de operação encontra-se no ponto de máxima potência;
- Caso  $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} > 0$ , o ponto de operação está à esquerda do ponto de máxima potência;
- Caso  $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} < 0$ , o ponto de operação está à direita do ponto de máxima potência;

Baseado na análise anterior, toma-se a decisão de incrementar ou decrementar o valor da tensão do dispositivo fotovoltaico.

Na proposta original de [Hussein et al. 1995], o tamanho do passo, isto é, o quanto se aumenta ou diminui a tensão de referência  $V_{ref}$ , é fixo e pré-determinado. Atualmente alguns trabalhos mostram que tornar esse passo adaptativo pode melhorar o desempenho do algoritmo [Loukriz et al. 2016].

#### 4. Algoritmo MPPT considerando minimização de erro e derivada da potência

Neste trabalho, considera-se aplicação dos algoritmos de MPPT em um sistema composto por painel fotovoltaico, conversor cc-cc *buck* e uma bateria de 12 V. Várias simulações deste sistema foram realizadas onde tem-se o painel fotovoltaico conectado ao conversor *buck* e este à bateria. A bateria mantém a tensão de saída do conversor *buck* em 12 V, enquanto que a alteração do ciclo de trabalho deste conversor varia a tensão de entrada, provida pelo painel fotovoltaico. Ou seja, o algoritmo de MPPT altera a tensão de saída do painel fotovoltaico, atuando assim no ponto de operação da curva P-V.

Regulando o ciclo de trabalho do conversor cc-cc adequadamente por meio de um algoritmo de MPPT é possível aumentar a eficiência no carregamento da bateria.

Neste trabalho, propõe-se aprimorar a atualização do passo para o algoritmo condutância incremental de modo que este apresente uma melhora em seu desempenho. Em [Loukriz et al. 2016], a atualização do passo é dada conforme a seguinte equação:

$$V(k) = V(k - 1) \pm N \cdot \left| \frac{\Delta P}{\Delta V - \Delta I} \right| \quad (4)$$

onde  $V(k)$  é tensão na saída do painel fotovoltaico regulada pelo ciclo de trabalho do conversor cc-cc no instante  $k$ ;  $V(k - 1)$  é tensão no instante  $k - 1$ ;  $N$  é um fator de escala;  $\Delta I$ ,  $\Delta V$  e  $\Delta P$  são as derivadas da corrente, tensão e potência de saída do painel fotovoltaico. Os valores de  $\Delta I$ ,  $\Delta V$  e  $\Delta P$  são dados pela Equações (5), (6) e (7).

$$\Delta I = I(k) - I(k - 1) \quad (5)$$

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1) \quad (6)$$

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (7)$$

De acordo com a Equação (3), nota-se que quanto mais próximo do ponto de máxima potência, menor será o valor de  $I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V}$ , uma vez que esta expressão representa a derivada da curva de potência em relação à tensão. Manipulando esta expressão e a igualando a zero, obtém-se:

$$I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \rightarrow -\frac{I}{V} = \frac{\Delta I}{\Delta V} \rightarrow \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0, \quad (8)$$

que é válida apenas no ponto de máxima potência. Em outros pontos, a soma do lado esquerdo da Equação 8 não será igual a zero. Esta diferença entre o valor obtido e o desejado (zero), representa o erro em relação ao ponto de máxima potência, e pode então ser dado pela seguinte equação:

$$erro = \frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (9)$$

Minimizando este erro, é possível encontrar o ponto de máxima potência.

Observando a curva P-V de um painel fotovoltaico, nota-se que quanto mais próximo do ponto de máxima potência, menor deve ser o valor do passo da tensão para alcançá-lo. Portanto, neste artigo se propõe que o valor do passo dado na curva P-V seja dependente do *erro* dado pela Equação (9). Além disso, para aumentar a velocidade de convergência e diminuir as oscilações em torno do ponto de máxima de potência, utiliza-se também a derivada da potência no tempo, dada pela Equação (7). Desta forma, a proposta de atualização do passo deste trabalho é representada pela seguinte equação:

$$V(k) = V(k - 1) \pm N \cdot |\Delta P \cdot erro| \quad (10)$$

onde  $N$  é um fator de escala e foi ajustado manualmente. Foram testados vários valores entre 0,01 e 1, e o que apresentou os melhores resultados foi  $N = 0,15$ .

