

INVESTIGAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE FUZZY APLICADO EM UM SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÔNOMO

CLEONOR C. NEVES¹, FELIPE K. YOSHINO², RENAN L. P. MEDEIROS³, ERICK M. ROCHA², FLORINDO A. C. A. JUNIOR², EDER M. DAMASCENO², WALTER BARRA JR.²

¹*Campus Manaus Distrito Industrial - CMDI, Instituto Federal do Amazonas - IFAM*

²*Faculdade de engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia - ITEC, Universidade Federal do Pará - UFPA,*

³*Departamento de Eletricidade, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas – UFAM.*

E-mails:cleonor@ifam.edu.br, renanlandau@yahoo.com.br, erickmr22@yahoo.com.br, florindoayres@yahoo.com, edermendesdamasceno@gmail.com, walbarra@ufpa.br

Abstract— This paper aiming shows control techniques applied in voltage control of the link DC of autonomous photovoltaic system, besides shows the performance analysis of the system. Firstly was present the model for the photovoltaic system by using linearization techniques based on Taylor series, in order to use the linear model to make the simulation in computational ambiente Matlab. Then, were applied techniques to PI control design and analyse the performance of the simulation and real photovoltaic system in closed loop. They were investigated two techniques to design controller, to do preliminary tests the controller was design using the allocation pole technique to design the PI control, after that was design the controller using the PI fuzzy technique, both were applied in the real system to analyse the performance in closed loop. The results show the better performance of the PI fuzzy in compare the allocation pole technique.

Keywords— Autonomous photovoltaic system, PI Fuzzy controller, Conventional PI controller and Allocation pole technique.

Resumo— Este artigo tem o objetivo de apresentar técnicas de controle Fuzzy no link CC em um sistema fotovoltaico autônomo, além de apresentar análise do desempenho do sistema. Na primeira etapa do trabalho, o sistema fotovoltaico foi modelado empregando-se técnicas de linearização baseada em series de Taylor. Através do modelo linear do sistema, foi simulado em ambiente computacional utilizando-se a ferramenta Matlab. Posteriormente, técnicas de projeto de controladores PI foram aplicadas para testes de desempenho em malha fechada. E duas estratégias de controle foram investigadas. Para os testes iniciais os ganhos do controlador PI foram calculados através da técnica de alocação de polos, e posteriormente, utilizando técnicas de projeto de controlador PI-fuzzy foram utilizadas para comparação do desempenho. Por fim, foram apresentados análise comparativa do desempenho dos controladores.

Palavras-chave— Sistemas fotovoltaicos isolados, Controlador PI-fuzzy, Controlador PI convencional e Técnica de alocação de polos.

1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência têm sofrido grandes mudanças para atender o consumidor, ocorridas principalmente devido ao aumento de demanda para ser atendida. Em consequência disso, algumas pesquisas estão sendo realizadas para geração de energia elétrica utilizando outras fontes alternativas como: energia eólica, energia de gás natural, energia hidroelétrica e energia solar (Pinto, 2016).

Nesse sentido, a energia solar tem se destacado em comparação a outras fontes de energia como a hidroelétrica, por se tratar de uma fonte limpa e sustentável, além dos benefícios ligados a sua característica de geração, entre estes, a capacidade de geração no próprio local de consumo (Fernandez, 2014).

Baseado nesses fatos, este trabalho apresenta uma metodologia em ambiente do Arduino que emula um sistema fotovoltaico isolado controlado por um PI-fuzzy. Dessa forma, foi emulado um sistema fotovoltaico, por meio de circuito eletrônico, utilizando a plataforma do Arduino para emular um controlador para atuar no controle da tensão do link CC.

Esta metodologia emula uma prévia do funcionamento do sistema fotovoltaico a ser projetado em sistema autônomo. Muitos estudos têm sido feito ao sistema conectado à rede elétrica, tais como: (Fialho, 2014) e

(Carvalho, 2012). Porém, devido ao alto custo da implantação do sistema fotovoltaico, pouco se tem feito com o sistema autônomo (Pinto, 2016). Portanto, este trabalho visa realizar o controle e melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico em ambiente que não possua rede elétrica.

