

Investigação de Estratégias de Controle para Conversores de Potência Boost Aplicados em Sistemas Fotovoltaicos

Alan Tácio Magalhães Haddad* Renan L. P. de Medeiros*
 Florindo A. C. Ayres Júnior* Iury V. de Bessa*
 Nei J. S. Farias*

* Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, AM,
 (e-mail: alantaciom@gmail.com, renanlandau@ufam.edu.br,
 florindoayres@ufam.edu.br, iurybessa@ufam.edu.br,
 neijunior1995@outlook.com).

Abstract: Photovoltaic panels are devices that is used to supply energy via solar radiation. However, these panels depends on the stochastic variables, such as temperature and irradiance, and offer variable voltage levels during the the day and are sometimes found on the market with nominal voltage specification with low load values that require high power level. To solve these problems, in this paper, control structures were used applied in the DC-DC Boost converter feeder by a photovoltaic system. This study carried out several simulation results by using the Matlab, aiming to investigates which control methodology (i.e. Root locus, Pole placement and State feedback) have the better performance than others and ensure the stability of the system.

Resumo: Os painéis fotovoltaicos são dispositivos utilizados para fornecimento de energia por meio da radiação solar. Entretanto, por dependerem de variáveis estocásticas, como temperatura e irradiância, estes dispositivos oferecem níveis de tensões variáveis ao longo do dia e, por vezes, são encontrados em mercado com especificação nominal de tensão com baixo valor para cargas que requerem alto nível de potência. Para resolver estes problemas, neste artigo, serão projetados controladores para conversores *Boost* aplicados em sistemas fotovoltaicos com o objetivo de regular e elevar o nível de tensão fornecido por estes painéis. Este estudo foi realizado por meio de diversas simulações utilizando o ambiente computacional Matlab, objetivando investigar qual metodologia de controle, como: Lugar geométrico das raízes, alocação de polos e realimentação de estado, possui o melhor desempenho e garante a estabilidade do sistema.

Keywords: Photovoltaic panels; Boost converter; control; simulation; Root locus; Pole placement; State feedback.

Palavras-chaves: Painéis fotovoltaicos; conversores *Boost*; controle; simulação; Lugar geométrico das raízes; Alocação de pólos; Realimentação de estados.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar, uma das fontes renováveis mais disponíveis e confiáveis no meio ambiente, é amplamente alvo de estudos para o seu desenvolvimento e implementação com uma maior qualidade, eficiência e confiabilidade. Esta energia é obtida por meio de placas solares fotovoltaicas que são instaladas de maneira rápida e empregadas para o fornecimento de energia elétrica em diversos locais como: residências, edifícios, zonas rurais e pequenas comunidades afastadas de grandes centros urbanos, desassistidas de uma geração elétrica convencional (Singh and Pandit, 2013; Arulmurugan and Vanitha, 2012; Bansal, 2013; Kadri et al., 2012).

Os painéis solares fotovoltaicos são constituídos por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas que utilizam da radiação solar para a geração de eletricidade através do efeito fotovoltaico (Singh and Pandit, 2013; Bansal, 2013). Estes painéis, entretanto, são encontrados no mercado

muitas vezes oferecendo uma tensão de saída relativamente baixa para os requisitos de cargas que necessitam de tensão ou potência mais elevadas (Singh and Pandit, 2013; Mohamed et al., 2016). Além disto, a tensão fornecida por esses painéis pode ser variável e incerta, devido às variáveis associadas a esta forma de geração de energia elétrica serem estocásticas como a temperatura e a irradiância ao longo do dia (Marcello et al., 2018; Guo et al., 2017).

Para solucionar estes problemas, o uso de conversores de potência CC-CC de topologia *Boost* aplicados ao sistema fotovoltaico é fundamental, pois são dispositivos capazes de converter uma tensão de entrada CC em um nível maior de tensão de saída CC por meio do ajuste de seu ciclo de trabalho, podendo ser empregados em situações onde necessita-se de alteração e de regulação do nível de tensão em redes de corrente contínua, além de possuírem alta eficiência, operação confiável e serem facilmente desenvolvidos e controlados (Singh and Pandit, 2013; Mohamed et al.,

2016; Hart, 2011; Mohan, 2012; Marcello et al., 2018; Guo et al., 2017).

