

Sistema de Controle Tolerante a Falhas aplicado no circuito inversor de um sistema fotovoltaico.

Alain Segundo Potts *

* Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas,
Universidade Federal do ABC, SP (e-mail:
alain.segundo@ufabc.edu.br).

Abstract: In this work, the implementation of a fault-tolerant control system based on the model-matching technique is described. The control system is designed to operate subject to inverter sensor failures. For a better implementation of the algorithm, the inverter was divided into two circuits: a DC/DC converter and a DC/AC converter. The fault-tolerant control methodology was developed separately for both circuits, based on their mathematical modeling. From simulated failures, the effectiveness and robustness of the implemented algorithms was proven.

Resumo: Neste trabalho é descrita a implementação de um sistema de controle tolerante a falhas baseado na técnica de *model-matching*. O sistema de controle foi desenvolvido para operar sujeito às falhas dos sensores do inversor. Para uma melhor implementação do algoritmo o inversor foi dividido em dois circuitos: um conversor CC/CC e um conversor CC/CA. A metodologia do controle tolerante a falhas foi desenvolvida em separado para ambos circuitos a partir da modelagem matemática destes. A partir de falhas simuladas foi comprovada a efetividade e robustez do algoritmo implementado.

Keywords: Fault-tolerant control; inverter circuit; model-matching; virtual sensors.

Palavras-chaves: Controle tolerante a falhas; circuito inversor; sensores virtuais.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é considerada uma fonte de energia primária, ou seja, é originada na natureza. Por outro lado a energia elétrica gerada a partir sol pode ser considerada como uma fonte de energia secundária. A obtenção de energia solar pode ser feita de forma direta ou indireta, com sistemas de uso passivo ou ativo da radiação solar. Os métodos diretos apresentam apenas uma etapa de conversão, por exemplo a energia solar fotovoltaica gerada diretamente quando os fótons de luz atingem a célula fotovoltaica. A potência elétrica gerada desta forma depende da capacidade de captação e produção, ou seja, além das condições naturais de luminosidade e calor do sol de acordo com o dia e a época do ano, também dependerá do sistema instalado, como as características dos painéis e a capacidade de armazenamento da energia.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o Brasil atingiu a marca de 6.044 MW de geração fotovoltaica instantânea em dezembro de 2022. Este tipo de energia representou cerca de 3,6% do total da energia gerada, algo em torno de 6,6 GW. No entanto, a projeção para dezembro de 2026 é que seja atingido 6,7%, para um total de 13,9 GW (Uribe, 2023).

O inversor é uma das partes mais importantes do sistema fotovoltaico uma vez que este tem a função de converter a corrente contínua, proveniente do painel solar, em corrente alternada utilizada para alimentar as cargas. Para garantir o bom funcionamento do inversor é necessária uma verifi-

cação constante de seu desempenho e eficiência no sentido de evitar falhas e malfuncionamentos.

Dentro dos componentes do inversor o sistema de controle, formado por interruptores, e o sistema de medição são os componentes que apresentam a maior quantidade de falhas. Falhas de circuito aberto e falhas de curto-circuito podem ocorrer nos interruptores de energia. Estas últimas chegam a interromper a operação do sistema e em alguns casos levar à destruição do conversor, enquanto falhas de circuito aberto tendem a afetar a qualidade da energia fornecida. Neste sentido, torna-se necessária a implementação de um sistema supervisorio e de controle tolerantes a falhas, isto é que consiga manter a operação e performance mesmo na ocorrência destas Iserman (2006). Quando o sistema consegue manter sua operatividade na presença de falhas o algoritmo de controle é dito ser tolerante a falhas (FTC). Segundo Alwi et al. (2011) os algoritmos FTC podem ser classificados em 2 tipos: FTC passivos e ativos, ou seja, PFTC¹ e AFTC², respectivamente. PFTCs usualmente são métodos de controle robusto que conseguem manter o sistema com um desempenho satisfatório frente a pequenas perturbações ou desvios, estes métodos não requerem uma etapa previa de diagnóstico. AFTCs, por outro lado, respondem à ocorrência de falhas por meio de uma reconfiguração do controlador.

