

CONTROLE PREDITIVO E COMPENSADORES APLICADOS AO ESTUDO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

EMERSON GONÇALVES DE LIMA SANTOS*, LÁZARO EDMILSON BRITO SILVA*

*Rua Marcondes Ferraz, 200 - General Dutra, CEP: 48607-000
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia – Campus Paulo Afonso
Paulo Afonso, Bahia, Brasil

E-mails: s.lima.emerson@gmail.com, lazaro.silva@ifba.edu.br

Abstract— A greater efficiency of photovoltaic panels is indispensable for the reduction of the costs of the electric energy and the increase of the production. This research tries to analyze the behavior of model predictive control in the search of the maximum power point in photovoltaic panels. A circuit composed of a photovoltaic board and a boost voltage circuit were modeled and their electric behavior that is not linear was linearized around the point of maximum power. In this model, a form of classical control and model predictive control were applied for comparison purposes. The results showed that model predictive control succeeded in making the system operate at the maximum power point while a phase compensation control failed. The research concludes that model predictive control should be seen as a promising alternative to be implemented and more researched in the search for the maximum power point provided by photovoltaic panels.

Keywords— Predictive control, panel, photovoltaic, efficiency.

Resumo— Uma maior eficiência de painéis fotovoltaicos é imprescindível para a diminuição dos custos da energia elétrica gerada e o aumento da produção. Esta pesquisa procura analisar o comportamento do controle preditivo por modelo na busca do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos. Um circuito composto de uma placa fotovoltaica e um circuito elevador de tensão *Boost* foram modelados computacionalmente e seu comportamento elétrico que não é linear, foi linearizado em torno do ponto de máxima potência. Neste modelo foram aplicados uma forma de controle clássica e o controle preditivo por modelo, para fins de comparação. Os resultados mostraram que o controle preditivo por modelo obteve êxito em fazer com que o sistema operasse no ponto de máxima potência enquanto que um controle por compensação de fase não conseguiu. A pesquisa conclui que o controle preditivo deve ser visto como uma alternativa promissora a ser implementada e mais pesquisada na busca do ponto de máxima potência fornecida por painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave— Controle preditivo, painel, fotovoltaico, eficiência.

1 Introdução

Continuamente há um aumento da demanda por energia elétrica em todo o mundo, e com a perspectiva da diminuição da oferta de combustíveis fósseis, as fontes renováveis de energia ganham importância quanto à expectativa de abastecimento futuro (Hinrichs, et al., 2014).

A energia solar é a fonte energética com maior potencial existente no planeta conforme descrevem Villalva e Gazoli (2012), no entanto, a utilização desta fonte de energia para a obtenção direta de energia elétrica, a qual é feita a partir de painéis fotovoltaicos ainda apresenta dificuldades para um maior aproveitamento de todo este potencial.

A forma mais rápida e com menor custo para elevar os números da geração de energia elétrica geralmente é melhorando o rendimento de tecnologias já existentes, desta forma, extrair o máximo de potência que uma placa fotovoltaica pode oferecer é um ponto que ainda precisa ser amplamente pesquisado.

Existem diversos métodos e algoritmos aplicados a controladores de carga que buscam com que painéis fotovoltaicos funcionem sempre fornecendo o maior nível de potência possível, e a cada ano aumentam os números de trabalhos publicados a respeito (Júnior, 2015).

Este trabalho se propõe a estudar os efeitos do controle preditivo baseado em modelo de espaço de estados aplicado à busca do ponto de máxima potência de painéis fotovoltaicos; e a comparação deste método de controle com formas clássicas como a compensação por mudança de fase.

2 Preliminares

Para o estudo do controle preditivo e dos compensadores aplicados a busca do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos primeiro se faz necessário compreender as características elétricas principais das células fotovoltaicas e determinar o circuito elétrico a ser analisado.

2.1 Comportamento elétrico de um painel fotovoltaico e o ponto de máxima potência

O comportamento elétrico de um painel fotovoltaico apresenta características que podem ser representadas de forma gráfica por meio da curva da corrente elétrica do mesmo em função da tensão elétrica de saída (I-V), e também a curva da potência elétrica em função da tensão elétrica nos terminais de saída do painel (P-V). Tal comportamento pode ser observado na Figura 1.

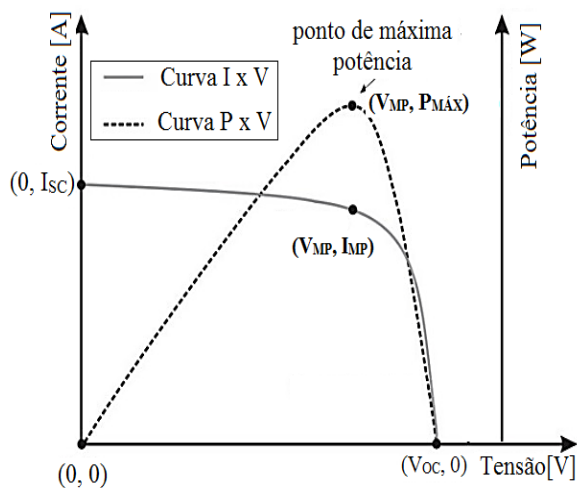


Figura 1. Curvas I-V e P-V. FONTE: (Carlette, 2015).