Observando a Equação (10), nota-se que quanto mais distante do ponto de máxima de potência, maior será o *erro*, e portanto maior será o passo de tensão dado pelo algoritmo. A medida que se aproxima do ponto de máxima potência, o erro diminui, e os passos do algoritmo se tornam cada vez menores. Além disso, o termo  $\Delta P$  provê uma maior velocidade de convergência para o algoritmo, principalmente em mudanças abruptas das condições ambientais, como irradiância e temperatura. Para que o tamanho do passo do algoritmo não seja demasiadamente grande, foi definida uma saturação no valor do passo, de modo que a maior alteração de tensão entre uma iteração  $k$  e  $k + 1$  seja de  $2V$ .

#### 4.1. Metodologia de Avaliação dos Algoritmos

Com o objetivo de simular o desempenho do algoritmo proposto, um cenário foi definido. O cenário de teste possui valores de irradiância e temperatura reais, medidos de janeiro a dezembro de 2017. Os dados reais de irradiância e temperatura foram cedidos pelo Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) com o título “Instalação de um Sistema de Geração Solar Fotovoltaica de 34 kWp em telhado de um prédio da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) Universidade Federal de Goiás (UFG)”, em Goiânia GO.

As avaliações dos algoritmos de MPPT são realizadas por meio dos seguintes parâmetros: Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM), a eficiência do algoritmo em relação a energia produzida, e a energia gerada. A REQM é dada pela Equação (11), onde  $P_{painel}(t)$  é a potência instantânea do painel encontrada pelo algoritmo MPPT, e  $P_{ideal}(t)$  é a máxima potência que o painel poderia fornecer para aquela situação de irradiância e temperatura, e  $m$  é número de amostras. A  $P_{ideal}(t)$  foi estimada por meio de uma varredura da curva P-V.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_1^m (P_{painel} - P_{ideal})^2} \quad (11)$$

A eficiência é dada pela razão entre a energia produzida pelo painel e a máxima energia que este poderia produzir caso estivesse sempre operando no ponto de máxima de potência. A eficiência é dada pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{painel}(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{ideal}(t) dt} \quad (12)$$

A energia produzida pelo painel é calculada de acordo com:

$$Energia = \int_{t_1}^{t_2} P_{painel}(t) dt \quad (13)$$

## 5. Simulações e resultados

Conforme mencionado na Seção 4, foi considerado um caso de irradiância e temperatura variáveis (medidas reais) para análise de desempenho dos algoritmos de MPPT. Em [Lopes Filho et al. 2018], é realizada a estimação dos parâmetros do modelo de 1 diodo para irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura do painel de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , e posteriormente sua adaptação em função da irradiância e temperatura. Os valores obtidos por [11] foram utilizados neste trabalho, e têm como valor:  $n = 1,2277$ ;  $R_s = 0,1477(\Omega)$ ;  $R_{sh} = 92, 31(\Omega)$ ;  $I_0 = 32, 23(\mu A)$  e  $I_{irr} = 8, 223A$ . A adaptação dos parâmetros em função das condições ambientais de irradiância e temperatura também é realizada neste trabalho, conforme feito em [Lopes Filho et al. 2018].

