

REDUÇÃO DA INJEÇÃO DE HARMÔNICOS POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NA REDE DE ENERGIA UTILIZANDO ALGORITMO FUZZY

Ricardo A. P. Franco – ricardofranco3@gmail.com

Henrique P. Corrêa – henriquepires19@hotmail.com

Flávio H. T. Vieira – flavio_vieira@ufg.br

Marcelo S. de Castro – mcastro@emc.ufg.br

Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Resumo. No presente trabalho, propõe-se a implementação computacional de um modelo de simulação de painéis fotovoltaicos baseado em uma versão modificada de um equacionamento clássico da célula fotovoltaica. A modificação proposta inclui o efeito da variação de temperatura sobre a corrente fotogerada, aumentando a precisão do modelo original. É realizada uma análise comparativa da operação de um sistema fotovoltaico em três situações distintas, a saber: com o uso de filtragem passiva das componentes harmônicas geradas via filtro LC e com filtragem destas por meio de filtros ativos, que opera sobre os sinais de potência em sua entrada com os algoritmos *Recursive Least Squares* e *Fuzzy*.

Palavras-chave: Geração distribuída, Distorção Harmônica, Geração Fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

A crescente utilização de sistemas fotovoltaicos no contexto de geração distribuída confere grande relevância ao estudo dos impactos que tais sistemas podem surtir sobre as redes de distribuição de energia elétrica as quais encontram-se conectados. Mais especificamente, tendo-se em vista o caráter não-linear e sazonal da geração fotovoltaica, especial atenção deve ser dispendida à análise da injeção de componentes harmônicas de corrente e modificação nos perfis de tensão na rede, fatores estes que representam avarias à qualidade da energia elétrica suprida, caso não sejam adequadamente controlados.

A simulação computacional de sistemas fotovoltaicos e dos efeitos que sua operação surte sobre a rede de distribuição na qual encontram-se conectados é desejável, tendo-se em vista o fato de permitir a avaliação dos principais parâmetros de qualidade de energia nos barramentos de geração distribuída e, portanto, ser um instrumento útil na realização de estudos preliminares para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Neste trabalho, objetiva-se avaliar o impacto sobre a qualidade de energia em uma rede devido a inserção de um painel fotovoltaico na mesma, propondo-se algumas ferramentas para redução da Distorção Harmônica Total (DHT). Para tal, é inicialmente proposto um modelo de simulação de painel fotovoltaico, o qual leva em consideração os principais parâmetros que influenciam as características I-V do painel, sendo também capaz de simular transitórios e aferir parâmetros de qualidade de energia na barra de geração fotovoltaica. O modelo proposto, baseado em (Buresch, 1983), introduz uma modificação de equacionamento visando a eliminação de aproximações computacionais e um consequente aumento de precisão.

Apresenta-se também, neste artigo, uma análise comparativa entre diferentes métodos de supressão de harmônicos na tensão entregue pelo sistema fotovoltaico. O mais básico consiste de um filtro de segunda ordem projetado tendo-se em vista a atenuação de harmônicos concomitantemente à manutenção da fundamental. Em seguida, avaliou-se o desempenho de redução de harmônicos com um filtro adaptativo utilizando algoritmo *Recursive Least Squares* (RLS). O último método de filtragem considerado consiste no uso de um controlador *fuzzy*, capaz de processar sinais de potência, previamente treinado para a eliminação de ruído superposto ao sinal original.

A distorção harmônica provocada por sistemas fotovoltaicos é um tópico analisado em vários trabalhos da literatura. Dentre eles, (El-Sayed *et al.*, 2016) propõe a inserção de filtros passivos de sintonização simples na rede (*single tuned passive filters*) para mitigar os harmônicos injetados na rede. Em (Castilla *et al.*, 2013), são expostas as limitações do método controle de corrente ressonante (*resonant current control*), sendo proposto um projeto de controle com o objetivo de aprimorá-lo. É proposto, em (Das *et al.*, 2015), uma configuração de sistemas fotovoltaicos que utiliza filtro harmônico de dupla-sintonização (*double-tuned harmonic filter*) para a manutenção da qualidade de energia. Em (Moftah *et al.*, 2016), é proposto um filtro de potência shunt ativo (*shunt active power filter*) para reduzir-se as distorções harmônicas geradas por circuito inversor e cargas não-lineares. O trabalho (Adekol *et al.*, 2016) analisa um filtro passa-baixa entre inversor e rede elétrica para a redução da distorção harmônica. Um dos intuítos do presente trabalho é contribuir, neste contexto, via análise comparativa do uso de filtragem passiva com filtro LC e por meio de filtros ativos que processam os sinais de potência, como filtro RLS e via lógica *fuzzy*.

2. O MODELO DE PAINEL FOTOVOLTAICO

O elemento fundamental que compõe os painéis utilizados em geração distribuída é a célula fotovoltaica, a qual é modelada pelo circuito equivalente ilustrado na Fig. 1. Neste trabalho, adotamos a aproximação $R_{sh} \rightarrow \infty$, válida para células de alta qualidade (Isabella *et al.*, 2016). O equacionamento deste circuito com essa aproximação leva à característica I-V dada pela Eq. (1).

$$V = m \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{ph} + I_0 - I}{I_0}\right) - R_s I \quad (1)$$

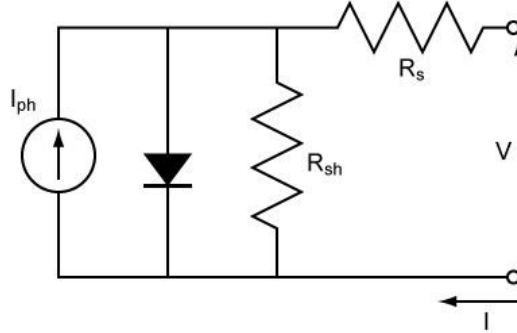


Figura 1- Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

Os parâmetros utilizados em Eq. (1) são apresentados, assim como seus valores, na Tab. 1. Parâmetros dependentes da irradiância (S) e temperatura da célula (T) encontram-se expressos para a condição de referência *Standard Temperature Condition* (STC). Os valores utilizados referem-se a uma célula fotovoltaica do módulo MSX-60, tendo sido estimados segundo informações de datasheet (MSX-60, 2016) e o método dado em (Franco *et al.*, 2016).