Observando a Figura 1, é possível compreender que existe um ponto com determinados valores de tensão e corrente elétrica, em que a potência elétrica na saída do painel apresenta seu maior valor. Técnicas utilizadas para que o painel funcione sempre neste ponto são denominadas de rastreadoras do ponto de máxima potência, esses métodos são implementados a controladores de cargas conectados a saída destes painéis. Dentre os métodos, estão entre os mais usados (Júnior, 2015):

- Perturbar e observar – (P&O);
- Condutância incremental – (CI);
- Método da tensão constante – (VC).

O método P&O consiste na mudança da tensão de saída do painel, alterando assim o lugar do ponto de funcionamento na curva característica para a direita ou para a esquerda. Primeiro altera-se o ponto para um dos sentidos da curva, em seguida observa-se se o nível de potência gerada neste novo ponto é maior ou menor ao anterior, se maior, as alterações continuam no mesmo sentido, se menor, as alterações iniciam-se no outro sentido, fazendo assim a tensão chegar ao ponto de maior potência (Lobato, 2015).

O método CI por sua vez, tem como referência a curva característica P-V, a derivada da potência em função da tensão nesta curva apresenta valores positivos à esquerda do ponto de máxima potência, negativos a direita e igual a zero no ponto, a partir destes dados, são calculadas as derivadas e decidido se o valor da tensão é elevado, diminuído ou mantido (Júnior, 2015).

Manter a tensão sempre no valor onde o painel fotovoltaico apresenta sua maior disponibilidade de potência para as melhores condições de temperatura e irradiação solar é a estratégia do método VC. Assim, é observada a tensão no sistema e calculada a diferença ao ponto desejado, em seguida são realizadas as ações necessárias para a correção ao nível almejado (Silva, 2015).

2.2 Regulador Chaveado Boost

O regulador chaveado *Boost* é um conversor CC-CC que recebe um determinado nível de tensão contínua e o eleva em sua saída, de forma equivalente a um transformador elevador em corrente alternada. Seu circuito é basicamente composto por um indutor, um capacitor, um diodo e uma chave comutável, normalmente um transistor para chaveamento. Seu circuito básico é apresentado na Figura 2.

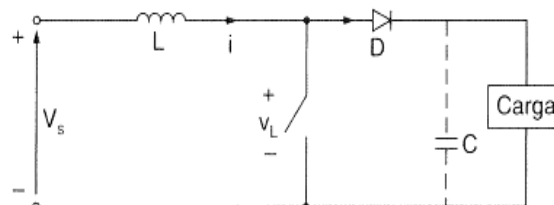


Figura 2. Circuito básico de um regulador *Boost*, (Adaptado, Rashid, 1999).

A tensão de saída é proporcional ao período do chaveamento em que o transistor se mantém em condução. Os conversores CC-CC são amplamente utilizados em controle de motores, tendo a capacidade de fornecer aceleração suave e eficiência, além de diversos outros usos como em reguladores de tensão CC e inversores (Rashid, 1999).

2.3 Compensador por mudança de fase

No controle, os compensadores são uma forma clássica, têm o objetivo de melhorar o desempenho dos sistemas, deixando-o mais preciso ou eficiente. Em geral eles procuram resolver problemas do sistema original, por exemplo, quando o sistema é instável, primeiramente o controlador deve torná-lo estável. Existem dois problemas gerais que devem ser os guias para o projeto dos compensadores, o desempenho do sistema em regime transitório e a precisão da saída em regime permanente (Maya and Leonardi, 2014).

2.4 Controle preditivo

O controle preditivo é uma forma de controle que tem como referência o comportamento futuro do processo, ou seja, ele obtém previsões do processo usando as medidas disponíveis e um modelo dinâmico, a saída do controlador preditivo é calculada objetivando minimizar a diferença entre a resposta predita e o *offset*, diferente do controle por realimentação de saída, onde para as ações de controle é utilizado o sinal de erro do sistema (Casillo, 2009).

A estratégia de controle preditivo aplicado a este estudo é o controle preditivo baseado em modelo (MPC), que pode acomodar com certa facilidade restrições de desigualdades em variáveis de saída e

de entrada como limites no incremento, ou limites superiores e inferiores (Kwong, 2012).

2.5 Estrutura do circuito

Para possibilitar a mudança do ponto de operação do painel fotovoltaico, acopla-se os terminais de saída do mesmo a um conversor CC-CC, neste caso um regulador chaveado *Boost*, que possibilita incrementos no valor de tensão. O circuito utilizado neste estudo apresenta a forma mostrada na Figura 3. O circuito é o equivalente do momento em que o chaveamento do regulador *Boost* encontra-se aberto.

