

Modelo de Simulação de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede com Redução da Injeção de Harmônicos via Algoritmo *Fuzzy*

Henrique Pires*, Ricardo Augusto Pereira Franco[†], Flávio Henrique Teles Vieira[‡] and Marcelo Stehling de Castro[§]
 Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Universidade Federal de Goiás
 Email: *henriquepires19@hotmail.com, [†]ricardofranco3@gmail.com, [‡]flaviohtv@gmail.com, [§]marcelo.stehling@gmail.com

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 um filtro ativo, que opera sobre os sinais de potência em sua entrada com os algoritmos *Recursive Least Squares* e *Nearest Neighborhood Clustering*.

Palavras-chaves—Geração distribuída, Distorção Harmônica, Geração Fotovoltaica, Processamento via Lógica *Fuzzy*

I. 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 às quais encontram-se conectados. 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 à 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 à instalação de sistemas fotovoltaicos.

Neste trabalho, objetiva-se avaliar o impacto sobre a qualidade de energia em uma rede devido à 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 [1], 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 *RLS* (*Recursive Least Squares*). 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 recorrente na literatura. Por exemplo, [2] propõe a inserção de filtros passivos de sintonização simples na rede para mitigação dos harmônicos na rede. Em [3], 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 [4], uma configuração de sistemas fotovoltaicos que utiliza filtro harmônico de dupla-sintonização para a manutenção da qualidade de energia. Em [5], é proposto um filtro de potência *shunt* ativo para reduzir-se as distorções harmônicas geradas por circuito inversor e cargas não-lineares. O trabalho [6] analisa um filtro passa-baixas entre inversor e rede elétrica para a redução da distorção harmônica. O presente trabalho visa contribuir via análise comparativa do uso de filtragem passiva com filtro LC e por meio de filtros ativos *RLS* e de lógica *fuzzy*.

II. 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 [7]. O equacionamento deste circuito com essa aproximação leva à característica I-V dada por:

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

Os parâmetros utilizados em (1) são apresentados, assim como seus valores, na Tabela I. Parâmetros dependentes da

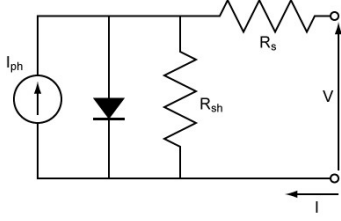


Fig. 1: Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

irradiância (S) e temperatura da célula (T) encontram-se expressos para a condição de referência *Standard Temperature Condition (STC)*, $T_o = 25^\circ C$ e $S_o = 1000 W/m^2$. Os valores utilizados referem-se à uma célula fotovoltaica do módulo *MSX-60*, tendo sido estimados segundo informações de *datasheet* [8] e o método dado em [9].

Tabela I: PARÂMETROS DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Parâmetro	Descrição	Valor Simulado
m	Fator de idealidade	1,5
V_t	Tensão térmica	26mV
I_o	Corrente reversa de saturação	$1,02 \cdot 10^{-6} A$
I_{ph}	Corrente fotogerada	3,8A
R_s	Resistência série	0,003Ω

Os parâmetros dependentes de T e S são I_{ph} , I_o e V_t . Logo, a variação de temperatura da célula e irradiância promovem alterações na característica I-V. Em [1], é proposto um método de modificação da característica, em função de T e S , por meio de fatores corretivos. Em outras palavras, os parâmetros da Tabela 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 (2) e (3), em que $V^*(T_o, S_o) = V(T_o, S_o, I_{ph}(T, S))$:

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

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

Os fatores corretivos de (2) e (3) têm seus valores, extraídos do *datasheet* do módulo *MSX-60*, relacionados na Tabela II. 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 de (4):

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

Entretanto, em [1], 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 à ambiente. Vê-se que o efeito deste aquecimento é desconsiderado em (2). Ademais, sendo o aquecimento $\Delta T = \alpha_S(S - S_o)$, surge, em (3), o termo espúrio $\beta_T^2(T - T_o)\Delta T$.

Este trabalho propõe, para que tais imprecisões sejam evitadas, que T seja considerado como a temperatura da célula. Esta temperatura pode ser facilmente deduzida da temperatura ambiente T_a por meio do coeficiente α_S , pois

$T = T_a + \Delta T = T_a + \alpha_S(S - S_o)$. Logo, tendo o aquecimento sido contabilizado previamente, faz-se $\alpha_S = 0$ em (3). A Fig. 2 ilustra a implementação computacional, via *Simulink*, de (1) a (4), considerando-se a correção proposta ao modelo.