Tabela 1 - Parâmetros da célula fotovoltaica.

| PARÂMETROS | DESCRIÇÃO | VALOR SIMULADO |
|------------|-------------------------------|------------------------|
| m | Fator de Idealidade | 1,5 |
| V_t | Tensão térmica | 26 mV |
| I_0 | Corrente reversa de saturação | $1,02 \cdot 10^{-6}$ A |
| I_{ph} | Corrente fotogerada | 3,8 A |
| R_s | Resistência série | 0,003 Ω |

Os parâmetros dependentes de T e S são I_{ph} , I_0 e V_t . Logo, a variação de temperatura da célula e irradiância promovem alterações na característica I-V. Em (Buresch, 1983), é proposto um método de modificação da característica, em função de T e S , por meio de fatores corretivos. Isto é, os parâmetros da Tab. 1, com exceção de I_{ph} , são tomados como fixos e o efeito da variação de T e S sobre a característica é calculado via Eq. (2) e Eq. (3), em que $V^*(T_o, S_o) = V(T_o, S_o, I_{ph}(T, S))$.

$$\frac{I_{ph}(T,S)}{I_{ph}(T_o,S_o)} = [1 + \gamma_T(T - T_o)] \frac{S}{S_o} \quad (2)$$

$$\frac{V(T,S)}{V^*(T_o,S_o)} = 1 + \beta_T(T - T_o)[1 + \beta_T \alpha_S(S - S_o)] \quad (3)$$

onde T_o é a temperatura em STC ($^{\circ}\text{C}$) e S_o é a irradiância em STC (W/m^2).

Os fatores corretivos da Eq. (2) e Eq. (3) tem seus valores, extraídos do *datasheet* do módulo MSX-60, relacionados na Tab. 2. Em particular, o parâmetro α_S não é dado explicitamente, mas pode ser calculado por meio da *Nominal Operating Cell Temperature* (NOTC) fornecida no *datasheet* por meio da Eq. (4).

$$\alpha_S = \frac{NOTC(^{\circ}\text{C}) - 20}{S_o\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) - 800} \quad (4)$$

Entretanto, em (Buresch, 1983), T (e sua respectiva referência T_o) é tomado como a temperatura ambiente. O coeficiente α_S é utilizado com o intuito de considerar o aquecimento da célula fotovoltaica e sua consequente operação

em temperatura superior a ambiente. Vê-se que o efeito deste aquecimento é desconsiderado na Eq. (2). Assim, sendo o aquecimento $\Delta T = \alpha_S(S - S_o)$, surge, na Eq. (3), o termo espúrio $\beta_T^2(T - T_o)\Delta T$.

Tabela 2 - Especificações elétricas do módulo XXXX para as condições de irradiância 1.000 W/m^2 , temperatura de célula $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e espectro AM 1,5.

| PARÂMETROS | DESCRIÇÃO | VALOR SIMULADO |
|------------|---|---|
| α_S | Coefficiente de aquecimento | $0,13 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ |
| β_T | Coefficiente de temperatura para V_{oc} | $-0,38 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ |
| γ_T | Coefficiente de temperatura para I_{sc} | $-0,65 \text{ } \%/^\circ\text{C}$ |

Este trabalho propõe, para que tais imprecisões sejam evitadas, que T seja considerado como a temperatura da célula. Esta temperatura pode ser deduzida da temperatura ambiente T_a por meio do coeficiente α_S . Logo, tendo o aquecimento sido contabilizado previamente, faz-se $\alpha_S = 0$ na Eq. (3). A Fig. 2 ilustra a implementação computacional, via *Simulink*, da Eq. (1) a Eq. (4), considerando-se a correção proposta ao modelo.

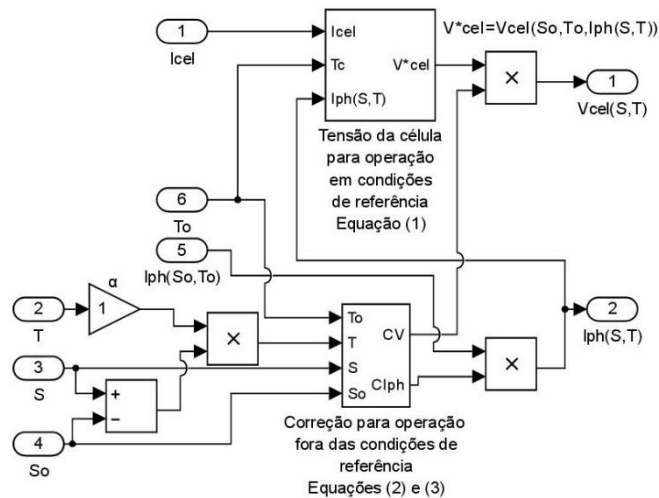


Figura 2- Implementação da célula fotovoltaica.