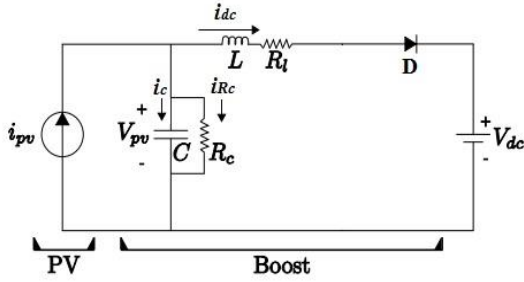


Figura 3. Circuito elétrico estudado, (Adaptado, Dezu, 2014).

Na Figura 3, i_{pv} é uma fonte de corrente que representa o painel fotovoltaico, V_{pv} é a tensão elétrica do painel, C é um capacitor e R_C sua resistência interna, sendo i_C e i_{R_C} as correntes que passam por eles respectivamente, L é um indutor e R_L sua resistência interna, D é um diodo e i_{dc} é a corrente que passa pelo indutor. V_{dc} representa a tensão na saída do circuito elétrico. A análise do circuito elétrico na condição de não condução do chaveamento do sistema nos momentos em que a carga está sendo alimentada. Através de um controlador conectado ao regulador chaveado *Boost* pode-se alterar a tensão de saída do circuito, consequentemente determinando também a corrente de saída, mantendo a relação entre a tensão e a corrente com a impedância dinâmica apresentada pelo painel fotovoltaico.

A partir do circuito da Figura 3, é necessário um modelo matemático para seu estudo, tal circuito apresenta um comportamento não linear da tensão e da corrente, entretanto, mesmo não apresentando um comportamento linear como um todo, sabe-se que um sistema assim pode ser aproximado a um sistema linear por partes em torno de um ponto de operação desejado, neste caso utilizou-se a matriz jacobiana com suas derivadas parciais para fazer tal linearização.

3 Metodologia

O circuito será modelado, em seguida será linearizado no ponto de operação desejado através da ma-

triz jacobiana com suas derivadas parciais. A partir da matriz, com o auxílio do *software* MATLAB, será encontrada a função de transferência do sistema linearizado. A partir disto, serão aplicados o controle preditivo e uma forma de controle clássica, utilizando compensadores para observar o comportamento do sistema, principalmente com o controle preditivo, e comparar estas duas formas de controle.

3.1 Modelagem

A partir do circuito observado na Figura 3, com a utilização da análise por nós de Kirchhoff chega-se a Equação (1):

$$C \left(\frac{d^2 v_{pv}}{dt} \right) + \left(\frac{1}{R_C} \right) \left(\frac{d v_{pv}}{dt} \right) + \left(\frac{1}{L} \right) (V_{pv} - i_{dc} R_L - V_D - V_{dc}) = 0 \quad (1)$$

Onde, considerando a Equação (2):

$$x(t) = \frac{d v_{pv}}{dt} \quad (2)$$

Tem-se:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \left(\frac{1}{CR_C} \right) x(t) + \left(\frac{1}{LC} \right) (V_{pv} - i_{dc} R_L - V_D - V_{dc}) = 0 \quad (3)$$

Portanto:

$$f_1(i_{dc}, x, V_{dc}) = \frac{d v_{pv}}{dt} = x(t) \quad (4)$$

$$f_2(i_{dc}, x, V_{dc}) = \frac{dx(t)}{dt} + \left(\frac{1}{CR_C} \right) x(t) + \left(\frac{1}{LC} \right) (V_{pv} - i_{dc} R_L - V_D - V_{dc}) = 0 \quad (5)$$

A partir do método de linearização da matriz jacobiana, e com as derivadas parciais de (4) e (5), pode-se montar as matrizes (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{dc}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{R_L}{LC} & \frac{1}{CR_C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dc}(t) \\ x(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{LC} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (6)$$

Com base nos valores das grandezas obtidos no dimensionamento do regulador *Boost*, e da matriz jacobiana e suas derivadas parciais, que é o sistema linearizado em torno do ponto de operação, utilizando o auxílio do *software* MATLAB é obtida a função de transferência do sistema, e a partir da mesma, é possível obter o gráfico lugar das raízes, apresentado na Figura 4, bem como a resposta ao degrau do sistema, a qual pode ser observada na Figura 5, para análise do comportamento do sistema.