Com base no estado da arte levantado, este artigo tem por objetivo investigar estratégias de controle aplicadas a um conversor *Boost* alimentado por um sistema fotovoltaico, afim de garantir o desempenho e a estabilidade do sistema, regulando e elevando a tensão fornecida pelo painel.

A continuação deste artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção 2 descreve como é constituído o sistema proposto. As Seções 3 e 4 mostram, respectivamente, a modelagem matemática de painéis fotovoltaicos e dos conversores do tipo *Boost*. A Seção 5 apresenta a revisão conceitual e matemática das estratégias de controle abordadas. A Seção 6 relata o desenvolvimento da estrutura do sistema proposto. A Seção 7 descreve os testes de simulação efetuados e mostra os respectivos resultados. Por fim, a Seção 8 apresenta as principais conclusões do estudo.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

O diagrama em blocos do sistema de controle proposto a ser simulado neste artigo é mostrado na Figura 1, baseado em Mohamed et al. (2016), e consiste em painel solar fotovoltaico, dispositivo conversor de potência CC-CC de topologia *Boost*, controlador, PWM e carga. Para a elaboração dos projetos de controladores, é necessário a modelagem matemática do painel fotovoltaico e do conversor, de forma que também seja possível a simulação e a análise da dinâmica do sistema.

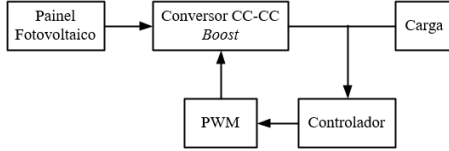


Figura 1. Diagrama em blocos do sistema proposto.

3. PAINEL FOTOVOLTAICO

As células fotovoltaicas agrupadas formam os painéis e são as componentes elementares do sistema fotovoltaico, convertendo diretamente a luz solar em eletricidade (Villalva et al., 2009).

3.1 Modelagem do Painel Fotovoltaico

O modelo de um circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é mostrado na Figura 2. Ver Villalva (2010).

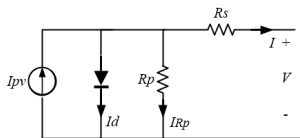


Figura 2. Circuito equivalente de célula fotovoltaica.

Onde, I_{pv} é a corrente gerada pela incidência da luz, R_s corresponde à resistência em série e R_p à resistência em paralelo, ambas representam perdas ôhmicas no material, e

I_d corresponde à corrente no diodo devido à característica de semiconductor do dispositivo. Desta maneira, constata-se que a corrente fornecida pela célula pode ser calculada por meio das seguintes relações:

$$I = I_{pv} - I_d - I_{R_p} \quad (1)$$

$$I_{pv} = [I_{pv,n} + K_I(T - T_n)] \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

Onde, T é a temperatura de operação, K_I é o coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito e G é a irradiância na superfície do painel. Os termos de subíndice “n” representam os valores nominais, geralmente especificados nos dados de placa do dispositivo fotovoltaico ($G_n = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T_n = 298,15 \text{ K}$).

A corrente no diodo é dada por:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Onde, V é a tensão fornecida nos terminais do dispositivo, $V_t = kT/q$ é a tensão térmica das células onde k é constante de Boltzmann e q é a constante de carga elementar do elétron, a é o fator de idealidade do material semiconductor que compõe a célula, e I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo e é dada por meio da seguinte relação:

$$I_0 = I_{0,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{ak} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4)$$

Em que $E_g = 1,12 \text{ eV}$ é a energia de banda proibida do semiconductor. $I_{0,n}$ é a corrente de saturação reversa nominal dada por:

$$I_{0,n} = \frac{I_{sc,n}}{\exp \left(\frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}} \right) - 1} \quad (5)$$