A obtenção da característica I-V do painel fotovoltaico decorre do fato deste ser uma associação paralela entre N_p strings de N_s células fotovoltaicas cada, o que implica em $V = N_s \cdot V_{cel}$ e $I = N_p \cdot I_{cel}$, onde V_{cel} e I_{cel} são os valores de tensão e corrente terminais calculados via Eq. (1) a Eq. (3). A implementação do painel fotovoltaico, realizada via *Simulink*, encontra-se na Fig. 3.

3. PROJETO ELEMENTAR E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

De posse do modelo proposto para o painel fotovoltaico, este foi utilizado conjuntamente com a biblioteca *SimPowerSystems* com o intuito de simular-se um sistema fotovoltaico. Este é projetado via considerações teóricas, de modo a ser possível a validação dos resultados obtidos na simulação realizada.

O sistema hipotético considerado consiste em um painel composto por módulos fotovoltaicos MSX-60, distribuídos em 72 strings de 12 módulos associadas em paralelo ($N_s = 432$ e $N_p = 12$), conectado em cascata com um conversor *boost* e um inversor trifásico. O conversor *boost* tem seu *duty cycle* controlado por um algoritmo de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Um filtro LC é utilizado na saída do sistema para a atenuação de harmônicos gerados pelo inversor.

Toma-se como condição representativa de operação do sistema a *Nominal Operation Cell Temperature* (NOCT) fornecida no *datasheet* do módulo MSX-60, $T = 47 \text{ }^\circ\text{C}$ e $S = 800 \text{ W/m}^2$. Para essas condições, calcula-se, com auxílio da Eq. (1) a Eq. (3), $V_{mp,painel} \approx 182,8 \text{ V}$ e $I_{mp,painel} \approx 204,5 \text{ A}$. Logo, em condições usuais, a potência máxima é $P_{mp,painel} \approx 37,4 \text{ kW}$.

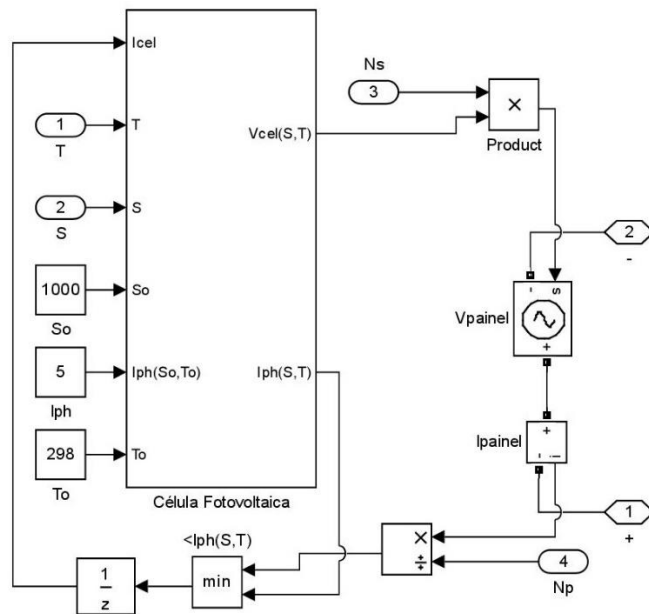


Figura 3 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

Supõe-se que o sistema seja instalado no barramento de uma carga residencial de valor nominal 25 kVA, com fator de potência $\cos(\theta) = 0,92$ e tensão nominal de 220V. A rede de distribuição considerada é representada por seu equivalente de Thévenin referido à base da carga. A configuração geral do sistema é ilustrada na Fig. 4.

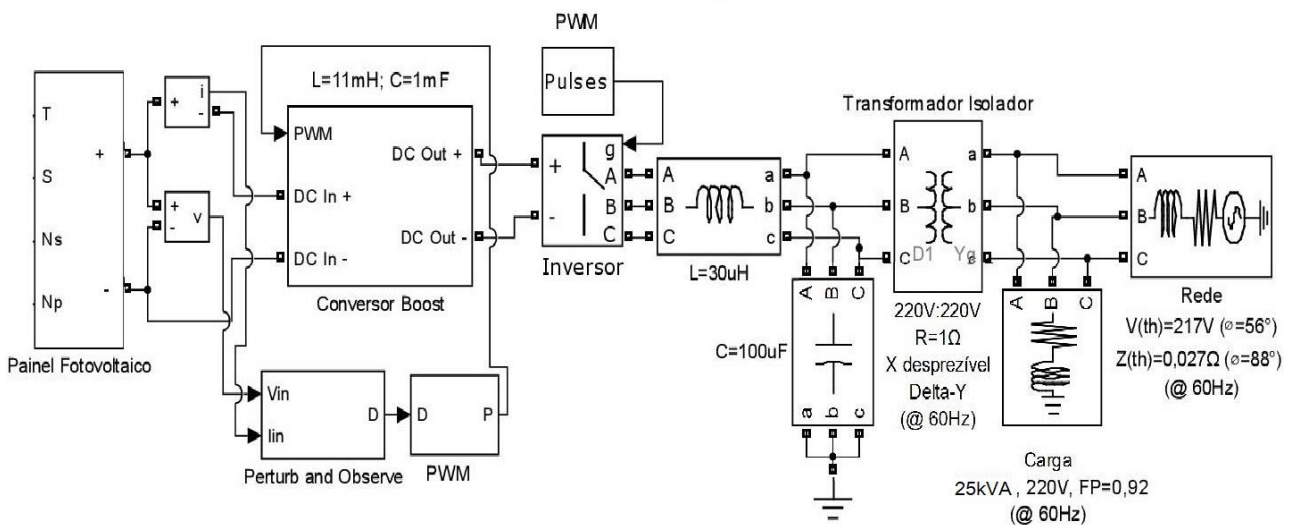


Figura 4 - Esquema do sistema simulado.