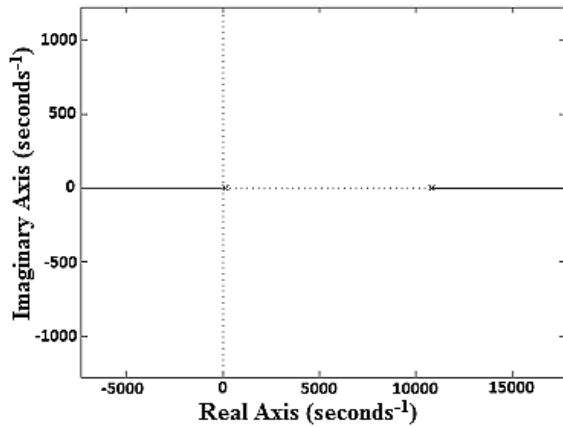


Figura 4. Lugar das raízes sistema original.

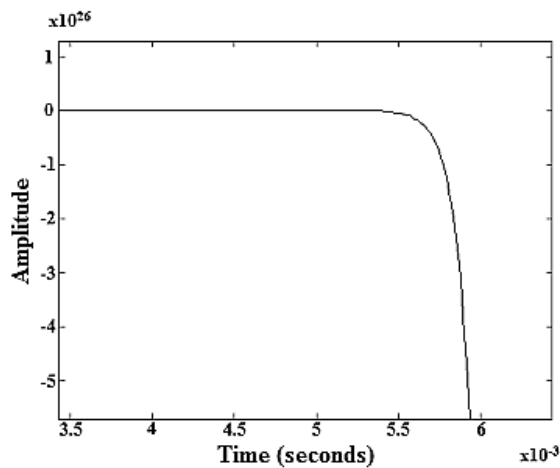


Figura 5. Resposta ao degrau do sistema original.

O gráfico lugar das raízes, Figura 4, apresenta dois polos no eixo real, onde os ramos vão para mais infinito e menos infinito sobre esse eixo, indicando instabilidade do sistema.

A resposta ao degrau unitário tende ao infinito no eixo negativo, caracterizando um sistema instável.

3.2 Projeto compensador por avanço de fase

A partir da função de transferência do sistema de malha aberta, projeta-se um compensador de fase para melhorar o comportamento do sistema. Escolheu-se o compensador por avanço de fase para a melhoria de sua resposta transitória, pois observando-se o gráfico da Figura 5, que apresenta a resposta ao degrau do sistema, percebe-se que o sistema não apresenta um comportamento desejado em sua resposta transitória. Observando-se o lugar das raízes do sistema, escolhe-se os polos dominantes nos pontos $P = (-0,65 \times 10^4 \pm 10^4 i)$, que são escolhidos para que o coeficiente de amortecimento fique próximo de 0,5 e tendo polos complexos conjugados. Sendo assim, obteve-se o compensador por avanço de fase descrito por (7).

$$C_{AF} = 91,743 \frac{(s + 3,8084 \times 10^3)}{(s + 3,7781 \times 10^4)} \quad (7)$$

Posteriormente traçou-se, para o sistema compensado de malha fechada com realimentação negativa e unitária, o gráfico lugar das raízes, apresentado na Figura 6, e a resposta ao degrau, apresentada na Figura 7.

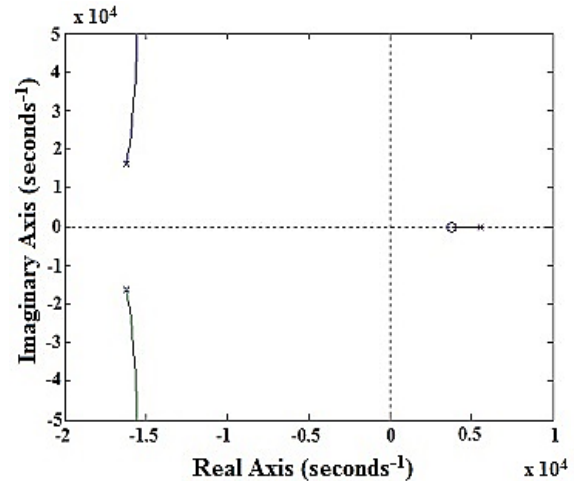


Figura 6. Lugar das raízes do sistema compensado.

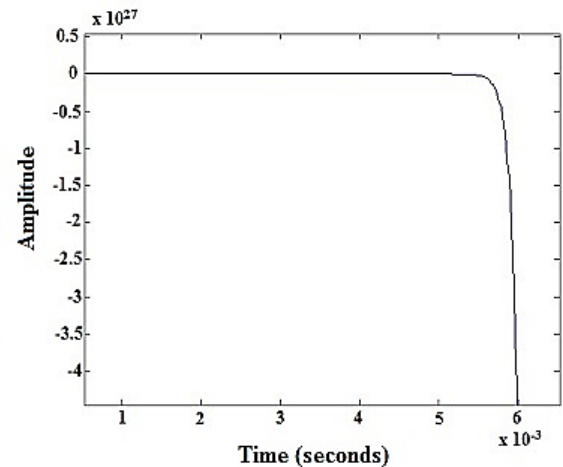


Figura 7. Resposta ao degrau do sistema compensado.