Onde, $I_{sc,n}$ é a corrente nominal fornecida de curto-circuito, $V_{oc,n}$ é a tensão nominal fornecida de circuito aberto e $V_{t,n}$ é a tensão térmica de N_s células em série na temperatura nominal T_n . A corrente que flui através da resistência em paralelo é dada por:

$$I_{R_p} = \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (6)$$

Desta forma, de maneira geral, ao agrupar as células fotovoltaicas em série ou paralelo, formando o painel fotovoltaico, a equação que descreve o comportamento do circuito é dado por meio da seguinte relação:

$$I = I_{pv} N_p - I_0 N_p \left[\exp \left(\frac{V + R_s (N_s/N_p) I}{V_t a N_s} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s (N_s/N_p) I}{R_p (N_s/N_p)} \quad (7)$$

Onde, N_s é o número de células em série e N_p é o número de células em paralelo. Neste artigo, o modelo de painel fotovoltaico utilizado foi o KC200GT, os seus parâmetros são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do painel fotovoltaico KC200GT em condições nominais.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
P_{max}	200,143 W	$V_{oc,n}$	32,9 V
$I_{pv,n}$	8,214 A	$I_{sc,n}$	8,21 A
R_p	415,405 Ω	a	1,3
R_s	0,221 Ω	N_p	1
K_I	0,0032 A/K	N_s	54

4. CONVERSOR BOOST

O conversor de potência CC-CC do tipo *Boost* é um circuito eletrônico em que a tensão de saída é maior ou igual que a tensão de entrada, isto ocorre devido à comutação periódica de uma chave estática. O nível de tensão fornecido para a carga é ajustado por meio do ciclo de trabalho de chaveamento (Hart, 2011).

4.1 Modelagem do Conversor Boost

O circuito de um conversor *Boost* é mostrado na Figura 3.

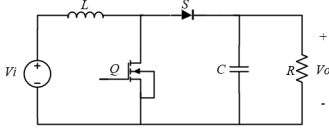


Figura 3. Circuito de um Conversor *Boost*.

A tensão de entrada V_i e a tensão de saída V_o são relacionadas por meio do ciclo de trabalho D , conforme mostra a equação a seguir:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (8)$$

- Chave fechada: O circuito equivalente do conversor quando a chave está fechada é mostrado na Figura 4(a). Aplicando-se as leis de *Kirchoff*, podem-se obter as seguintes relações que descrevem o comportamento do sistema:

$$\dot{I}_L = \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (9)$$

$$\dot{V}_C = \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{RC} \quad (10)$$

$$V_o = V_C \quad (11)$$

- Chave Aberta: Quando a chave está aberta, o conversor *Boost* apresenta um circuito equivalente conforme mostrado na Figura 4(b). Neste caso, as equações obtidas são mostradas a seguir:

$$\dot{I}_L = \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i - V_C}{L} \quad (12)$$

$$\dot{V}_C = \frac{dV_C}{dt} = \frac{I_L}{C} - \frac{V_C}{RC} \quad (13)$$

$$V_o = V_C \quad (14)$$

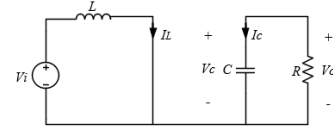
- Modelo por Espaço de Estados: Como a tensão de saída do conversor depende diretamente do valor do ciclo de trabalho, torna-se necessário obter o modelo matemático linearizado em torno de um ponto de operação.

Este modelo linearizado em espaço de estados que descreve o comportamento do conversor é representado em (15), estando em função de uma pequena variação Δd em torno de um ponto de operação \bar{D} do ciclo de trabalho.

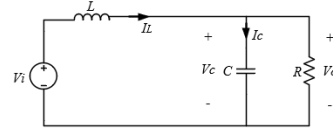
$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & -(1-\bar{D})/L \\ (1-\bar{D})/C & -1/(RC) \end{bmatrix} \Delta x + \begin{bmatrix} \bar{V}_C/L \\ -\bar{I}_L/C \end{bmatrix} \Delta d \\ \Delta y &= [0 \ 1] \Delta x \end{aligned} \quad (15)$$

Onde,

$$\Delta \dot{x} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_L \\ \Delta \dot{V}_C \end{bmatrix}, \quad \bar{I}_L = \frac{V_i}{(1-\bar{D})^2 R} \quad \text{e} \quad \bar{V}_C = \frac{V_i}{1-\bar{D}} \quad (16)$$



(a)



(b)

Figura 4. Circuito equivalente. (a) Chave fechada. (b) Chave aberta.