3.1 Conversor Boost e o Algoritmo Perturb & Observe (P&O)

O conversor *boost* é um circuito que transforma tensão CC de entrada em um nível CC superior em sua saída. Há uma dependência definida entre o *duty cycle* (D) do sinal de controle e a razão de transformação $M(D)$ (Mohan *et al.*, 2003).

Para cada $M(D)$ e um mesmo circuito de saída, o painel fotovoltaico perceberá um carregamento diferente. Se D for ajustado de modo que o carregamento sempre corresponda ao máximo de potência da característica I-V do painel, é garantida a extração ótima de potência dos terminais do painel fotovoltaico. O algoritmo de controle simulado é o algoritmo P&O, com o incremento $\Delta D = \pm 0,1\%$ (Morales, 2010).

Os elementos reativos do conversor foram projetados de acordo com a Eq. (5) e a Eq. (6), visando-se a obtenção de *ripples* de tensão e corrente iguais a, respectivamente, 5,0 V e 1,1 A para $D = 0,65$. As frequências de chaveamento do conversor e de amostragem do algoritmo P&O são iguais a $f = 10$ kHz.

$$\Delta I_L = \frac{V_{in} \cdot D}{L \cdot f} \quad (5)$$

$$\Delta V_{out} = \frac{I_{out} \cdot D}{C \cdot f} \quad (6)$$

3.1 Inversor Trifásico

Considera-se que o inversor trifásico é do tipo *six-pulse*, sendo controlado via *pulse-width modulation* (PWM). Opta-se pela utilização da frequência de portadora $f_s = 6,06 \text{ kHz}$, o que implica uma modulação em frequência $m_f = 101$. A escolha de m_f ímpar garante redução de picos de amplitude no conteúdo harmônico gerado e previne a injeção de subharmônicos no espectro da tensão de saída (Mohan *et al.*, 2003).

Como a saída do inversor é conectada em paralelo com a rede, é necessário que seu nível de tensão CA de saída seja adequadamente projetado para que seja da mesma ordem de grandeza da rede. Sabe-se que (Mohan *et al.*, 2003), para um inversor trifásico controlado via PWM e operando com modulação em amplitude $0 < m_a < 1$, a tensão suprida é dada pela Eq. (7).

$$V_{LL,1}^{inv} \approx 0,612 \cdot m_a \cdot V_d = 0,612 \cdot m_a \cdot \frac{V_{cc}}{1-D} \quad (7)$$

onde V_d é a tensão de saída do conversor *boost* e V_{cc} é a tensão suprida pelo painel fotovoltaico. Para operação na NOTC, $V_{cc} \approx 180V$. Considerando que a simulação foi realizada para uma mesma condição ambiental e de rede, adotou-se o procedimento de estimar-se o *duty cycle* do conversor *boost* com $m_a = 1$ e escolher V_{cc} adequadamente. Para cenários variáveis, estratégias de controle de tensão devem ser consideradas, o que será implementado em trabalhos futuros.

Para prever-se D em regime, é necessário o conhecimento da impedância de entrada $|Z_{in}|$ do inversor. O procedimento adotado para o aferimento desta foi uma simulação acessória, na qual conectou-se uma fonte de tensão DC ideal aos terminais do inversor e registrou-se o valor médio da corrente fluindo nos terminais da fonte. Desse modo, $|Z_{in}|$ pode ser calculado pela razão entre tensão e corrente média de fonte. Por meio desse procedimento, obteve-se $|Z_{in}| \approx 7,10 \Omega$.

Como $|Z_{in}| \approx 7,10 \Omega$ e o algoritmo MPPT atua no sentido de fazer $|Z_{in}| = \left[M^2(D) \cdot \left(\frac{V_{mp,painel}}{I_{mp,painel}} \right) \right]$, obtém-se $D \approx 0,65$. Considerando-se que $V_{cc} \approx 180 V$, obtém-se, através da Eq. (7), a tensão de saída $V_{LL,1}^{inv} \approx 313,9 V$.

3.3 Filtro LC

Em inversores trifásicos controlados via PWM, a distorção harmônica revela-se predominante em torno dos harmônicos de ordem $k \cdot m_f$, com k inteiro. Como $m_f = 101$, harmônicos de tensão fornecidos pelo inversor terão amplitudes significativas a partir da vizinhança de $6,06 \text{ kHz}$. Logo, estipula-se uma frequência de *cut-off* com valor de $f_o = 3,0 \text{ kHz}$. Portanto, é necessário verificar se a resistência R do transformador isolador promove um pico de ressonância demasiadamente elevado na vizinhança de f_o , o que poderia aumentar a DHT. A teoria clássica de filtros fornece a Eq. (8) e a Eq. (9) para o projeto de um filtro RLC passa-baixa, cuja topologia corresponde ao circuito em questão (Kuo, 1962).

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{1}{4\pi RC f_o} \quad (9)$$

Utilizou-se a Eq. (8) para o projeto de um filtro LC com a especificação de f_o dada e, via Eq. (9), verifica-se $\zeta = 0,273$, o que indica um pico de ressonância com magnitude $\approx 1,9 \text{ dB}$ na frequência de *cut-off*. Os valores dos elementos do filtro LC obtidos foram: $L = 30 \mu\text{H}$ e $C = 100 \mu\text{F}$, valores que estão apresentados na Fig. 4.

4. MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS GERADOS PELO SISTEMA FOTOVOLTAICO VIA CONTROLADOR FUZZY

Com objetivo de se avaliar a mitigação de harmônicos gerados pelo sistema fotovoltaico utilizando filtros ativos, dois algoritmos de filtragem adaptativa foram implementados, NNC (*Nearest Neighborhood Clustering*) e RLS (*Recursive Least Squares*). A implementação RLS utilizada é aquela descrita em (Wang, 1997). Na subseção IV-A, descreve-se o modelo NNC utilizado.

4.1 Algoritmo *Nearest Neighborhood Clustering*

A lógica *fuzzy* é uma ferramenta capaz de processar informações vagas, usualmente descritas em linguagem natural, convertendo-as em formas quantitativas, passíveis de processamento por sistemas computacionais (Klir and Yuan, 2008).

O objetivo da lógica *fuzzy* é gerar saídas lógicas a partir de um conjunto de entradas imprecisas e ruidosas (Zadeh, 1965) (Wang, 1997).

O sistema *fuzzy* utilizado consiste na obtenção de um modelo que combine N pares entrada-saída $(x_0^l; y_0^l)$, com $l = 1, 2, \dots, N$, com uma devida tolerância $\epsilon > 0$, isto é, $|f(x_0^l) - y_0^l| < \epsilon$ (Wang, 1997). Logo, o sistema implementado neste trabalho é representado pela Eq. (10).

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^N y_0^l \cdot \exp\left(-\frac{|x-x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{l=1}^N \exp\left(-\frac{|x-x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (10)$$

onde y_0^l corresponde às saídas de uma regra l , x representa os dados de entrada, x_0^l são os centros do modelo, σ é o desvio padrão e N determina a quantidade de regras *fuzzy*.

Os parâmetros do sistema representado pela Eq. (10) podem ser encontrados utilizando técnicas de *clustering*. Tais técnicas classificam um conjunto de dados em subconjuntos (*clusters*) de acordo com suas propriedades (Wang, 1997).

A técnica de *clustering* utilizada neste trabalho foi a *Nearest Neighborhood Clustering*. Nesta técnica, toma-se como centro do primeiro *cluster* o primeiro dado de entrada. Em seguida, analisa-se se a distância do próximo dado ao centro do *cluster* é menor do que um valor predefinido (r); caso a distância seja inferior a r , insere-se o dado neste *cluster*; senão, cria-se um novo *cluster* com este dado como seu centro. O algoritmo é apresentado a seguir (Wang, 1997):

- Passo 1: Com o primeiro par de entrada e saída $(x_0^1; y_0^1)$, define-se o centro do cluster $x_c^1 = x_0^1$ e atribui-se $A^1(l) = y_0^1$ e $B^1(l) = 1$. Ademais, é definido o valor do raio r .

- Passo 2: Considera-se o k -ésimo par entrada-saída $(x_0^k; y_0^k)$ e M clusters com centros x_c^k , $k = 1, 2, \dots, M$. Calculam-se as distâncias de x_0^k aos M centros dos clusters, $|x_0^k - x_c^l|$, $l = 1, 2, \dots, M$. Seja a menor distância correspondente a $x_c^{l_k}$. Logo:

- a) Se $|x_0^k - x_c^{l_k}| > r$, define-se novo *cluster* com centro $x_c^{M+1} = x_0^k$. Assim, realizam-se as atribuições $A^{M+1}(k) = y_0^k$, $B^{M+1}(k) = 1$ e, para $l = 1, 2, \dots, M$, $A^l(k) = A^l(k-1)$ e $B^l(k) = B^l(k-1)$.

- b) Se $|x_0^k - x_c^{l_k}| < r$, faz-se, para $l = 1, 2, \dots, M$ com $l \neq l_k$, $A^l(k) = A^l(k-1)$ e $B^l(k) = B^l(k-1)$. Então, fazem-se as atribuições dadas pela Eq. (11) e Eq. (12).

$$A^{l_k}(k) = A^{l_k}(k-1) + y_0^k \quad (11)$$

$$B^{l_k}(k) = B^{l_k}(k-1) + 1 \quad (12)$$

Passo 3: Se x_0^k não for considerado um novo *cluster*, então o sistema *fuzzy* é definido pelos k pares de entrada e saída $(x_0^j; y_0^j)$, $j = 1, 2, \dots, k$, sendo descrito pela Eq. (13).

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M A^l(k) \cdot \exp\left(-\frac{|x-x_c^l|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{l=1}^M B^l(k) \cdot \exp\left(-\frac{|x-x_c^l|^2}{\sigma^2}\right)} \quad \text{Eq. (13)}$$

Por outro lado, se x_0^k é considerado um novo *cluster*, então o sistema é definido pela Eq. (13), com os somatórios variando entre 1 e $M+1$, incluindo-se o *cluster* x_0^k .

- Passo 4: Retorna-se ao Passo 2 para $k = k+1$.

Nota-se que $B^l(k)$ é igual ao número de pares entrada-saída e $A^l(k)$ corresponde ao somatório de todas as saídas do par entrada-saída associados aos clusters atuais. Logo, quando todos os pares entrada-saída forem associadas a centros de *cluster*, o sistema representado pela Eq. (13) será idêntico ao sistema *fuzzy* ótimo dado pela Eq. (10). Com a possibilidade de criação de novos clusters, é possível que o número de regras *fuzzy* também seja alterado durante o processo de *clustering*, visto que o número de clusters depende da distribuição dos dados e de r . A complexidade do sistema é determinada por r (Wang, 1997).