Um dos algoritmos AFTC mais utilizados é o *model-matching* implementado através de atuadores virtuais.

¹ Do inglês passive fault tolerant control.

² Do inglês active fault tolerant control.

Este método é capaz de garantir uma boa performance mesmo na presença de falhas, especificamente falhas nos atuadores e sensores. Embora esta metodologia não garanta um desempenho idêntico do sistema falho, ela é capaz de chegar a uma solução próxima o suficiente das condições nominais de operação.

Neste trabalho será apresentado um sistema de controle tolerante a falhas aplicado às falhas nos sensores do circuito inversor de um sistema fotovoltaico.

2. MODELO DO INVERSOR FOTOVOLTAICO

Os inversores são circuitos eletrônicos responsáveis pela conversão da energia elétrica de uma tensão, corrente e nível de frequência para outra usando interruptores eletrônicos. Uma característica essencial destes circuitos é que os interruptores operam sujeitos a condução ou bloqueio, forçando os elementos da placa a mudanças abruptas de tensão e corrente. As altas tensões envolvidas no processo de conversão e as mudanças de estado são fatores associados à grande quantidade de averias reportadas nestes circuitos.

Basicamente o circuito inversor de um sistema fotovoltaico possui duas partes. A primeira consiste num conversor de elevação (*boost*) CC/CC e a segunda num conversor inversor CC/CA. O conversor CC/CC é um circuito que controla a carga e descarga da energia em seus elementos de armazenamento (capacitores e indutores), conseguindo uma mudança no nível de tensão contínua. Portanto, o fluxo de energia é determinado pelo controle dos elementos comutados. Já os conversores CC/CA, são responsáveis pela conversão de níveis contínuos de tensão ou corrente em níveis alternados de tensão e corrente simétricos em amplitude (Dogga and Pathak, 2019; Kabalci, 2020).

2.1 Modelo do conversor CC/CC

Este circuito apresenta dois modos de trabalho, o primeiro quando o interruptor está aberto e o segundo quando está fechado (Figura 1). O controle de chaveamento é feito variando o ciclo útil de uma onda quadrada $s(t)$. O modelo medio deste circuito em função do sinal de chaveamento é:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & \frac{s(t)-1}{L} \\ -\frac{s(t)-1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{s(t)}{L} & 0 & -\frac{s(t)}{L} & -\frac{1-s(t)}{L} \end{bmatrix} u(t) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Em (1) as variáveis de estado x_1 e x_2 correspondem à corrente do indutor $i_L(t)$ e à tensão do capacitor $V_c(t)$. Já o vetor $u = [V_{in} \ I_{out} \ V_m \ V_d]^T$ onde V_{in} é a tensão de entrada proveniente do painel fotovoltaico, I_{out} a corrente de saída do conversor, V_m a tensão do circuito de chaveamento e V_d a tensão do diodo, respectivamente. Note que o vetor $u(t)$ está formado por parâmetros de projeto do circuito enquanto que o sinal de entrada efetivamente controlado é na verdade $s(t)$. Logo, o próximo passo consiste em linearizar (1) em torno dos pontos de operação do sistema

Tabela 1. Parâmetros dos Circuitos

Parâmetro	Valor
R_L	$1e^{-4}\Omega$
L	$20e^{-3}H$
C	$3000e^{-6}F$
V_m	0,1 V
V_d	0.8 V
L_1	$4,06e^{-3}H$
L_2	$4,06e^{-3}H$
C_r	$6,23e^{-6}F$
R_1	$1e^{-4}\Omega$
R_2	$1e^{-4}$

$$(\bar{x} = [7,86A \ 430V]^T, \bar{u} = [200V \ 2A \ 0,07V \ 0,71V]^T, \bar{s} = 54\%):$$

$$\Delta\dot{x}(t) = \bar{A}\Delta x(t) + \bar{B}\Delta s(t) + \bar{E}\Delta u(t) \quad (3)$$

$$\Delta y(t) = \bar{C}\Delta x(t) + \bar{D}\Delta s(t) + \bar{F}\Delta u(t) \quad (4)$$

Em (3) e (4) as matrizes \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} , \bar{D} , \bar{E} e \bar{F} são todas obtidas após a linearização de (1).