Os parâmetros do conversor *Boost* utilizado neste artigo são mostrados na Tabela 2, onde o valor adotado de V_i para projetar os controladores é o mesmo que a máxima tensão fornecida pelo painel fotovoltaico em condições nominais (32,9 V), R é a própria carga que será alimentada pelo sistema e f é a frequência de chaveamento do transistor.

Tabela 2. Parâmetros do Conversor *Boost*.

Parâmetro	Valor
L	1 mH
C	2000 uF
R	25 Ω
V_i	32,9 V
f	20 kHz
\bar{D}	0,7

5. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE CLÁSSICO

5.1 Lugar Geométrico das Raízes – LGR

O Lugar Geométrico das Raízes é uma estratégia de controle clássica em que os pólos do sistema de controle em malha fechada são alocados de forma gráfica no plano complexo, plano s , podendo-se analisar graficamente em cada situação a estabilidade e a resposta transitória (Ogata, 1970; Nise, 2000).

No projeto de controlador utilizando LGR, são encontrados graficamente os valores dos ganhos pelos quais os pólos do sistema de controle em malha fechada são posicionados no plano s , onde as especificações e a característica da resposta transitória desejadas ao sistema são atendidas.

Definindo-se o *overshoot* (ovs) e o tempo de acomodação (t_{ss}) da resposta transitória desejada, é possível delimitar a região do plano s na qual os pólos possam ocupar e então determinar os valores dos ganhos que satisfaçam tal condição. Na Figura 5, é exemplificado um plano com região delimitada (hachurada), mostrando a relação com o coeficiente de amortecimento ζ e a frequência natural ω_n .

5.2 Alocação de Pólos

A alocação de pólos é uma estratégia de controle clássica que utiliza o método algébrico para posicionar os pólos do sistema em malha fechada nas posições desejadas no plano s . Nesta estratégia, a equação característica do sistema

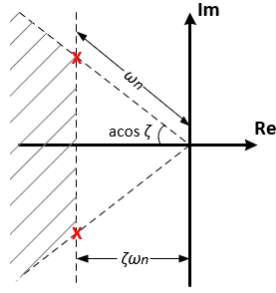


Figura 5. Região delimitada do plano s .

de controle, na qual deseja-se obter os valores dos ganhos do controlador, é comparada algebricamente com uma equação característica desejada. Desta maneira, considere a seguinte equação característica de quarta ordem de um sistema:

$$\Delta_{sis}(s) = s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4 \quad (17)$$

Tendo em vista a equação característica desejada mostrada em (18), onde p_1 e p_2 são pólos auxiliares (de valores muito superiores em relação aos pólos dominantes) colocados de modo a satisfazer a ordem da equação característica do sistema de controle em (17) sem comprometer o desempenho da resposta transitória desejada:

$$\Delta_{des}(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + p_1)(s + p_2) \quad (18)$$

É possível determinar os valores dos coeficientes da equação característica e os valores dos ganhos do controlador do sistema de controle por meio da comparação algébrica entre as equações (17) e (18) conforme descrito a seguir:

$$\Delta_{des}(s) = \Delta_{sis}(s) \quad (19)$$

5.3 Realimentação de Estados

Em um sistema de controle onde a planta possui todos os seus estados controláveis, é possível realizar o projeto do controlador por meio da estratégia de realimentação de estados. Neste método, a equação característica e os autovalores da matriz de estados resultante do sistema de controle em malha fechada são determinados pela realimentação de estados da planta (D'Azzo and Houpis, 1988).

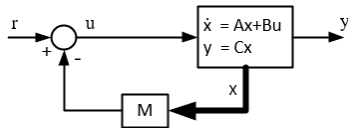


Figura 6. Sistema de controle por Realimentação de Estados.