4.2 Redução de THD Utilizando Algoritmo Fuzzy

Assume-se que o sistema *fuzzy* age como um filtro de impedâncias de entrada e saída ideais. Desse modo, a simulação computacional do filtro é realizada por meio do seguinte procedimento: o sistema é inicialmente simulado isento de qualquer tipo de filtro, sendo a tensão da fase $v_a(t)$ registrada e, subsequentemente, tratada pelo algoritmo *fuzzy*.

A tensão de saída $v_{a,fz}(t)$ obtida é utilizada como base para uma nova simulação, na qual uma fonte de tensão trifásica balanceada, cuja tensão da fase a é igual a $v_{a,fz}(t)$, alimenta diretamente o transformador isolador.

A entrada do sistema *fuzzy* é a tensão de fase $v_a(t)$ para operação sem filtro. O sistema *fuzzy* utiliza-se de um sinal de referência senoidal. Este sinal é usado pelo sistema para modelar-se um controlador $\mu(k)$ que faz a saída do sistema seguir a saída definida pelo sinal de referência. O controlador é dado pela Eq. (14) (Wang, 1997).

$$\mu(k) = -f_k[y(k), y(k-1)] + r(k) \quad (14)$$

Em Eq. (14), $f_k[y(k), y(k-1)]$ é o sistema *fuzzy*, representado pela Eq. (10) e Eq. (13), e $r(k)$ é o sinal de referência. O comportamento do sistema *fuzzy* é definido por:

$$y_{fuzzy}(k) = y(k-1) + \mu(k) \quad (15)$$

Na Eq. (15), $y_{fuzzy}(k)$ é a saída do sistema *fuzzy*, que é definido pela amostra anterior da tensão de entrada $y(k-1)$ e pelo controlador *fuzzy*. Vê-se, portanto, que o sistema *fuzzy* tende a, iterativamente, corrigir o sinal de entrada por meio de seu controlador, eliminando o ruído relativamente a $r(t)$. O sinal de referência é dado pela equação:

$$r(k) = \sqrt{2}V_{ph,1}^{inv} \cdot \cos(2\pi f_s t) \quad (16)$$

Na Eq. (16), $f_s = 60 \text{ Hz}$ e $V_{ph,1}^{inv}$ é a fundamental da tensão de fase suprida pelo inversor, aferida para operação do sistema na ausência de filtros. Por análise análoga àquela realizada na Seção 3.2, obtém-se $D = 0,59$ e $V_{LL,1}^{inv} \approx 268,7 \text{ V}$. Ademais, para o mesmo conversor *boost*, obtém-se, via Eq. (5) e Eq. (6), $\Delta I_L \approx 0,9 \text{ A}$ e $\Delta V_{out} \approx 5,0 \text{ V}$.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

5.1 Modelo de Painel Fotovoltaico

Parâmetros pertinentes na característica I-V de um painel fotovoltaico são tensão e corrente terminais nas situações de operação em curto-circuito, circuito aberto e máxima potência. Ademais, a potência suprida na condição de máxima transferência de potência é também relevante.

A Tab. 3 mostra a comparação entre os valores calculados por meio do *datasheet* do fabricante, obtidos via simulação com o modelo proposto e via simulação sem a correção de modelo proposta. Esses dados revelam que a correção proposta aumenta a acurácia do modelo original. Os valores são dados para uma célula individual do painel. A corrente de curto-circuito não é dada por ser um dado de entrada do modelo.

Tabela 3 - Parâmetros da Característica I-V (NOTC).

| PARÂMETRO | TEÓRICO | SIMULADO | SIMULADO (ORIGINAL) |
|-----------|----------|----------|---------------------|
| V_{oc} | 0,5265 V | 0,5265 V | 0,5173 V |
| V_{mp} | 0,4352 V | 0,4274 V | 0,4202 V |
| I_{mp} | 2,8400 A | 2,8441 A | 2,8025 A |
| P_{mp} | 1,2286 W | 1,2168 W | 1,1788 W |

5.2 Filtro LC

O sistema fotovoltaico projetado na Seção 3 foi simulado com auxílio do modelo proposto. Na Tab. 4, apresenta-se a comparação entre valores de parâmetros que foram previamente projetados e, posteriormente, obtidos na simulação. O parâmetro THD_v é a distorção harmônica total verificada na tensão de linha no Ponto de Acoplamento Comum (PAC).

Tabela 4 – Parâmetros medidos para o filtro LC.

| PARÂMETRO | TEÓRICO | SIMULADO |
|------------------|---------|----------|
| ΔI_L | 1,1 A | 0,8 A |
| ΔV_o | 5,0 V | 7,0 V |
| D | 0,65 | 0,67 |
| $V_{LL,1}^{inv}$ | 313,9 V | 297,0 V |
| THD_v | – | 2 % |

Na Fig. 5, encontra-se o espectro da tensão de linha no PAC, para operação do sistema fotovoltaico na ausência de filtros. Evidentemente, a DHT seria demasiadamente elevada. Já a Fig. 6 apresenta o espectro da tensão de linha no PAC para o filtro LC.

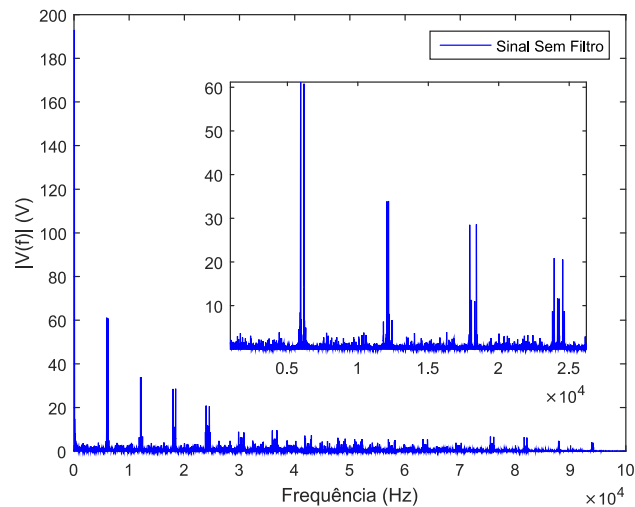


Figura 5 - Espectro da tensão de linha para o caso sem filtro.