2.2 Modelo do conversor CC/CA

Com a tensão CC amplificada o próximo passo consiste na sua transformação num sinal alternado. Para isto é utilizado o circuito inversor mostrado na Figura 1.

As equações diferenciais que descrevem este circuito são:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1+R_2}{L_1+L_2} & 0 & -\frac{1}{L_1+L_2} \\ 0 & -\frac{R_1+R_2}{L_1+L_2} & -\frac{1}{L_1+L_2} \\ \frac{1}{C_r} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1+L_2} \\ \frac{1}{L_1+L_2} \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (5)$$

onde x_1 , x_2 e x_3 são as correntes nos indutores L_1 e L_2 e a tensão no capacitor C_r , respectivamente. O sinal de entrada $u(t) = V_p(t)$ consiste na saída do circuito conversor CC/CC. Note que a diferença do modelo (1) no caso do circuito conversor CC/CA não é necessário fazer a linearização do modelo. Neste circuito são medidas a tensão de saída $V_{ac}(t)$ e a corrente de um dos indutores, por exemplo $i_{L_1}(t)$:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. ESTRATEGIA DE CONTROLE TOLERANTE A FALHAS

As falhas podem ser classificadas em três categorias: falhas na planta, falhas nos sensores e falhas nos atuadores. Falhas na planta alteram as propriedades dinâmicas entre a entrada e a saída dos sistemas, falhas nos sensores induzem erros de leitura dos valores mensurados e falhas nos atuadores interrompem ou modificam a influência do controlador na planta (Abbaspour et al., 2020).

De forma geral na ocorrência de uma falha f o sistema falho é descrito como:

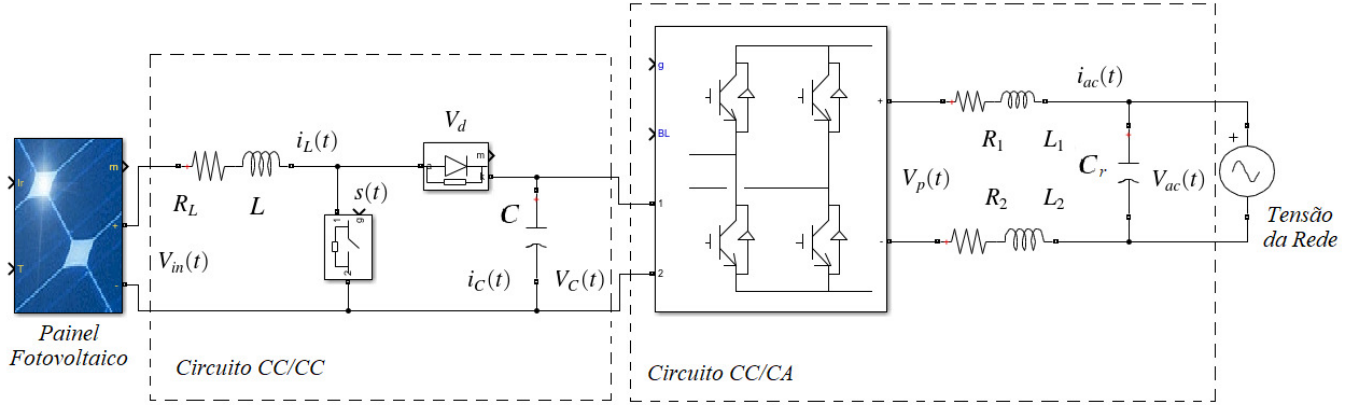


Figura 1. Modelo do circuito inversor de um sistema fotovoltaico.

$$\dot{x}_f(t) = A_f x_f(t) + B_f u_f(t) + E d(t) \quad (7)$$

$$y_f(t) = C_f x_f(t) \quad (8)$$

Usualmente na ocorrência de falhas nos sensores ou atuadores estes são desligados. Isto é, no caso do i -ésimo sensor falho (y_i) a i -ésima coluna da matriz C é zerada, já no caso do i -ésimo atuador falho a i -ésima linha na matriz B é então zerada. As matrizes com colunas ou linhas zeradas são chamadas então C_f e B_f , respectivamente. De aqui podemos inferir que caso o sistema seja de entrada ou saída única não será possível aplicar esta abordagem para falhas nos atuadores ou sensores. Falhas na planta não serão consideradas neste trabalho.