2 Modelagem do gerador Fotovoltaico

2.1 Modelo matemático não linear do GFV

O modelo elétrico equivalente do gerador fotovoltaico apresenta as perdas de tensão e de corrente, modeladas respectivamente pelas resistências R_S e R_P de acordo com a Fig. 1. A resistência em série (R_S) representa as perdas por efeito *Joule* que ocorrem na própria célula através da resistência elétrica do material e da resistência dos contatos metálicos da mesma. Já a resistência em paralelo (R_P) provém das perdas acarretadas por correntes parasitas que circulam na célula devida, principalmente, às pequenas imperfeições na estrutura do material ou impurezas (Ding, 2014)(Dyreson, 2014)(Lorent, 2014).

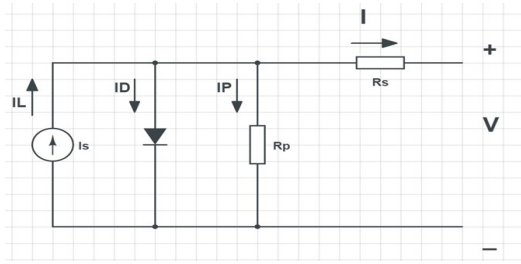


Figura 1. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

Em um circuito ideal, as resistências R_s e R_p podem ser desprezadas, no entanto utilizar-se-á o modelo da Fig. 1. Assim, a equação que expressa a corrente entregue à carga será dada pela Eq. (1)-(2).

$$I = I_L - I_D - I_P \quad (1)$$

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{m_{pn} V_{term}}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2)$$

2.2 Curvas características de corrente, tensão e potência

Para que a Eq. (1) seja igual à Eq. (2), é necessário que as resistências R_p e R_s sejam infinita e zero, respectivamente. Pois valores baixos de R_p causam uma redução na corrente da junção e na tensão das células, pelo fato de parte da corrente fotogerada, fluir internamente pelo gerador fotovoltaico. E valores elevados de R_s aumentam a queda de tensão interna do gerador, limitando a corrente fotogerada, consequentemente, a potência máxima gerada. A Fig. 2 apresenta a curva característica de corrente, tensão e potência de um sistema fotovoltaico.

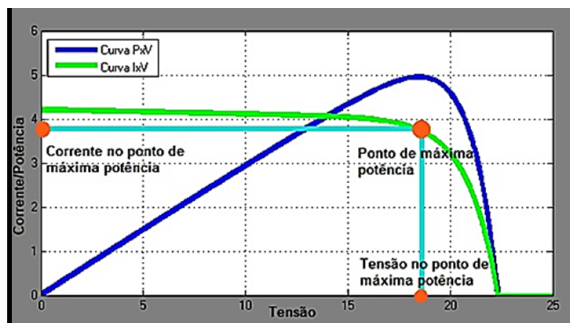


Figura 2. Curva característica de corrente, tensão e potência de um painel fotovoltaico.

2.2 Dinâmica do sistema Fotovoltaico

O modelo dinâmico do sistema fotovoltaico, dar-se-á pela constituição de um *link* CC, o qual o painel fotovoltaico carregará, este por sua vez será interligado a um inversor de frequência e assim alimentará uma

carga local. A Fig. 3 apresenta um diagrama genérico de um sistema fotovoltaico autônomo.

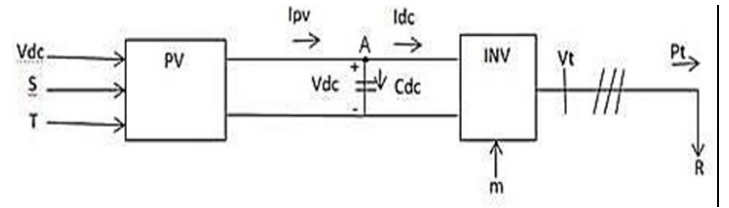


Figura 3. Diagrama genérico de um sistema fotovoltaico autônomo.

Observando a Fig. 3, pode-se obter o seguinte equacionamento para representar a dinâmica de um sistema fotovoltaico autônomo.

$$I_{pv} = I_{cap} + I_{dc} \quad (3)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_{pv} - \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \right) \quad (4)$$

$$I_{dc} V_{dc} = 3 \frac{\left(\frac{\sqrt{2}}{4} m V_{dc} \right)^2}{R} \quad (5)$$

$$I_{DC} = \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \quad (6)$$

Considerando-se que $R_s \ll R_p$ (resistência série muito menor que resistência paralelo), pode-se escrever a seguinte relação.

$$I_{pv} = I_L - A \left(e^{\frac{V}{2.1 \times m_{pn} \times V_{term} \times V_{cc}}} - 1 \right) \quad (7)$$

Para a representação de espaço de estados, foi necessário adotar as variáveis de entrada, de estado e de saída a fim de se obter a função de transferência do sistema linearizado em um ponto de operação.