Tabela II: COEFICIENTES DE TEMPERATURA

Parâmetro	Descrição	Valor Simulado
α_S	Coeficiente de aquecimento	$0,13^{\circ}C \cdot m^2/W$
β_T	Coeficiente de temperatura de V_{oc}	$-0,38\%/^{\circ}C$
γ_T	Coeficiente de temperatura de I_{sc}	$0,065\%/^{\circ}C$

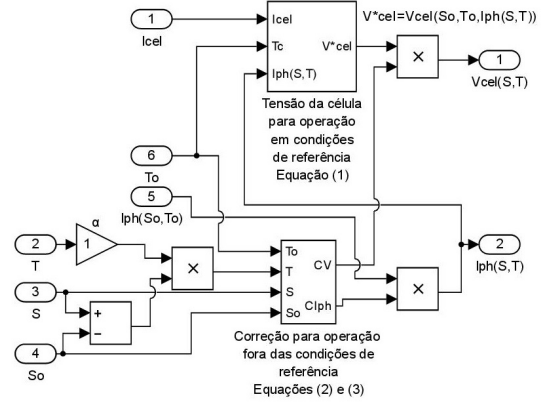


Fig. 2: Implementação da célula fotovoltaica.

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 (1) a (3). A implementação do painel fotovoltaico, realizada via *Simulink*, encontra-se na Fig. 3.

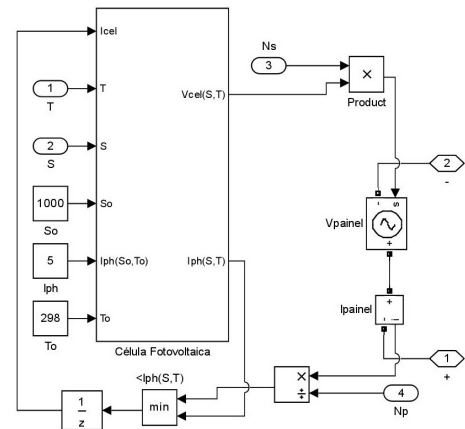


Fig. 3: Implementação do painel fotovoltaico.

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

De posse do modelo proposto para o painel fotovoltaico, este foi utilizado conjuntamente à 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 *MSX-60*, $T = 47^\circ\text{C}$ e $S = 800\text{W/m}^2$. Para essas condições, calcula-se, com auxílio de (1) a (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 $P_{mp,painel} \approx 37,4\text{kW}$.

Supõe-se que o sistema seja instalado no barramento de uma carga residencial de valor nominal 25kVA , 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.

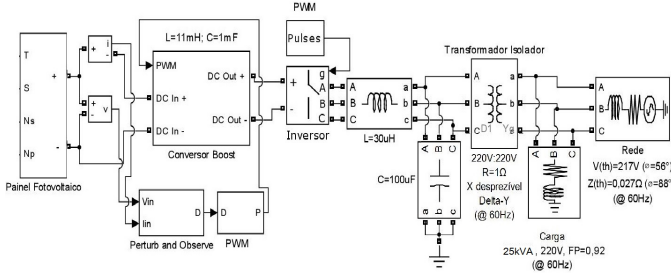


Fig. 4: Esquema do sistema simulado.

A. 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 $M(D)$ [10].

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 $\Delta D = \pm 0,1\%$ [11].

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

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

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

B. 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 [10].

Como a saída do inversor é conectada em paralelo à 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 [10], para um inversor trifásico controlado via *PWM* e operando com modulação em amplitude $0 < m_a < 1$, a tensão suprida é dada por (7):

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

em que V_d é a tensão de saída do conversor *boost* e V_{cc} é a tensão suprida pelo painel fotovoltaico. Para operação na *NOTC*, $V_{cc} \approx 180\text{V}$. 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 $|Z_{in}| = M^2(D) \cdot \frac{V_{mp,painel}}{I_{mp,painel}}$, obtém-se $D \approx 0,65$. Considerando-se que $V_{cc} \approx 180\text{V}$, obtém-se, via (8), a tensão de saída $V_{LL,1}^{inv} \approx 313,9\text{V}$.

C. 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* $f_o = 3,0\text{kHz}$. Ademais, 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 as seguintes equações para um filtro RLC passa-baixas [12]:

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

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

Utilizou-se (8) para o projeto de um filtro LC com a especificação de f_o dada e, via (9), verifica-se $\zeta = 0,273$, o

que indica um pico de ressonância com magnitude $\approx 1,9dB$ na frequência de *cut-off*. Os valores dos elementos do filtro LC obtidos encontram-se Fig. 4.