Observe que nos modelos do circuito CC/CC e CC/CA definidos pela equações (3) e (5) ambos são de entrada única, pelo que resulta impossível a aplicação desta metodologia nos atuadores. Entretanto, um controle tolerante a falhas nos sensores sim pode ser discutido.

3.1 Sensores virtuais

Um sensor virtual é um bloco capaz de reconstruir a medição y_i a partir da leitura dos demais sensores quando a saída y_i não está disponível. A ideia é utilizar uma estrutura similar à de um observador de estados, que consiga reconstruir de forma virtual a medição de y_i .

Seja o sistema com saída falha y_i pode ser demonstrado que se a condição (9) é satisfeita é sempre possível implementar um sensor virtual para reconstruir de forma exata y_i (Blanke, 2006).

$$\text{posto}(C_f) = \text{posto} \begin{pmatrix} C \\ C_f \end{pmatrix} \quad (9)$$

Observe que em (9) a matriz C_f tem sua i -ésima coluna zerada como consequência da falha em y_i . Quando (9) é satisfeita uma reconfiguração exata é possível fazendo $C = PC_f$ onde P é definida como:

$$P = CC_f^T (C_f C_f^T)^{-1} \quad (10)$$

Por outro lado, se a condição (9) não é satisfeita uma solução aproximada pode ser encontrada minimizando a expressão:

$$\min_P \|C - PC_f\|_F = 0 \quad (11)$$

onde $\|\cdot\|_F$ representa a norma de Frobenius. A solução de (11) é então obtida resolvendo um problema de otimização não linear (Camilo and Potts, 2022).

Uma vez calculada a matriz P o próximo passo consiste em definir o sensor virtual. As equações que descrevem a dinâmica deste sensor são:

$$\dot{x}_v(t) = A_v x_v(t) + B_v u_v(t) + L y_f(t) \quad (12)$$

$$u_f(t) = u_n(t) \quad (13)$$

$$y_n(t) = C_v x_v(t) + P y_f(t) \quad (14)$$

$$x_v(0) = x_{v0} \quad (15)$$

onde $x_v \in R^n$ e

$$A_v = A - LC_f \quad (16)$$

$$B_v = B \quad (17)$$

$$C_v = C - PC_f. \quad (18)$$

Observe que a matriz L pode ser escolhida de forma conveniente pelos métodos tradicionais de realimentação de estados já que (12) equivale à equação de um observador de estados de ordem completa.

O modelo da planta falha reconfigurado pelo sensor virtual é formulado então como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_f(t) \\ \dot{x}_v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ LC_f & A - LC_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f(t) \\ x_v(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ B \end{bmatrix} u_n(t) + \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} d(t) \quad (19)$$

$$y_n(t) = [PC_f \ C_v] \begin{bmatrix} x_f(t) \\ x_v(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

e sua representação na forma de diagrama de blocos aparece na Figura 2.

Das equações (12)-(14) e da Figura 2 vemos que a matriz P pode reconstruir de forma exata ou aproximada a saída nominal y_n dependendo de se a condição (9) é satisfeita ou não. Caso seja satisfeita, P será calculada como em (10) e $y_n = P y_f$ uma vez que $C_v = 0$. Neste caso particular, pode ser dito que o ajuste do modelo é exato. Quando (9) não é satisfeita o sensor virtual x_v aproxima a planta falha ao seu estado nominal.