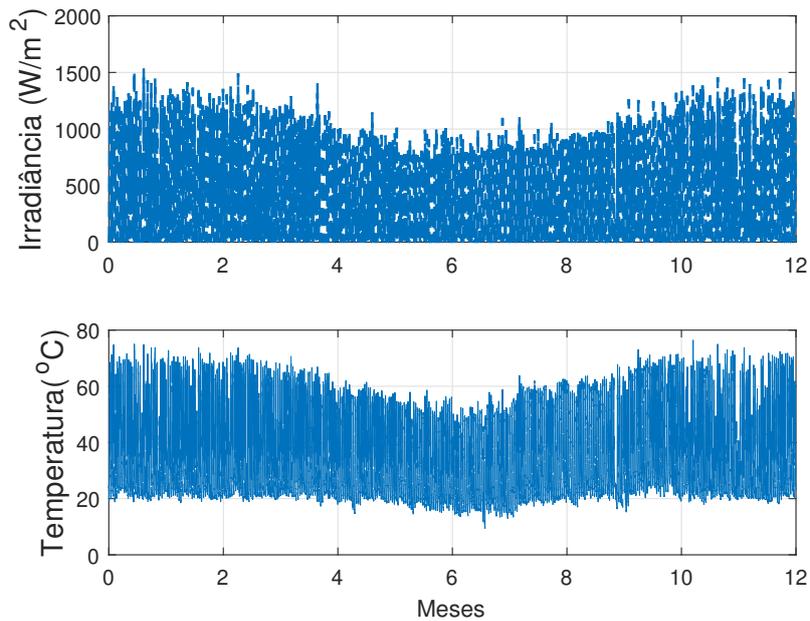
### 5.1. Irradiância e temperatura reais

No cenário considerado neste trabalho, os algoritmos de MPPT são analisados com a irradiância e temperatura reais, medidas no painel fotovoltaico Kyocera KC200GT [Kyocera nd], localizado na cidade de Goiânia - GO. Os dados foram coletados de 1º janeiro a 31 dezembro de 2017. A Figura 2 apresenta os valores de irradiância e temperatura medidas no painel fotovoltaico no ano de 2017. O tempo de amostragem dos valores foi de 1 em 1 minuto.

A Figura 3 apresenta uma comparação da energia gerada mensalmente no ano de 2017 pelo painel fotovoltaico utilizando o algoritmo proposto, o algoritmo de [Loukriz et al. 2016] e o valor máximo. Observa-se que durante os 12 meses a curva do algoritmo proposto ficou mais próxima do valor desejado do que a curva do algoritmo de [Loukriz et al. 2016]. Portanto, utilizando o algoritmo proposto é possível gerar mais energia.

A Tabela 1 apresenta uma comparação dos desempenhos entre os algoritmos para o caso com irradiância e temperatura reais.

O algoritmo proposto apresentou a melhor eficiência,  $96,84\%$ , produzindo desta forma a maior quantidade de energia,  $363,22 \text{ kWh}$ . Observando o REQM, nota-se que



**Figura 2. Irradiância e Temperatura medidas no painel fotovoltaico no ano 2017**

**Tabela 1. Comparação dos algoritmos no caso com irradiância e temperatura reais medidas no ano de 2017**

Algoritmo	REQM	Eficiência	Energia (Wh)
Proposto	9,2577	0,9684	$3,6322 \cdot 10^5$
Fração da de $V_{oc}$	14,5296	0,8255	$3,0687 \cdot 10^5$
Perturbe e Observe	12,9847	0,8850	$3,3271 \cdot 10^5$
Cond. Inc.	12,1254	0,8996	$3,3745 \cdot 10^5$
Loukriz et al. [Loukriz et al. 2016]	11,3087	0,9546	$3,5807 \cdot 10^5$

o algoritmo proposto apresentou o menor erro entre todos os analisados. O algoritmo de [Loukriz et al. 2016] apresenta uma eficiência menor do que a do algoritmo proposto, 95,46% contra 96,84%. Entretanto, esta diferença se torna mais notável quando se observa a energia gerada. Com o algoritmo proposto foi possível gerar mais de 363 *kWh*, enquanto que com o de [Loukriz et al. 2016] apenas 358 *kWh*. Os resultados revelam que é possível afirmar que ao longo do ano de 2017, na média, o desempenho do algoritmo proposto foi superior ao dos demais comparados neste trabalho.

## 6. Conclusões

Este trabalho apresentou uma proposta de atualização do passo do algoritmo condutância incremental, considerando o mesmo variável. No cenário analisado, irradiância e temperatura reais, o algoritmo proposto mostrou um desempenho superior, apresentando uma convergência mais rápida e melhor eficiência. Esta eficiência afeta diretamente a produção de energia do painel fotovoltaico. Um algoritmo mais eficiente, como o proposto neste trabalho, faz com que o painel produza mais energia, o que justifica a sua implementação.