O gráfico lugar das raízes apresenta agora polos dominantes a esquerda do eixo imaginário, e tendem para mais infinito e menos infinito, comportamento apresentado após a introdução do compensador, que possibilita trabalhar com uma faixa de ganho.

Enquanto que a resposta ao degrau unitário do sistema compensado apresenta um comportamento que tende ao infinito no eixo positivo, fato que representa a continuação da instabilidade no sistema, mesmo compensado.

Aplicando o critério de Routh, ao polinômio característico da função de transferência de malha fechada do sistema compensado, concluiu-se que o sistema não é estável.

4 Resultados

Inicialmente foram realizados ajustes a parâmetros do algoritmo do controle preditivo por modelo utilizado, com a intenção de observar como o sistema proposto para análise se comporta aos mesmos, objetivando-se por fim obter a melhor resposta possível quanto a finalidade do controlador.

Os parâmetros tratados foram o horizonte de controle, a existência de limitação ao sinal de saída do controlador e o peso da entrada do sinal. Inicialmente todos os parâmetros serão estudados com a existência de restrições no sinal do controlador, restrição tal que tenta caracterizar as limitações que todos os controladores fora do ambiente de simulação apresentam.

4.1 Controle preditivo por modelo (MPC)

O primeiro parâmetro que teve seu comportamento observado junto ao sistema proposto foi o peso do sinal.

Segundo Kwong (2012), o fator de supressão de movimentos, neste trabalho chamado de “peso do sinal” é um valor que serve como um fator de sintonia para o esquema do controle preditivo, ele é usado na função objetivo do controle para ponderar as variações na entrada, onde definir um valor maior para o peso do sinal torna a resposta em malha fechada mais lenta, reduzindo variações na entrada, causadas pelo controlador e desta forma contribuindo para uma maior robustez do controle.

A variação de seu valor mostrou grande alteração no tempo de estabilização do sinal de saída, comportamento que pode ser observado através da Figura 8.

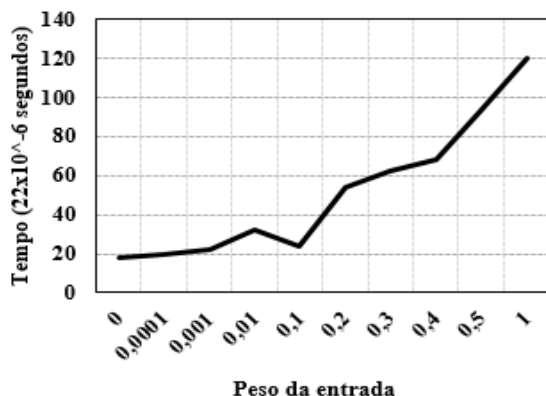


Figura 8. Tempo de estabilização do sinal em função do peso da entrada

A faixa de valores da escala de tempo observada na Figura 8 mostra a velocidade com que a forma de controle consegue estabilizar o sistema. O tempo de estabilização do sinal de saída apresenta um comportamento diretamente proporcional ao peso da entrada, assim o peso que apresenta o menor tempo de estabilização do sinal é zero. A partir deste resultado os

demais parâmetros a serem ajustados serão observados com o peso da entrada fixado em zero, para a obtenção de uma estabilização do sinal mais rápida.

O horizonte de controle, que é mais um parâmetro do algoritmo do controlador, também teve seu comportamento observado quanto a mudança de valores dentro de sua faixa possível. Segundo Rossiter (2004), o horizonte de controle deve ser o maior possível, porém a diferença entre o horizonte de predição e o horizonte de controle deve ser maior que o tempo de estabilização do sistema. Em vista de tal afirmação, foram construídos os gráficos da Figura 9, que apresenta o tempo de estabilização do sinal em função do horizonte de controle e o gráfico da Figura 10, que mostra o nível de *overshoot* do sinal de saída do sistema, para cada horizonte de controle.

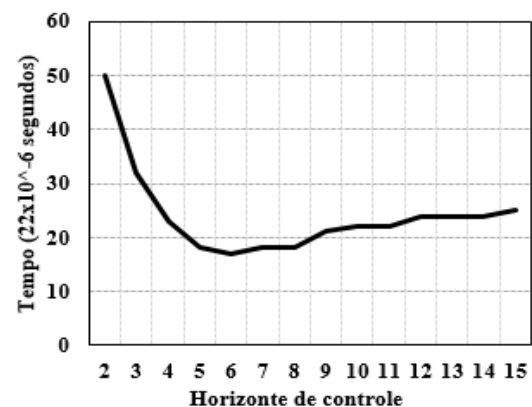


Figura 9. Tempo de estabilização do sinal de saída do sistema em função do horizonte de controle