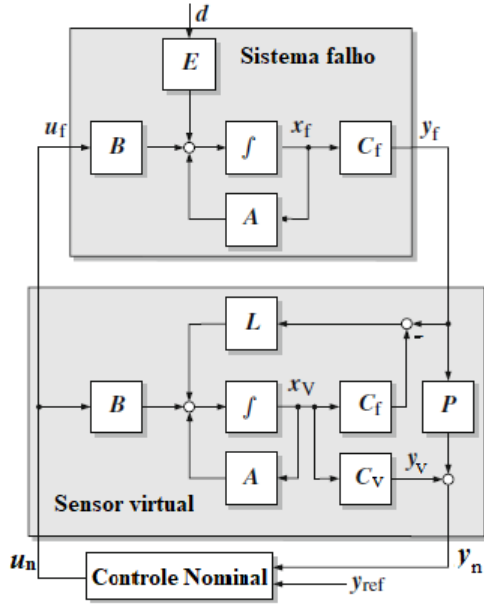


Figura 2. Diagrama de blocos do Controlador Tolerante a Falhas. Adaptado de Blanke (2006).

4. IMPLEMENTAÇÃO

Nesta seção aplicaremos a estratégia dos sensores virtuais nos circuitos CC/CC e CC/CA do inversor fotovoltaico descrito na seção 2.

4.1 Aplicação no circuito CC/CC

Este circuito possui duas saídas medidas, portanto será implementado o método dos sensores virtuais para falhas em ambos sensores. No caso de falha na leitura de corrente no indutor $x_1(t) = i_L(t)$ a primeira linha de C é zerada, ou seja:

$$C_{f_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Verificando a condição (9) temos que a mesma não é satisfeita, logo uma reconfiguração exata não poderá ser feita. Em vez disto a matriz P , que minimiza (11) é calculada resolvendo um problema de otimização não linear. Como solução deste problema foi obtida a matriz:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0,0459 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Utilizando o valor calculado de P_1 temos:

$$C_{v_1} = \begin{bmatrix} 1 & -0,0459 \\ 0,046 & 0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

O próximo passo consiste em calcular a matriz de injeção L em (12). Neste sentido, é necessário verificar se o par (A, C_{f_1}) é observável. Comprovada a observabilidade do par podemos utilizar os métodos tradicionais que permitem alocar os autovalores de A_v em (16). Como os autovalores do sistema nominal são: $\lambda_{1,2} = -4762,0 \pm j43680,0$ os autovalores do sensor virtual serão alocados o suficientemente afastados de $\lambda_{1,2}$ de modo que a dinâmica do sensor virtual seja mais rápida que a do sistema nominal

Zhang et al. (2016). Alocando os autovalores do sensor virtual em $\lambda_1 = -40000$ e $\lambda_2 = -45000$ obtemos:

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & -190 \\ 0 & 75512 \end{bmatrix} \quad (23)$$

No caso de falha na leitura da tensão $x_2(t) = V_c(t)$ é zerada a segunda linha de C :

$$C_{f_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Como a condição (9) também não foi satisfeita a matriz P é calculada resolvendo (11):

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0,0460 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

e finalmente

$$C_{v_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Por último é calculada a matriz L alocando os autovalores do sensor virtual na mesma posição do sensor virtual 1,

$$L_2 = \begin{bmatrix} 75480 & 0 \\ 421470 & 0 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

4.2 Aplicação no circuito CC/CA

No caso do circuito CC/CA começaremos por implementar um sensor virtual para falhas na medição da corrente de indutor 1, $y_1(t) = x_1(t)$, ou seja

$$C_{f_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Neste caso analisaremos primeiramente a observabilidade do par (A, C_{f_1}) , para a implementação do sensor virtual na saída 1. Foi verificado que este sistema não é observável, porém é estabilizável. Logo será necessário separar os modos observáveis de aqueles não observáveis e implementar um observador somente para a parte observável do sistema:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} -40,0 & -0,009 & 0 \\ 4,93 \times 10^8 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0018 & -40,0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} 0,009 \\ 0 \\ -0,0018 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\tilde{C}_{f_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Os modos observáveis das matrizes (28,29) e (30) são:

$$\tilde{A}_o = \begin{bmatrix} -40,0 & -0,009 \\ 4,93 \times 10^8 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\tilde{B}_o = \begin{bmatrix} 0,009 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\tilde{C}_{f_1 o} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Os autovalores de \tilde{A}_o são $\tilde{\lambda}_o = -20,0 \pm j2108,1$. Logo a partir do par $(\tilde{A}_o, \tilde{C}_{f_1 o})$, é calculada a matriz