Um sistema de controle por realimentação de estados é representado na Figura 6, na qual A , B e C são as matrizes do espaço de estados da planta, M é a matriz de realimentação de estados, e r é a referência. A lei de controle u é dada por:

$$u = r - Mx \quad (20)$$

Substituindo (20) no modelo de espaço de estados da planta, obtém-se:

$$\dot{x} = Ax + B(r - MX) \quad (21)$$

Portanto,

$$\dot{x} = (A - BM)x + Br \quad (22)$$

Os autovalores da matriz resultante $(A - BM)$ são as raízes da equação característica do sistema de controle em malha fechada conforme mostrado em (23), onde I é matriz identidade.

$$\Delta(s) = |sI - A + BM| = 0 \quad (23)$$

Sendo assim, definindo-se uma equação característica desejada, é possível o sistema de controle atendê-la por meio da atribuição adequada de valores aos elementos da matriz M .

6. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA PROPOSTO

Possuindo o modelo matemático e o circuito equivalente do painel fotovoltaico e do conversor *Boost* e utilizando os valores dos parâmetros expressos nas Tabelas 1 e 2, é possível o desenvolvimento do sistema de controle proposto na Seção 2 e ilustrado na Figura 1.

6.1 Estrutura do Sistema

Primeiramente, para o acoplamento do painel fotovoltaico e conversor, foram utilizados um resistor $R_{ac} = 0,7 \Omega$ e um capacitor $C_{ca} = 2000 \mu F$. No sistema, o conversor *Boost* tem como tensão de entrada V_i a tensão de saída fornecida pelo painel fotovoltaico, conforme ilustrado na Figura 7.

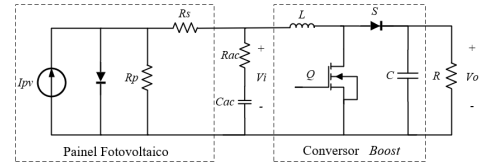


Figura 7. Acoplamento do painel fotovoltaico e conversor *Boost*.

6.2 Projeto dos Controladores

Os controladores fornecem como sinal de controle o valor do ciclo de trabalho D_c , em torno do ponto de operação \bar{D} , atuando diretamente no processo de chaveamento do transistor. Para realizar esta conexão, utilizou-se a técnica de chaveamento PWM de característica complementar ($D_c \approx 1 - \bar{D} = 0,3$).

A planta a ser controlada tem como modelo matemático o espaço de estados do conversor apresentado em (15). A partir disto, projetaram-se os controladores para que a resposta transitória da tensão de saída V_o do sistema atendesse às especificações de desempenho propostas a seguir, onde e_{ss} é o erro da resposta ao degrau:

$$o_{vs} < 10\%, \quad t_{ss} < 40 \text{ ms} \quad \text{e} \quad e_{ss} = 0 \quad (24)$$

As estruturas dos controladores são mostradas na Figura 8, e os valores dos parâmetros obtidos por meio das respectivas estratégias de controle são expressos nas Tabelas 3 e 4.

7. SIMULAÇÃO

Foram desenvolvidos três testes para validação dos controladores, são eles: variação da referência (*Ref*), variação da temperatura (T) e variação da irradiância (G).

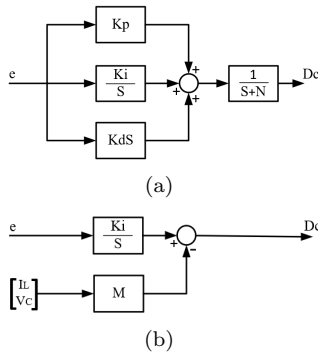


Figura 8. Estrutura do controlador. (a) Alocação de Pólos e LGR. (b) Realimentação de Estados.

Tabela 3. Parâmetros dos controladores por LGR e Alocação de Pólos.

Parâmetro	LGR	Alocação de Pólos
K_p	0,588	1,044
K_d	0,028	0,034
K_i	206,067	456,007
N	1500	1669,8

Tabela 4. Parâmetros do controlador por Realimentação de Estados.

Parâmetro	Realimentação de Estados
K_i	0,045
M	[0,0011 - 0,0019]

7.1 Descrição dos Testes

Para variação da referência, mantiveram-se os valores de temperatura e irradiância constantes e em condições nominais. Neste teste, teve-se como objetivo avaliar o desempenho dos controladores ao elevar a tensão fornecida à carga para valores maiores que a máxima tensão fornecida pelo painel em condições nominais.