Considerando:

- Variável de entrada - índice de modulação do inversor.
- Variável de saída - Tensão de saída CA do inversor
- Variável de estado - Tensão de entrada CC do inversor

Desta forma, verificam-se as seguintes relações.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} \left(I_L - AB - \frac{3m^2 V_{dc}}{8R} \right) \quad (8)$$

$$B = \left(e^{\frac{V}{2.1 \times m_{pn} \times V_{term} \times V_{cc}}} - 1 \right) \quad (9)$$

Dada à necessidade do estudo do sistema sujeito a variação de pequenos sinais, em torno de um determinado ponto de operação. Por isto realiza-se a linearização do sistema através da série de Taylor. Desta forma, obtém-se o seguinte sistema linearizado.

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= a\Delta x + b\Delta u \\ \Delta y &= c\Delta x + d\Delta u\end{aligned}\quad (10)$$

$$a = \left[\frac{Ae^{\frac{V_{DC}^o}{2.1m_{pn}V_{term}V_{CA}}}}{2.1C_{DC}m_{pn}V_{term}V_{CA}} + \frac{3(m^o)^2}{4RC_{DC}} \right] \quad (11)$$

$$b = -\frac{3m^o V_{DC}^o}{4RC_{DC}} \quad (12)$$

$$c = \frac{\sqrt{2}}{4} m^o \quad (13)$$

$$d = \frac{\sqrt{2}}{4} V_{DC}^o \quad (14)$$

A partir da representação de espaço de estado, define-se a seguinte função de transferência.

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{m(s)} = \frac{cb}{s+a} + d \quad (15)$$

Algebrizando a equação, tem-se:

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{m(s)} = \frac{ds + (ad + b)}{s + a} \quad (16)$$

Uma planta contendo um zero e um polo. Ao definir a planta do sistema linearizado, foi possível projetar um controlador PI para um ponto de operação do sistema fotovoltaico.

3 Projeto do controlador PI Fuzzy

Para o estudo a ser implementado neste artigo, far-se-à uma breve introdução da metodologia de controle fuzzy a ser utilizado para a realização do controle da tensão do *link* CC do gerador Fotovoltaico (GF). Neste sentido o sistema fuzzy é formado por 4 componentes: um processador de entrada que realiza a *fuzzificação* dos dados de entrada, uma base de regras, uma máquina de inferência para a tomada de decisões e um processador de saída que fornece um vetor de saída (Fernandez,2014).

O controlador PI-fuzzy possui duas entradas: o erro e a derivada do erro (variação instantânea do erro), e na saída a derivada do sinal de controle (dU). Em

suma, o controlador PI-fuzzy faz uma busca do valor ideal do controle (U) para aplicar na planta, tendo como parâmetros de referência o erro e a variação do erro do sistema. Para projeto do PI-fuzzy, foi utilizado o método de *Mamdani* e as funções de pertinências utilizadas para o erro e a variação do erro foram triangulares, como apresentadas a Fig. 4.

As abreviações NVB, NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB e PVB significam: *Negative Very Big, Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Big e Positive Very Big*. E representam as funções de pertinências para o grau de negatividade ou positividade das variáveis erro e derivada do erro.