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0,0089 \\ 0 & 360,0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

que aloca os polos do observador nas posições $\lambda_{1,2} = -200 \pm j2$. Observe que a nova matriz falha de saída é \tilde{C}_{f_1o} , ou seja, aquela que corresponde à parte observável do sistema. Utilizando esta matriz foi verificado que a condição (9) não é satisfeita pelo que uma reconfiguração exata não poderá ser implementada. Resolvendo o problema de otimização para (11) temos:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0,5383 & 0 \\ 0,9961 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

e

$$C_{v_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Para uma falha no segundo sensor o processo é similar. Neste caso a saída $y_2(t)$ é desligada fazendo:

$$C_{f_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Como a condição (9) também não é satisfeita e o sistema não é observável, mas sim estabilizável implementou-se o mesmo procedimento seguido para falha no sensor 1. Alocando os polos do observador na mesma posição do caso anterior temos que

$$L_2 = \begin{bmatrix} 75480,0 & 0 \\ 421470,0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0,0844 \\ 0 & 0,3998 \end{bmatrix} \quad (38)$$

e

$$C_{v_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

4.3 Resultados

Com o objetivo de testar a metodologia apresentada foi implementado um modelo em MatLab baseado em inversores comerciais a partir dos dados da Tabela 1. Para cada um dos sensores em ambos circuitos foi calculado um sensor virtual de acordo com as equações e matrizes da seção anterior. A simulação foi realizada assumindo que unicamente falhas nos sensores podem acontecer. Quando as falhas são detectadas o sensor falho é desligado e o sensor virtual assume seu lugar. Não é objetivo deste trabalho fazer um detalhamento dos algoritmos envolvidos na detecção e classificação das falhas, portanto será considerado que a informação do sensor falho é proporcionada ao sistema de controle geral da placa. Uma discussão detalhada do sistema de detecção de falhas deste circuito pode ser encontrada em Tojeiro et al. (2021). Inicialmente serão simuladas falhas no circuito CC/CC. Primeiramente será considerada uma falha no sensor de corrente de entrada (estado $y_1(t) = i_L(t)$). A simulação desta falha é mostrada na Figura 3.

O mesmo procedimento é aplicado agora para uma falha na medição da tensão à saída do circuito CC/CC ($y_2(t) = V_{out}$). A simulação desta falha pode ser apreciada na Figura 4.

Note que nas Figuras 3 e 4 o processo de reconstrução do sinal medido é satisfatório. O sensor virtual mantém o sinal no formato e nas especificações do projeto esperadas mesmo calculando o sensor virtual a partir do modelo médio linearizado do sistema e não sendo satisfeita a condição (9).

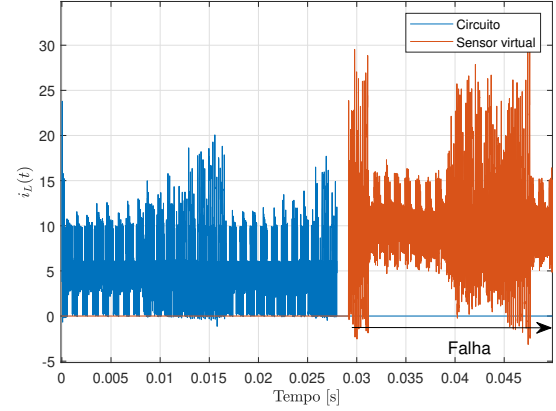


Figura 3. Falha no sensor de corrente do circuito CC/CC. Faixa de operação (0A; 30A)