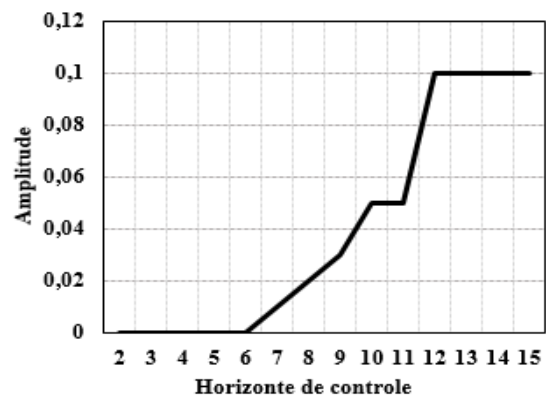


Figura 10. Nível de *overshoot* do sinal de saída do sistema em função do horizonte de controle

Para tais estudos, o horizonte de predição foi fixado em 20 instantes, sendo assim a observação de 14 instantes no horizonte de controle suficiente para a observação de seu comportamento.

Inicialmente, no gráfico da Figura 9, é possível observar que o menor tempo de estabilização do sinal de saída acontece no instante 6 do horizonte de controle, que coincide com o último instante sem *overshoot*

hoot no sinal de saída do mesmo sistema, visto na Figura 10, o sistema após o instante 6 do horizonte de controle apresenta um nível crescente de *overshoot* no sinal de saída, caracterizando o instante 6 como o maior valor que não apresenta *overshoot*.

Alterações no horizonte de predição mostraram um comportamento como o apresentado para 20 instantes, levando em consideração a proporção horizonte de controle e horizonte de predição a resposta do sinal de saída do sistema foi a mesma.

Como já mencionado, a inserção de limitações ao sinal do controlador busca observar a resposta do sistema simulando um controlador real fora dos ambientes de simulação. Tal ferramenta é útil também para representar limitações específicas que determinado controlador pode ter, no entanto, objetivando-se visualizar o comportamento do controle preditivo por modelo frente ao sistema proposto, a variação do parâmetro horizonte de controle também foi estudada com o controle operando sem as limitações ao sinal de saída. Tal comportamento pode ser observado no gráfico da Figura 11.

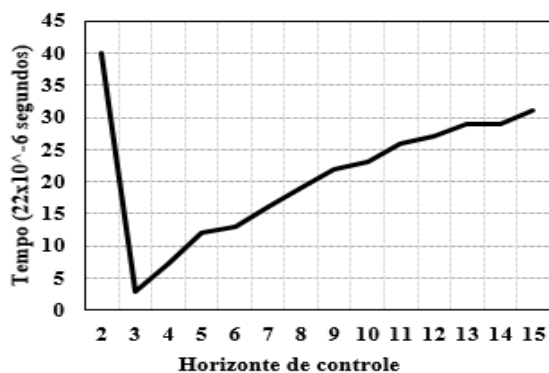


Figura 11. Tempo de estabilização do sinal de saída do sistema operando sem limitações ao controlador.

Da mesma forma, o nível de *overshoot* no sinal de saída do sistema operando sem limitações ao sinal do controlador foi estudado e pode ser observado na Figura 12.

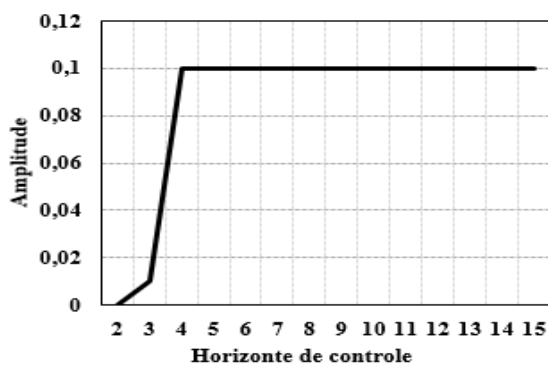


Figura 12. Nível de *overshoot* do sinal de saída do sistema operando sem limitações ao controlador.

Como é possível observar por meio da Figura 11, o ponto em que o sinal apresenta menor tempo de esta-

bilização é o instante 3, enquanto que o menor sinal de *overshoot* é observado no instante 2 de acordo com a Figura 12. Desta forma, não há instante em comum que apresente os melhores resultados nos dois casos.

A simulação da utilização do controle preditivo por modelo no sistema proposto possibilitou a inserção de duas variáveis presentes em sistemas reais, as restrições do controlador e os sinais de ruído.

As Figura 13 e 14 e as Figura 155 e 16 apresentam a resposta do sistema e o sinal do controlador a utilização do controle preditivo por modelo em um sistema onde não foram incorporadas restrições ao controlador e com restrições ao sinal do controlador respectivamente.