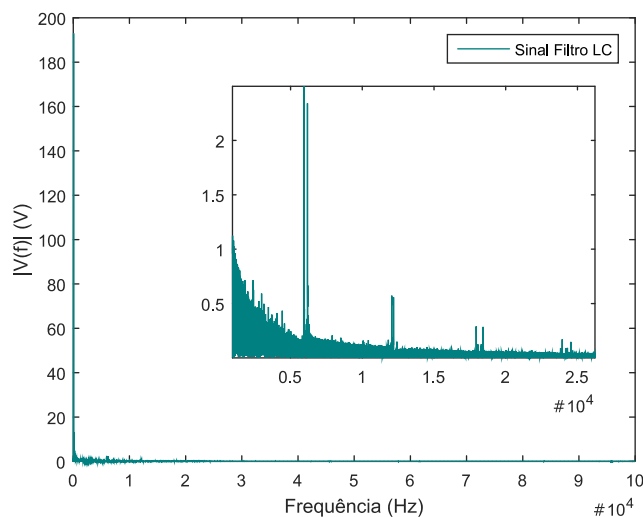


Figura 6 - Espectro da tensão de linha para o caso com filtro LC.

Deve-se notar que as equações utilizadas para o projeto do conversor *boost* são derivadas de suposições de operação ideal do conversor, por exemplo, ausência de impedância interna na fonte DC (Mohan *et al.*, 2003). Isto justifica o desvio existente entre valores projetados e simulados de *ripple* e tensão de saída do inversor.

A literatura sugere (Mohan *et al.*, 2003) que a DHT da tensão de saída de um inversor PWM com elevada modulação em frequência, após filtragem apropriada dos harmônicos dominantes, não ultrapassa 5%. O resultado obtido com o filtro LC mostra-se coerente com esta asserção.

5.2 Filtro com Sistema Fuzzy

Aplicou-se o algoritmo *fuzzy* descrito na Seção 4 para controlar-se o sinal produzido pelo sistema fotovoltaico conectado, de forma a mitigar os harmônicos na rede. Considerou-se como valores de entrada para o treinamento do algoritmo *fuzzy*, dados referentes a dois ciclos da frequência fundamental do sinal produzido pelo sistema fotovoltaico em regime permanente. Após o treinamento do sistema *fuzzy*, este foi posto a atuar como filtro sobre a forma de onda de entrada.

Na Tab. 5, encontra-se a comparação entre valores teóricos e simulados, dos mesmos parâmetros analisados na seção anterior, para a operação do sistema com o controlador *fuzzy*.

Novamente, a discrepância entre os valores calculados de *ripple* e tensão de linha do inversor apresentam certa divergência com relação àqueles obtidos na simulação por causa da condição de idealidade da fonte DC (neste caso, o painel fotovoltaico) não ser satisfeita.

Os resultados revelam que a implementação física de um filtro ativo da natureza proposta neste trabalho seria capaz, a depender da natureza do algoritmo *fuzzy* utilizado, de propiciar grandes reduções na injeção de componentes harmônicas na rede de distribuição; de fato, a forma de onda da tensão de linha revelou-se um sinal muito próximo de uma senóide pura, para operação com os filtros *fuzzy*.

Tabela 5 – Parâmetros medidos para os filtros ativos.

| PARÂMETRO | TEÓRICO | SIMULADO |
|------------------|---------|-------------------------------|
| ΔI_L | 0,9 A | 0,7 A |
| ΔV_o | 5,0 V | 6,0 V |
| D | 0,59 | 0,58 |
| $V_{LL,1}^{inv}$ | 267,9 V | 234,7 V |
| THD_V | – | 0,035 % (NNC) / 0,047 % (RLS) |

O melhor resultado obtido com *fuzzy* pode ser justificado considerando-se que, enquanto a atuação do filtro LC promove a mitigação de frequências $f > f_o$, o controlador *fuzzy*, quando suficientemente robusto, força o sinal de entrada a acompanhar um sinal senoidal de referência, também atenuando fortemente harmônicos de ordem menor ou próxima a f_o . O espectro da tensão no PAC encontra-se nas Fig. 7 e Fig. 8, respectivamente, para os filtros RLS e NNC.

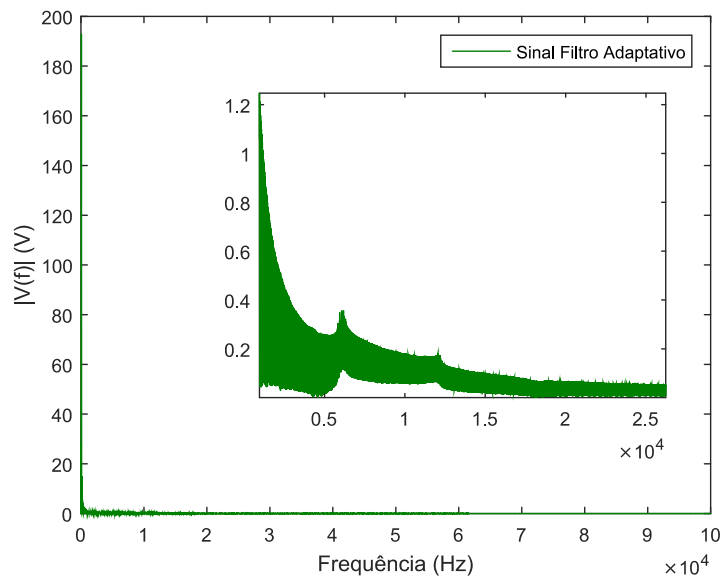


Figura 7 - Espectro da tensão de linha para o caso com filtro NNC.