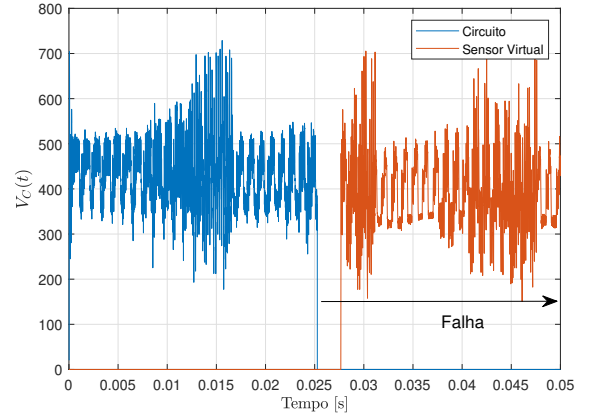


Figura 4. Falha no sensor de tensão do circuito CC/CC. Faixa de operação (200V; 700V)

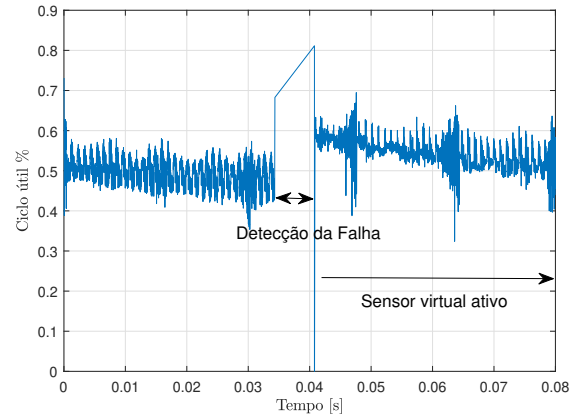


Figura 5. Ciclo útil do interruptor do conversor CC/CC.

Na Figura 5 é mostrado como o sinal de controle ($s(t)$) é afetado no momento do desligamento do sensor falho e seu retorno ao valor nominal quando o sensor virtual é ligado.

No caso de falhas nas leituras dos sensores do circuito CC/CA o procedimento é similar. Primeiramente foram simuladas falhas no sensor de corrente do indutor $y_1(t)$ e posteriormente na medição do sensor da tensão de saída

$y_2(t)$. O comportamento do sistema ante a ocorrência destas falhas pode ser observado nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

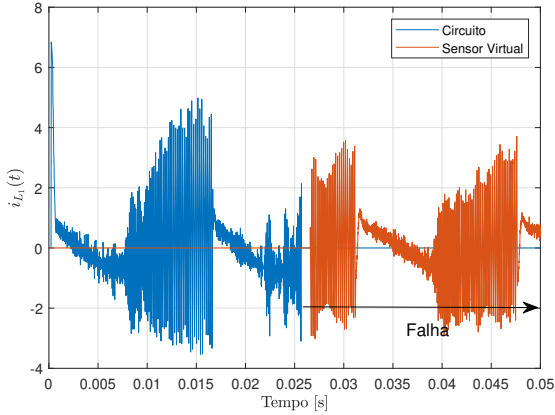


Figura 6. Falha no sensor de corrente do circuito CC/CA. Faixa de operação (-5A; 5A)

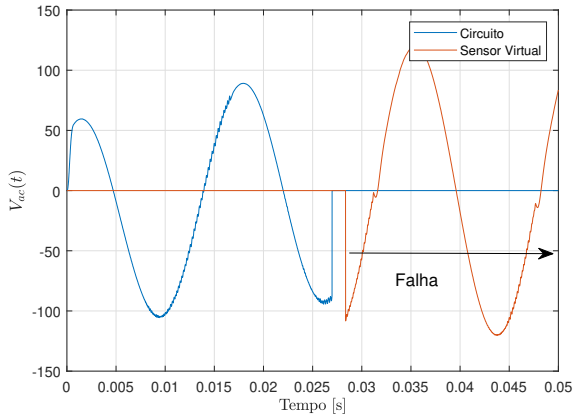


Figura 7. Falha no sensor de tensão de saída do circuito CC/CA. Faixa de operação (100V; 140V) de CA