Para variação da temperatura, mantiveram-se os valores da referência e a irradiância constantes. Sabendo-se que o aumento da temperatura acarreta na diminuição da tensão fornecida pelo painel, neste teste, objetivou-se avaliar o desempenho dos controladores ao manter a tensão de saída constante e elevada mediante às variações de temperatura.

Por fim, para a variação de irradiância, mantiveram-se os valores da referência e a temperatura constantes. Neste caso, a diminuição da irradiância também ocasiona a diminuição da tensão fornecida pelo painel fotovoltaico, sendo assim, este teste teve como objetivo também avaliar o desempenho dos controladores ao manter a tensão de saída constante mediante às variações de irradiância.

7.2 Análise de Resultados

Os resultados obtidos para os controladores, por meio da simulação em MATLAB/Simulink, são apresentados nas Figuras 9, 10 e 11, onde deseja-se analisar o comportamento da tensão de saída V_o e o sinal de controle D_c perante às variações descritas.

Verifica-se na Figura 9 que, para o teste de variação da referência, todos os controladores conseguiram atender a dinâmica desejada, observa-se que metodologia de re-

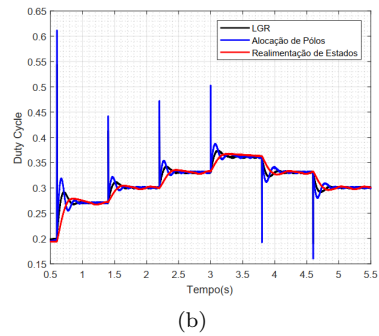
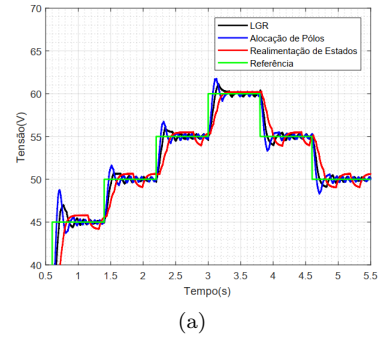


Figura 9. Teste de variação da referência. (a) Tensão de saída - V_o . (b) Sinal de controle - D_c .

alimentação de estados apresentou melhor desempenho, enquanto que a metodologia de alocação de polos obteve maior sobressinal em comparação com as demais.

Observa-se na Figura 10 que, para o teste de variação da temperatura, a metodologia de realimentação de estados não conseguiu corrigir adequadamente as oscilações. Além disso, observa-se que a metodologia de LGR apresentou o melhor comportamento dinâmico em comparação com as demais metodologias.

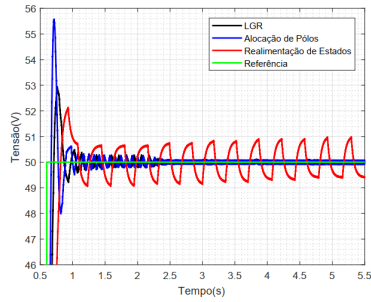
É verificado na Figura 11 que, para o teste de variação da irradiância, a metodologia de alocação de polos não consegue corrigir adequadamente todas as oscilações e promove instabilidade ao sistema, enquanto que as metodologias de LGR e realimentação de estados conseguem corrigir de maneira adequada as oscilações. Em relação ao demais, o controlador de LGR apresentou o melhor desempenho dinâmico.

8. CONCLUSÃO

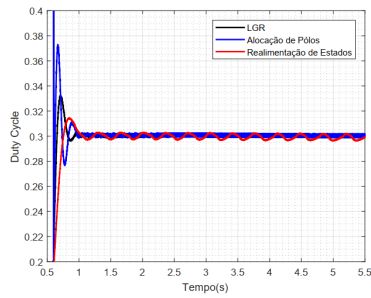
Em relação à problemática descrita neste artigo, constata-se que os controladores investigados aplicados ao conversor *Boost* em sistema fotovoltaico obtiveram êxito no objetivo de elevar e regular a tensão fornecida pelo painel mediante às variações de temperatura e irradiância. De maneira geral, o controlador por LGR foi o que obteve melhores resultados nos testes visto que, em comparativo aos demais, possuiu menor *overshoot*, menor tempo de acomodação, erro ao degrau nulo e apresentou um comportamento dinâmico superior, frente às variações de setpoint de tensão, variação de temperatura e irradiância.