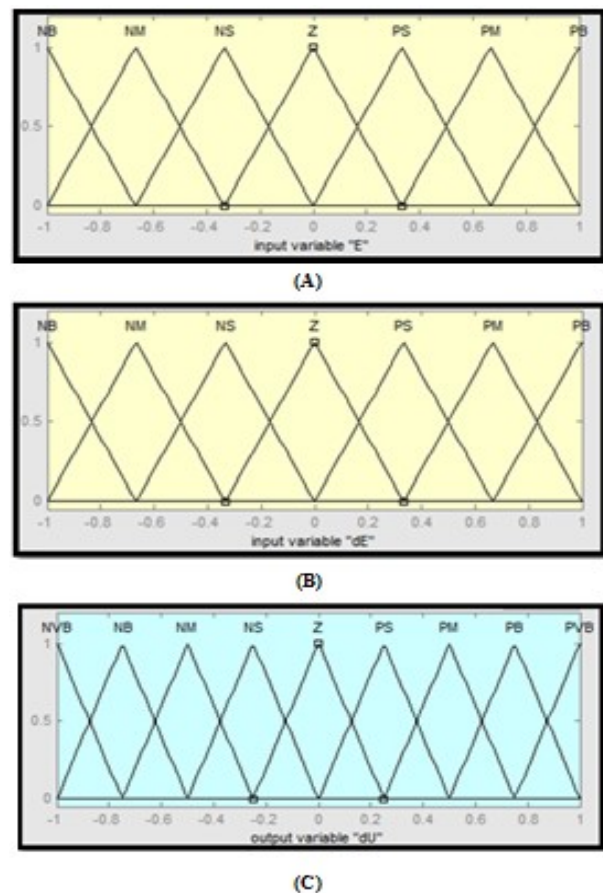


Figura 4. Função de pertinência das entradas e saídas do sistema fuzzy. (A) – Função de pertinência da entrada Erro. (B) – Função de pertinência da entrada derivada do Erro. (C) – Função de pertinência da Saída derivada do sinal de controle.

De acordo com as funções de pertinências apresentadas anteriormente, pode-se observar que as variáveis de entrada e saída do sistema fuzzy admitem valores correspondentes ao intervalo de $[-1, 1]$. Sendo assim, é necessário limitar os valores das variáveis dE e E e ampliar o valor de saída dU para que o sistema opere da forma desejada. A Tabela 1 apresenta a base de regras constituída para a implementação do controlador fuzzy.

Tabela 1. Base de regras para o controlador PI fuzzy.

dE \ E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NVB	NVB	NVB	NB	NM	NS	Z
NM	NVB	NVB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NVB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PVB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PVB	PVB
PB	Z	PS	PM	PB	PVB	PVB	PVB

A Fig. 5 apresenta o diagrama de blocos aplicando o sistema de controle PI-fuzzy no sistema fotovoltaico modelado.

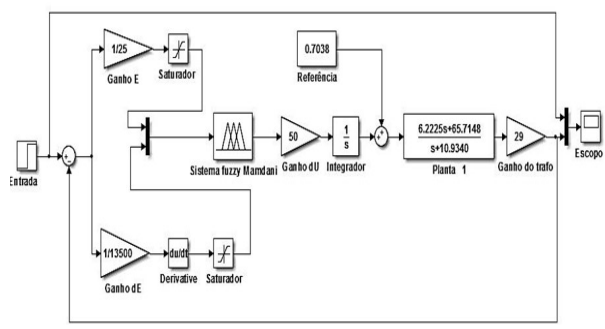


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema com o controlador fuzzy simulado.

4 Metodologia desenvolvida

Neste trabalho, apresentou-se um modelo matemático que descreve adequadamente a dinâmica de um painel fotovoltaico, com o intuito de alcançar um desempenho desejado foi aplicado um controlador, de modo a estabilizar o *link* CC e obter o desempenho desejado para o sistema. Inicialmente foi desenvolvido um estudo computacional, utilizando o ambiente computacional Matlab, para analisar a interação das estratégias de controle propostas no sistema em estudo. Em seguida, foi desenvolvido testes práticos em um sistema real, inicialmente para verificar as características do painel fotovoltaico, através da observação das curvas de corrente e tensão do sistema, em seguida foi desenvolvido um sistema embarcado, utilizando os controladores projetados e aplicados no sistema real. Para a aplicação da parte prática deste estudo, utilizou-se o seguinte painel fotovoltaico com a instrumentação desenvolvida, como apresenta a Fig. 6.