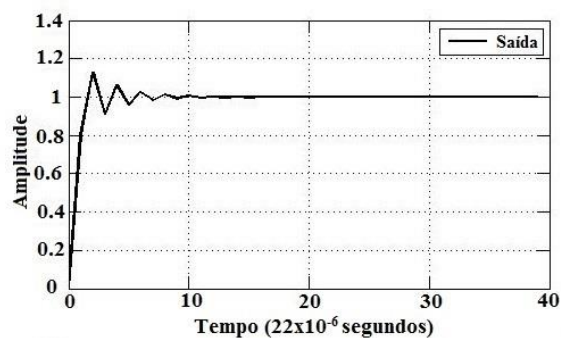


Figura 13. Saída do sistema sem restrições ao controlador.

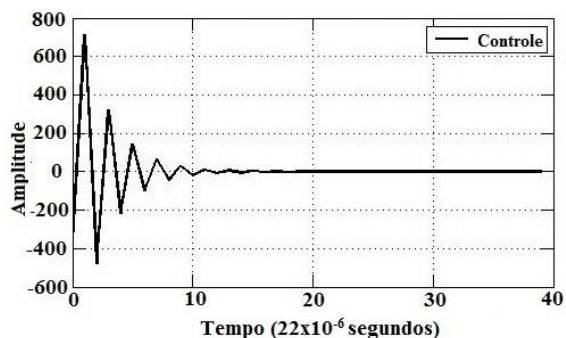


Figura 14. Sinal de controle no sistema sem restrições ao controlador.

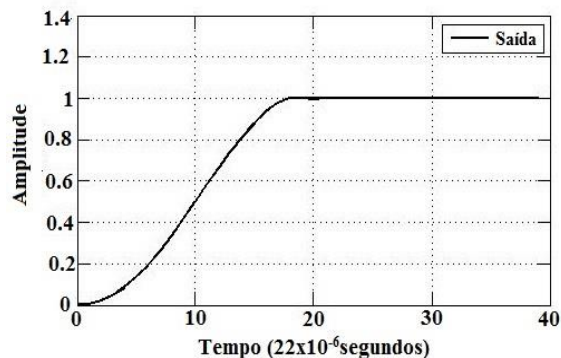


Figura 15. Saída do sistema e do controle existindo restrições ao controlador.

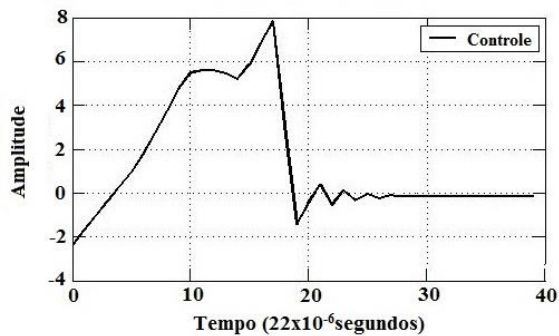


Figura 16. Sinal do controlador em um sistema com restrições

A saída manteve-se em um ponto de operação, apresentando assim um comportamento estável em ambos os casos, com e sem restrições no sinal de controle, ressaltando que a limitação ao sinal de controle fez com que o controlador trabalhasse para essa simulação com menos de 10% de sua capacidade.

Houve um aumento no tempo de estabilização do sinal na resposta do sistema com restrições ao controlador, uma diferença de aproximadamente cinco instantes de amostragem, cerca de $110\mu s$.

Com relação ao sinal de controle, há uma rápida elevação inicial em sua amplitude no mesmo instante em que o sinal de saída do sistema está subindo para o valor referência. No sistema onde o controlador apresenta restrições, percebe-se que a amplitude máxima do sinal de controle é menor, em contrapartida, a elevação dessa amplitude estende-se por um tempo maior e com seu pico deslocado.

5 Discussão

A primeira função de transferência, que representa o sistema original gera um gráfico lugar das raízes, visto na Figura 4, onde o sistema apresenta um comportamento instável, por conta do comportamento não linear originário do sistema proposto. A resposta ao degrau do sistema também apresentou um comportamento instável.

Após a introdução do compensador por avanço de fase, observa-se um gráfico lugar das raízes com um comportamento melhor, como visto na Figura 6, onde os ramos dos polos dominantes estão a esquerda do eixo imaginário, resultado da tentativa de tornar o sistema estável e mais rápido no regime transitório. Quando olha-se para a resposta ao degrau do sistema compensado, o comportamento continua instável pois a saída tende ao infinito (Figura 7). Além disso, o critério de Routh aplicado ao sistema mostra que o sistema continua instável. Desta forma, é perceptível que o compensador não consegue estabilizar a saída deste sistema não linear, no ponto de operação pretendido.

Quanto ao estudo da aplicação do controle preditivo por modelo, observando os diversos parâmetros analisados, tem-se várias observações.

O gráfico da Figura 8 apresentou resultados que confirmaram o comportamento esperado para alterações no peso do sinal, tornando o sistema mais lento com a elevação de tal fator. Contudo, para a observação do comportamento das limitações ao sinal do controlador em comparação com a não existência das limitações, a supressão do fator peso do sinal foi vantajosa para deixar essa diferença de forma mais clara.