REFERÊNCIAS

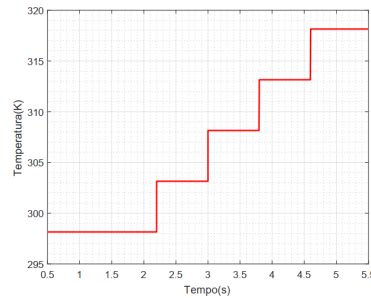
Arulmurugan, R. and Vanitha, N.S. (2012). Optimal design of dc-dc boost converter with closed loop control pid



(a)



(b)

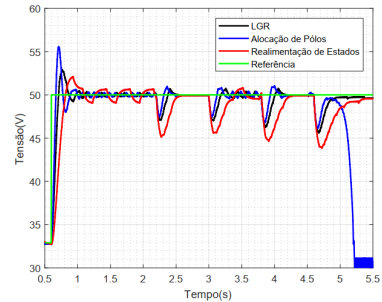


(c)

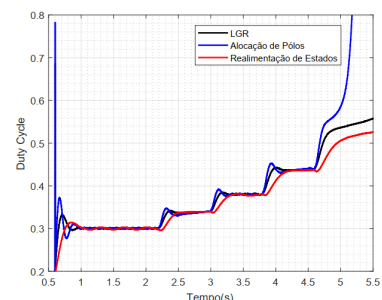
Figura 10. Teste de variação da temperatura. (a) Tensão de saída – V_0 . (b) Sinal de controle – D_c . (c) Temperatura – T .

mechanism for high voltage photovoltaic application. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2(4).

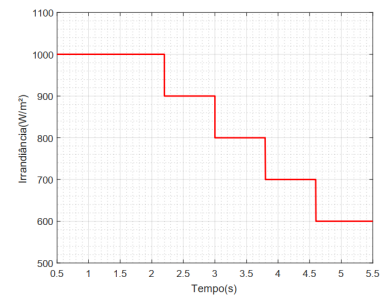
- Bansal, P. (2013). Matlab/simulink based-analysis of photovoltaic array fed multilevel boost converter. *National Conference on Emerging Trends in Electrical, Instrumentation & Communication Engineering*, 4(7).
- D’Azzo, J.J. and Houpis, C.H. (1988). *Linear Control System Analysis and Design*. McGraw-Hill Education.
- Guo, Z., Zarghami, M., Hou, S., and Chen, J. (2017). Model predictive control for three-level boost converter in photovoltaic systems. In *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. doi:10.1109/NAPS.2017.8107188.
- Hart, D.W. (2011). *Power Electronics*. McGraw-Hill Education, New York, 1 edition.
- Kadri, R., Gaubert, J., and Champenois, G. (2012). Non-dissipative string current diverter for solving the cascaded dc-dc converter connection problem in photovoltaic power generation system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(3), 1249–1258.
- Marcello, V., Pacheco, V., and Ferreira, S. (2018). Modelagem de conversor cc-cc aplicado a sistemas fotovoltaicos. In *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. doi:10.20906/CPS/CBA2018-1427.



(a)



(b)



(c)

Figura 11. Teste de variação da irradiância. (a) Tensão de saída – V_0 . (b) Sinal de controle – D_c . (c) Irradiância – G .

- Mohamed, H.A., Khattab, H.A., Mobarka, A., and Morsy, G.A. (2016). Design, control and performance analysis of dc-dc boost converter for stand-alone pv system. *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 101–106.
- Mohan, N. (2012). *Power Electronics: a First Course*. John Wiley & Sons Inc, Hoboken.
- Nise, N.S. (2000). *Control Systems Engineering*. John Wiley & Sons Inc, New York, 3 edition.
- Ogata, K. (1970). *Modern Control Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliff’s.
- Singh, R. and Pandit, M. (2013). Analysis of photovoltaic cells with closed loop boost converter. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*.
- Villalva, M.G. (2010). *Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP.
- 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.