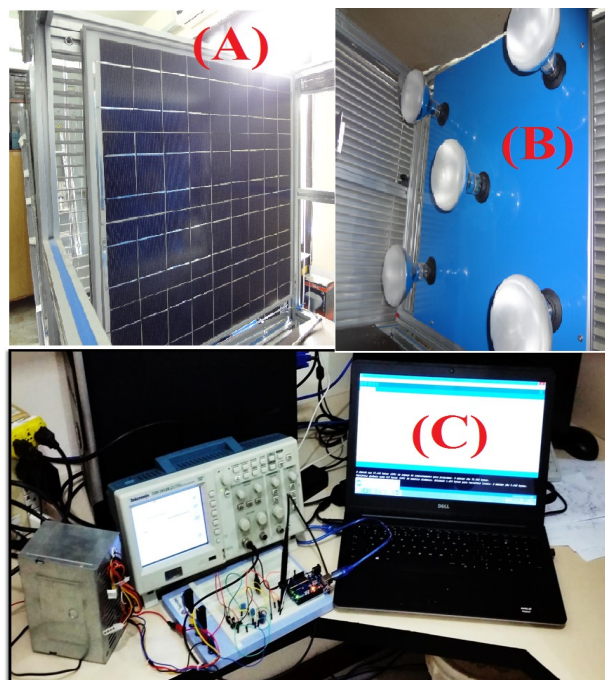


Figura 6. Sistema fotovoltaico. (A) Painel fotovoltaico Atersa. (B) Banco de lâmpadas para emulação da irradiância. (C) Sistema embarcado desenvolvido.

A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas do painel utilizado no estudo.

Tabela 2. Especificações técnicas do painel Atersa.

Var.	Uni.	Val.	Descrição
P_{max}	W	240.0	Potência máxima do painel.
I_{pmax}	A	8.02	Corrente gerada no ponto de máxima potência gerada.
V_{pmax}	V	29.5	Tensão gerada no ponto de máxima potência gerada.
I_{sc}	A	8.54	Corrente de curto circuito.
V_{oc}	V	37.03	Tensão de circuito aberto do painel.

Para a construção do modelo matemático e a realização da simulação, foi utilizado o seguinte ponto operacional, apresentado na Tabela 3

Tabela 3. Ponto operacional do sistema fotovoltaico.

Var.	Uni.	Val.	Descrição
Q	C	1.602×10^{-19}	Carga do elétron
K	J/K	1.381×10^{-23}	Constante de Boltzman
T_o	K	300	Temperatura de operação
V_{term}	mV	25.86	Tensão térmica
m_{pn}	-	1.2	Fator de dualidade
V_{ca}	V	22.3	Tensão de circuito aberto
I_{cc}	A	4.21	Corrente de curto circuito
V_{pmax}	V	17.6	Tensão no ponto de máxima potência
I_{pmax}	A	4.0	Corrente no ponto de máxima potência
R_p	Ω	106.2	Resistência paralela

C_{DC}	mF	10	Capacitância
m^0	-	0.7038	Índice de modulação do inversor
R^0	Ω	400	Carga
V_{DC}^0	V	17.6	Tensão do link CC
V_t^0	V	4.3793	Tensão de fase do lado CA do inversor.

Utilizando-se os dados contidos na Tabela 3, pode-se obter a seguinte função de transferência que representa a dinâmica do sistema fotovoltaico, conforme mostra a Eq. 17.

$$G(s) = \frac{V_t(s)}{m(s)} = \frac{6.2225s + 65.7148}{s + 10.9340} \quad (17)$$

5 Análise de resultados

5.1 - Teste 1: Operação do sistema real em malha aberta

O primeiro ensaio consiste na observação do comportamento das curvas de tensão e corrente e da associação de dois módulos fotovoltaicos, primeiramente em série e em seguida em paralelo, tendo como carga uma bateria de 12 V. Inicialmente os módulos estão na associação série, dessa forma o gráfico inicia-se com o valor de tensão próximo de 42 V. Teoricamente, o valor de tensão dessa associação deveria ser de 44,6 V, isso se deve ao fato de que a temperatura de operação do módulo ser diferente do padrão (25 °C), pois no momento da simulação os sensores térmicos indicavam o valor de 39,8 °C.

No momento em que a chave seletora ajusta a tensão de saída para a bateria, a tensão cai para a tensão da bateria e começa a fluir uma corrente de carga para a mesma. Após alguns segundos, muda-se a associação de série para paralelo, dobrando o valor da corrente. Pode-se observar tais situações na Fig. 7.

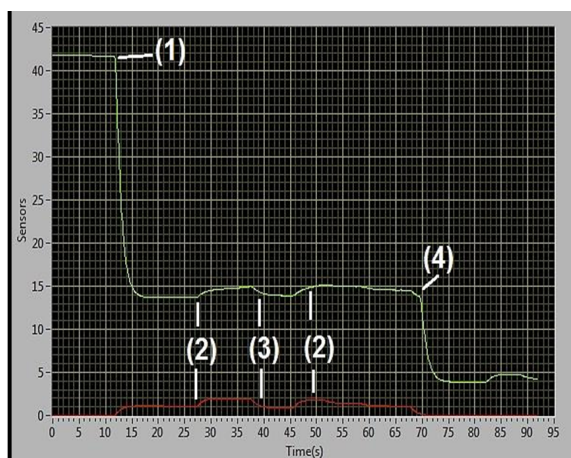


Figura 7. Curvas de tensão e corrente na associação dos painéis fotovoltaicos.