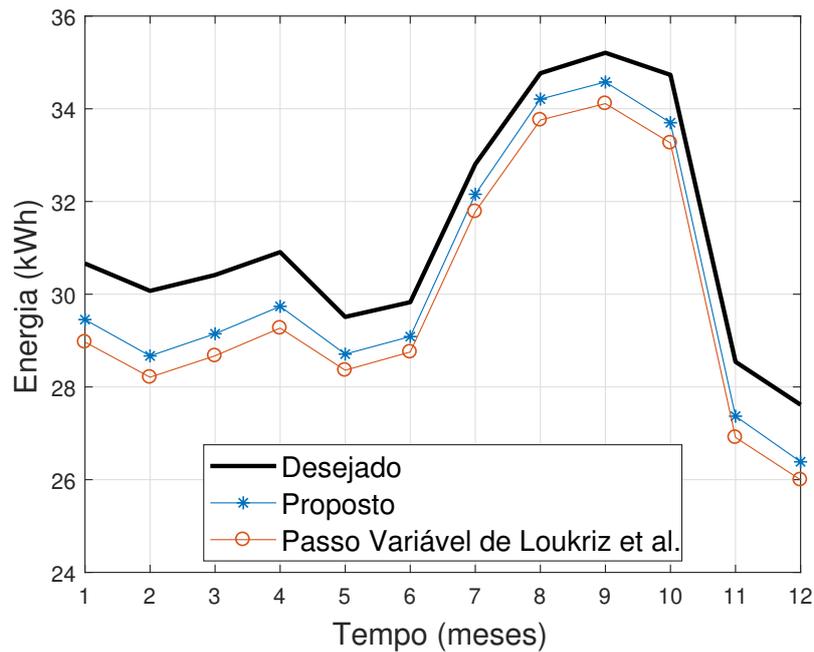


Figura 3. Comparação da energia gerada por mês utilizando cada algoritmo

## Referências

- Carvalho, E. P., Gonçalves, J. B., and Prado, P. P. L. (2011). A new approach for maximum power point tracking. *21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*.
- Chaves, E. N., Reis, J. H., Coelho, E. A. A., de Freitas, L. C. G., Junior, J. B. V., and Freitas, L. C. (2016). Simulated annealing-mppt in partially shaded pv systems. *IEEE Latin America Transactions*, 14(1):235–241.
- Esrām, Trishan e Chapman, P. L. (2007). Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Transactions on energy conversion*, 22(2):439–449.
- Hussein, K., Muta, I., Hoshino, T., and Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(1):59–64.
- Kyocera (n.d.). *High efficiency multicrystal photovoltaic module KC200GT (Datasheet)*.
- Leite, M. C. C., Vieira, F. A. M., Silva, V. B., Fortes, M. Z., and Dias, D. H. N. (2018). Harmonic analysis of a photovoltaic systems connected to low voltage grid. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1):112–117.
- Lopes Filho, G., Franco, R. A. P., and Vieira, F. H. T. (2018). Estimaco de parâmetros de painéis fotovoltaicos utilizando o algoritmo firefly com atualizaco em funço da irradiaco e temperatura. In *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018*.
- Loukriz, A., Haddadi, M., and Messalti, S. (2016). Simulation and experimental design of a new advanced variable step size incremental conductance mppt algorithm for pv systems. *ISA transactions*, 62:30–38.
- MathWorks (n.d.). *Softwares de simulaco: Matlab e Simulink*.

- Moçambique, N. E. M. (2012). *Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. PhD thesis, Universidade de São Paulo.
- Moçambique, N. E. M., Machado, R. Q., and Oliveira, V. A. (2011). A fuzzy pd-pi control strategy to track the voltage references of photovoltaic arrays. In *2011 9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, pages 1162–1167.
- Pallavee Bhatnagar, A. and Nema, B. (2013). Conventional and global maximum power point tracking techniques in photovoltaic applications: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(3):032701.
- Villalva, M. G., Gazoli, J. R., and Filho, E. R. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208.
- Villalva, M. G. e. o. (2010). Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.