A definição do número de instantes para o horizonte de controle em seu melhor valor foi possível através dos gráficos obtidos com e sem limitações ao controlador, onde a resposta com limitações apresenta um ponto de melhor resultado quanto ao menor tempo de estabilização e a não existência do *overshoot* no sinal de saída.

Um aumento no horizonte de controle eleva a necessidade de esforços computacionais para o funcionamento do controlador (Kwong, 2012). Sendo assim, o tipo de processo que o controle objetiva manter deve ser levado em consideração no projeto do controlador, bem como os recursos computacionais disponíveis.

Os gráficos das Figura 13 e 14 e Figuras 15 e 16 representam bem duas possibilidades que podem ser obtidos na resposta de um sistema como o estudado, na primeira um sistema de rápida convergência do sinal de saída do sistema ao valor de referência, mas com a existência de um certo nível de *overshoot*, e instabilidade durante um pequeno período de tempo. Já no segundo caso, com a existência das limitações, tem-se um sistema mais robusto, que não apresenta *overshoot* em seu sinal de saída e mostra uma curva crescente até o momento de estabilização mas com um tempo maior.

A resposta do sistema ao controle preditivo por modelo, apresentou uma saída estável, demonstrando assim capacidade de controle deste sistema para o ponto de operação desejado, que é o ponto de máxima potência do painel. Mesmo com a adição de ruídos no sinal no sistema e limitações ao controlador, a saída conseguiu chegar a um nível estável e manter-se. Essa estabilidade indica que através do controle preditivo, com um modelo como o proposto, é possível que as placas fotovoltaicas operem em seu ponto de máxima potência.

A observação do comportamento do sinal de saída do sistema e do sinal do controlador, frente as limitações deste último e a ruídos presentes no sistema, mostram como o controle preditivo por modelo se comporta diante de possíveis dificuldades. Neste caso houve uma alteração no tempo de estabilização do sinal de saída quando as restrições ao controlador foram consideradas, o tempo de estabilização do sinal de saída no seu ponto de referência aumentou, mesmo assim o sistema alcançou uma saída com nível desejado e estável. O sinal de controle se adaptou as restrições impostas e conseguiu manter o sistema estável, limitações essas que podem ser representações de valores máximos alcançados por algum circuito controlador.

6 Conclusão

Comparando o sistema em uma forma de controle clássica como é o compensador, com o controle preditivo, os dados obtidos mostram que a forma de controle preditiva apresenta um melhor resultado quanto a capacidade de operação do sistema no ponto de máxima potência. Com foco no comportamento do controlador preditivo, percebe-se que mesmo com restrições ou ruídos adicionados ao seu sistema, a saída continua nos valores desejados, o sistema não saiu de sua faixa de estabilidade, indicando assim a competência do controle preditivo em realizar atividades de controle em sistema originalmente não lineares.

Tais resultados são importantes para mostrar a capacidade desta forma de controle aplicada a essa área, que precisa cada vez mais apresentar uma melhor eficiência para atender a expectativa de crescimento de consumo energético e diminuir os custos da energia gerada.

Esses resultados positivos incentivam a realização de novas pesquisas da aplicação do controle preditivo na busca pelo ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos, abrindo novos horizontes de atividades possíveis.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), campus Paulo Afonso, pela bolsa de iniciação científica que possibilitou a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Carlette, L. P., (2015). Comparação de Algoritmos de Máxima Potência Para Carregamento de Baterias em Sistemas Fotovoltaicos, Viçosa: s.n.
- Casillo, D. S. d. S., (2009). Controle Preditivo Não Linear Baseado no Modelo de Hammerstein Com Prova de Estabilidade, Natal: s.n.
- Dezuo, T. j. M., (2014). Design of Switching Strategies With Applications in Photovoltaic Energy Generation, Florianópolis: s.n.
- Hinrichs, R. A., Kleinbache, M. and Reis, L. B., 2014. Energia e Meio Ambiente. 5 ed. São Paulo: Cengage Learning.
- Júnior, J. M. d. A. W., (2015). Proposta de Controlador de Carga Com MPPT Utilizando Labview, Guaratinguetá: UNESP.
- Kwong, W. H., 2012. Introdução ao Controle Preditivo Com Matlab. São Carlos: EdUFSCar.
- Lobato, S. d. C., 2015. Análise Comparativa Entre as Principais Técnicas de MPPT Com Foco Experimental, Juiz de Fora: s.n.
- Maya, P. A. & Leonardi, F., (2014). Controle Essencial. 2ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil.

Rashid, M. H. R., 1999. Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações. São Paulo: Makron Books.

Rossiter, J. A., 2004. *Model-Based Predictive Control: A Practical Approach*. Boca Raton: CRC Press LLC.

Silva, L. R. C., 2015. *Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*, Uberlândia: s.n

Villalva, M. G. and Gazoli, J. R., 2012. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. 1 ed. São Paulo: Érica.