Nota-se que há 4 transitoriedades, que ocorreram devido às seguintes razões:

1. Chaveamento da saída da associação série dos módulos na bateria;
2. Mudança de associação série para paralelo;
3. Mudança de associação paralela para série;
4. Desligamento do gerador.

5.2 - Teste 2: Validação do modelo matemático desenvolvido.

Em seguida, foi realizado o teste de malha aberta do sistema real, comparando com o comportamento do sistema real com o simulado. A Fig. 8 apresenta o comportamento da planta real e do modelo simulado.

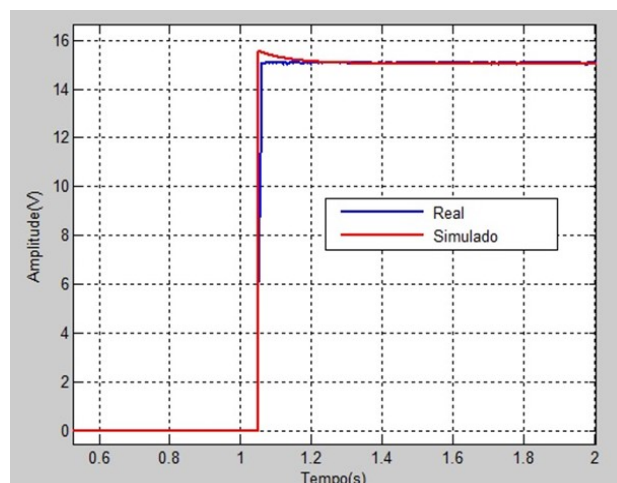


Figura 8. Comparação do modelo desenvolvido com o sistema real.

Verifica-se na Fig. 8, que o modelo desenvolvido representa adequadamente o sistema em análise.

5.3 Teste 3: Operação do sistema real em malha fechada com o controlador

Para a aplicação do controle de tensão do link CC, inicialmente desenvolveu-se um controlador PI discreto, com tempo de amostragem de 0.01 segundos, utilizando a técnica de alocação de polos, obteve-se a seguinte relação:

$$C(z) = \frac{-93.87772z + 108.1245}{z - 1} \quad (18)$$

Em seguida, comparou-se o controlador digital com o controlador fuzzy de baixo ganho. A Fig. 9 apresenta a resposta em malha fechada de um sistema fotovoltaico, fazendo uso das duas estratégias de controle supracitadas. Na Fig. 9, observa-se que o sistema é iniciado em 2 segundos, apresentando uma tensão de referência de 127 V, quando ocorre o tempo de 6 segundos ocorre uma mudança do *setpoint* para 60 V.

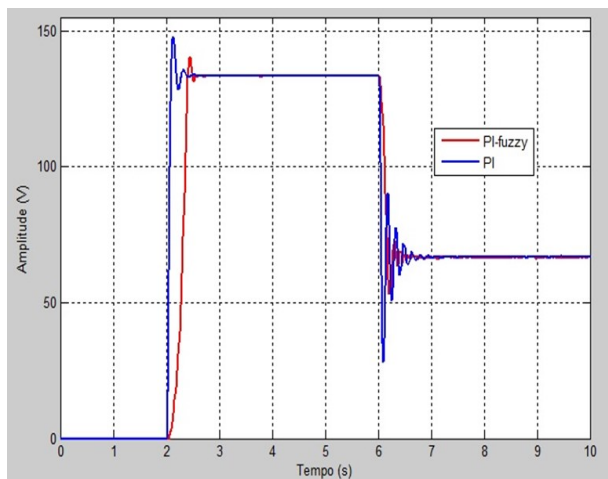


Figura 9. Aplicação das estratégias de controle propostas aplicadas a no sistema fotovoltaico.