Na Figura 8 é mostrado o comportamento do circuito sem o efeito do controle tolerante a falhas. Note que na ocorrência de uma falha se o FTC não for ativado por meio dos sensores virtuais o sistema sairia rapidamente das especificações de projeto. No entanto a atuação do sensor virtual faz com que a saída continue dentro da faixa de operação.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia de controle tolerante a falhas no sistema inversor de um painel fotovoltaico. O sistema foi dividido em duas partes um circuito de elevação de tensão CC/CC e um circuito inversor CC/CA. O modelo matemático de ambos circuitos foi calculado e a partir deste foram implementados os respectivos sensores virtuais considerando falhas em cada uma das variáveis medidas.

Verificou-se que a condição para uma reconfiguração exata não foi satisfeita em nenhum dos casos estudados. Além disto, os modelos tinham um grau de dificuldade considerável já que para o circuito CC/CC o modelo obtido

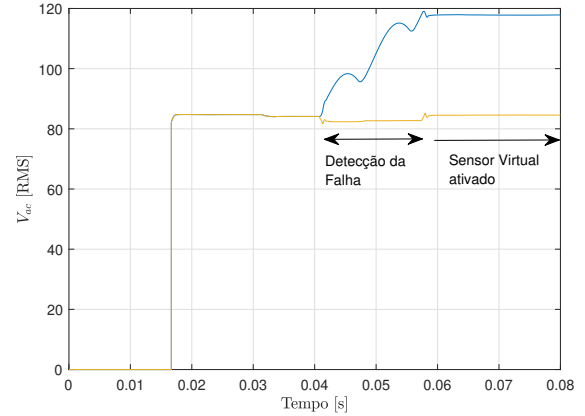


Figura 8. Saída de tensão (RMS) do circuito final. Faixa de operação RMS (70V; 100V).

teve que ser linearizado a partir do modelo medio de operação devido a que o circuito possui dois modos de trabalho, esta aproximação introduziu um alto grau de incerteza no modelo. No caso do circuito CC/CA o modelo resultante não é observável mas sim estabilizável pelo que teve que ser implementado o sensor virtual levando somente em consideração o modo observável do circuito.

Os resultados obtidos foram apresentados e o sistema FTC conseguiu manter o circuito operando em segurança dentro das especificações do projeto. Este resultado evidenciou a robustez desta metodologia frente a incertezas e fenomenos não modelados. Como trabalho futuro é pretendida a implementação desta estratégia em inversores comerciais.

REFERÊNCIAS

- Abbaspour, A., Mokhtari, S., Sargolzaei, A., and Y., K.K. (2020). A survey on active fault-tolerant control systems. *Electronics*, 9, 1513.
- Alwi, H., Edward, C., and Tan, C.P. (2011). *Fault detection and fault-tolerant control using sliding modes*. Springer-Verlag, London, 1st edition.
- Blanke, M. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2nd edition.
- Camilo, P. and Potts, A.S. (2022). Fault tolerant control applied to drum boiler by virtual actuator. In *2022 13th Asian Control Conference (ASCC)*, 1628–1633.
- Dogga, R. and Pathak, M. (2019). Recent trends in solar pv inverter topologies. *Solar Energy*, 183, 57–73.
- Iserman, R. (2006). *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer, Heidelberg Dordrech, 1st edition.
- Kabalci, E. (2020). Review on novel single-phase grid-connected solar inverters: Circuits and control methods. *Solar Energy*, 198, 247–274.
- Tojeiro, D.O., Cabeza, R.T., and Potts, A.S. (2021). Fault detection based on neuro-fuzzy models and residual evaluation with fuzzy thresholds applied to a photovoltaic system. *IFAC-PAPERSONLINE*, 54, 717–722.
- Uribe, G. (2023). Brasil atinge recorde em geração de energia solar. *CNN Brasil*.
- Zhang, J., Swain, A., and Nguang, S. (2016). *Robust Observer-Based Fault Diagnosis for Nonlinear Systems Using MATLAB*. Springer, 1st edition.