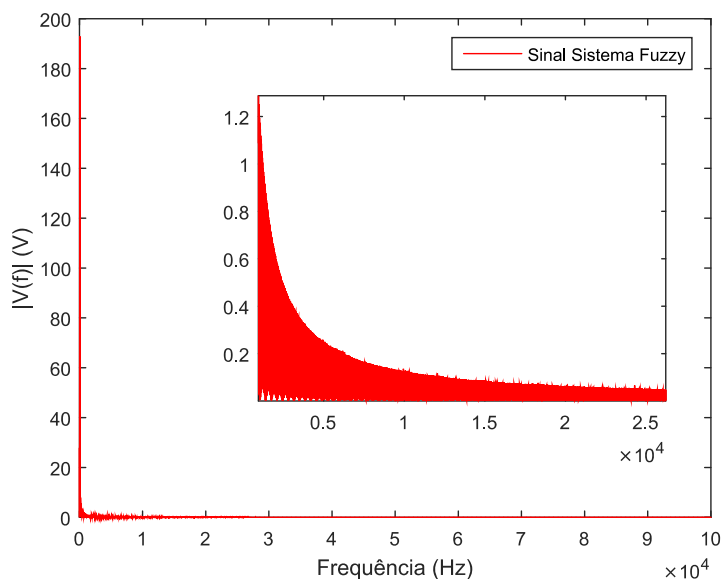


Figura 8 - Espectro da tensão de linha para o caso com filtro RLS.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma contribuição para a simulação de painéis fotovoltaicos por meio da proposta de um modelo de simulação baseado em uma modificação do equacionamento clássico desenvolvido em (Buresch, 1983). A modificação realizada consistiu na consideração do efeito, sobre a corrente fotogerada, surtido pelo aquecimento da célula em razão da temperatura ambiente. No modelo original, este efeito era desprezado. Verificou-se, por meio de simulações, que a proposta realizada efetivamente aumentou a precisão do modelo original.

Foram realizadas simulações de um sistema fotovoltaico conectado à rede operando em condições distintas de mitigação de harmônicos, isto é, via filtro LC e filtragem ativa com controlador *fuzzy*. Constatou-se que, na ocasião da implementação de um filtro *fuzzy*, é possível reduzir o conteúdo harmônico injetado na rede substancialmente. Para filtragem *fuzzy*, a DHT da tensão de linha no barramento local revelou-se duas ordens de grandeza menor do que aquela verificada com a utilização do filtro LC passivo.

REFERÊNCIAS

- Buresch, M., 1983. Photovoltaic Energy Systems: Design and Installation. McGraw-Hill.
- El-Sayed, M. M., El-Ela, A. A. A., El-Sehiemy, R. A., 2016. Effect of Photovoltaic System on Power Quality in Electrical Distribution Networks, Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON).
- Castilla, M., Miret, J., Camacho, A., Matas, J., Vicuña, L. G., 2013. Reduction of Current Harmonic Distortion in Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters via Resonant Current Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no 4.
- Das, S., Sadhu, P. K., Shrivastav, A. K., 2015. Synchronization and Harmonic Reduction of a Grid-Connected Photovoltaic Generation System. International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE).
- Moftah, M. A., El-Saady, G. Ibrahim, E. N. A., 2016. Active Power Filter for Power Quality Enhancement of Photovoltaic Renewable Energy Systems. Saudi Arabia Smart Grid (SASG).
- Adekol, O. I., Almaktoof, A. M., Raji, A. K., 2016. Design of a Smart Inverter System for Photovoltaic System Application. International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), pp 310-317.
- Isabella, O., Jager, K., Smets, A., Swaaij, R., Zeman, M., 2016. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. UIT Cambridge Ltd.
- MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules. 2017. Disponível em <<https://www.solarelectricsupply.com/media/custom/upload/Solarex-MSX64.pdf>>. Acessado em 11/2017.
- Franco, R. A. P., Vieira, F. H. T., Castro, M. S., 2016. Estimação de Parâmetros para Modelagem de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., 2003. Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons.
- Morales, D.S., 2010. Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications. Dissertação de Mestrado, Aalto University.
- Kuo, F.F., 1962. Network Analysis and Synthesis. John Wiley and Sons.
- Klir, G. J., Yuan B., 2008. Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications. Prentice-Hall Press, USA.
- Zadeh, L. A., 1965. Fuzzy Sets. Information and Control, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353.
- Wang, L. X., 1997. A course in fuzzy systems. Prentice-Hall Press, USA.

REDUCTION OF HARMONIC INJECTION BY PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN THE ENERGY NETWORK USING FUZZY ALGORITHM

Abstract. *In this work, it is proposed the computational implementation of a photovoltaic panel simulation model based on a modified version of a classical photovoltaic cell equations. The proposed modification includes the effect of temperature variation on photogenerated current and the modification increases the accuracy of the original model. A comparative analysis of the operation of a photovoltaic system is carried out considering three different situations: using passive filtering of the harmonic components by LC filter and filtering them using active filters, which operates on the power signals in their entries with the algorithms Fuzzy and Recursive Least Squares.*

Key words: *Distributed Generation, Harmonic Distortion, Photovoltaic Generation.*