Verifica-se na Fig. 9, que o sistema Fuzzy com baixo valor de ganho, possui um pequeno retardo para a realização do controle durante a partida, no entanto este apresenta um valor reduzido de *overshoot* e um tempo de assentamento, bem menor quando comparado com o PI projetado pela técnica de alocação de pólos.

Com o intuito de melhorar a resposta transitória de ambos os controladores, aumentou-se o ganho estático de ambos por uma proporção de 10 vezes. A Fig. 10 apresenta a resposta do sistema fotovoltaico, fazendo uso de duas estratégias de controle, ambas estratégias tiveram seus ganhos estático aumentados por uma proporção de 10 vezes.

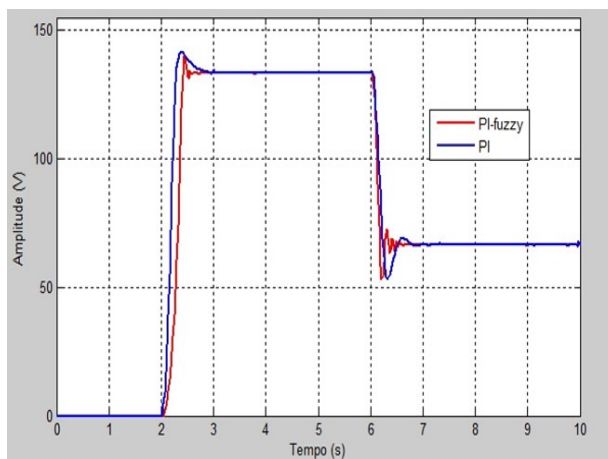


Figura 10. Comparação do modelo desenvolvido com o sistema real, com elevação do ganho proporcional.

Verifica-se na Fig. 10, que o aumento do ganho estático, proporcionou uma sensível melhora na resposta transitória do sistema, de modo que para o controlador via alocação de pólos o sistema tornou-se menos oscilatório e diminui o tempo de assentamento, verifica-se também que o aumento do ganho no controlador fuzzy, proporcionou uma melhora na resposta transitória e diminuiu o tempo de atraso durante a partida do sistema, verificou-se uma melhora também através da diminuição do tempo de

assentamento do sistema. Desta forma, conclui-se que o controlador fuzzy apresenta um melhor desempenho que o método de alocação de pólos, quando aplicado a um sistema de geração fotovoltaica.

6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de modelagem de um sistema fotovoltaico autônomo, assim como a validação do modelo proposto e a implementação de estratégias de controle aplicadas a um sistema real de geração fotovoltaica, para controlar a tensão do *link* CC. Comparou-se um controlador PI fuzzy com um controlador PI convencional projetado pela técnica de alocação de pólos e avaliaram-se seus desempenhos. O controlador PI fuzzy apresentou um melhor desempenho em comparação ao PI convencional.

Agradecimentos

Os autores agradecem o incentivo a pesquisa proporcionada pela FAPEAM, CNPQ e CAPES.

Referências Bibliográficas

- Ding, Kun, Zhang, Jinhwei, Bian, Xiangao & Xu, Junwei (2014). A simplified model for photovoltaic modules based on improved translation equation. Solar Energy. Elsevier.
- Lorente, Daniel Gomez, Pedrazzi, Simone, Zini Gabriele, Rocac, Alberto Dalla & Tartarini, Paolo (2014). Mismatch losses in PV power plants. Solar Energy. Elsevier.
- Dyreson, Ana R., Morgan, Eric R., Monger, Samuel H., Acker, Thomas L. (2014). Modeling solar irradiance for large PV power plants using a 45-sensor network and the wavelet variability model. Solar Energy. Elsevier.
- Fialho, L., Melícia, R., Mendes, V.M.F, Viana, S., Rodrigues, C., Estanqueiro, A. (2014). A simulation of integrated photovoltaic conversion into electric grid. Solar Energy. Elsevier.
- Fernandez, Francisco Serdio, Garcia, Miguel Angel Munõz, Platz, Susanne Saminger. (2014). Detecting clipping in photovoltaic solar plants using fuzzy systems on the feature space. Solar Energy. Elsevier.
- Pinto, Julian T.M., Amaral, Karen J., Janissek, Paulo R. (2016). Deployment of photovoltaics in Brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. Solar Energy. Elsevier.
- Carvalho, C. R. F. Sistema fotovoltaico isolado: uma aplicação prática no projeto xapuri. Lavras: Trabalho de Conclusão de Curso Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, 2013. 46 p.