IV. 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 [15]. Na subseção IV-A, descreve-se o modelo *NNC* utilizado.

A. 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 [13]. O objetivo da lógica *fuzzy* é gerar saídas lógicas a partir de um conjunto de entradas imprecisas e ruidosas [9; 10].

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, $|f(x_0^l) - y_0^l| < \epsilon$ [15]. Logo, o sistema implementado neste trabalho é representado por (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 por (10) podem ser encontrados utilizando técnicas de *clustering*. Tais técnicas classificam um conjunto de dados em subconjuntos (*clusters*) de acordo com suas propriedades [15].

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 [15]:

- 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 $x_c^{M+1} = x_0^k$. Ademais, realizam-se as atribuições $A^{M+1}(k) = y_0^k$, $B^{M+1}(k) = l$ 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 $B^l(k) = B^l(k-1)$. Ademais, fazem-se as atribuições:

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

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

- 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 por (13):

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

Por outro lado, se x_0^k é considerado um novo *cluster*, então o sistema é definido por (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 por (13) será idêntico ao sistema *fuzzy* ótimo (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 . Neste trabalho, adotou-se $r = 0,3$, dados os resultados satisfatórios obtidos com esta especificação em [15].

B. 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 por (14) [15]:

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

Em (14), $f_k[y(k), y(k-1)]$ é o sistema *fuzzy*, representado por (10) e (13), e $r(k)$ é o sinal de referência. O comportamento do sistema *fuzzy* é definido por (15):

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

Em (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 por (16):

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

Em (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 em III-B, obtém-se $D = 0,59$ e $V_{LL,1}^{inv} \approx 268,7\text{V}$. Ademais, para o mesmo conversor *boost*, obtém-se, via (5) e (6), $\Delta I_L \approx 0,9\text{A}$ e $\Delta V_{out} \approx 5,0\text{V}$.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A. 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 Tabela III 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 III: Parâmetros da Característica I-V (*NOTC*)

Parâmetro	Teórico	Simulado	Simulado (original)
V_{oc}	0,5265V	0,5265V	0,5173V
V_{mp}	0,4352V	0,4274V	0,4202V
I_{mp}	2,8400A	2,8441A	2,8025A
P_{mp}	1,2286W	1,2168W	1,1788W

B. Filtro LC

O sistema fotovoltaico projetado na Seção III foi simulado com auxílio do modelo proposto. Na Tabela IV, 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 IV: PARÂMETROS AFERIDOS - FILTRO LC

Parâmetro	Teórico	Simulado
ΔI_L	1,1A	0,8A
ΔV_o	5,0V	7,0V
D	0,65	0,67
$V_{LL,1}^{inv}$	313,9V	297,0V
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.

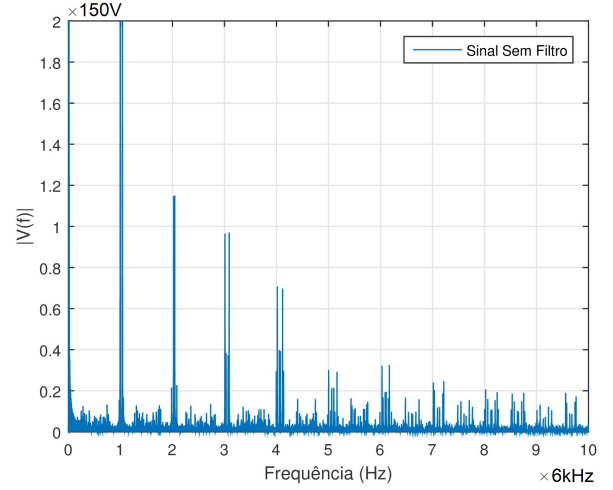


Fig. 5: Espectro da tensão de linha - Sem filtros.

Deve-se notar que as equações utilizadas para o projeto do conversor *boost* são derivadas de suposições de operação ideal do conversor (e.g. ausência de impedância interna na fonte DC) [10]. Isto justifica o desvio existente entre valores projetados e simulados de *ripple* e tensão de saída do inversor.

A literatura sugere [10] 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.

C. Filtragem com Sistema Fuzzy

Aplicou-se o algoritmo *fuzzy* descrito na seção IV 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 Tabela V, 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 e simulados de *ripple* e tensão de linha deve-se à condição de idealidade da fonte DC não ser satisfeita.

Tabela V: PARÂMETROS AFERIDOS - FILTRO ATIVO

Parâmetro	Teórico	Simulado
ΔI_L	0,9A	0,7A
ΔV_o	5,0V	6,0V
D	0,59	0,58
$V_{LL,1}^{inv}$	267,9V	234,7V
THD_V	—	0,035%(<i>NNC</i>)/0,047%(<i>RLS</i>)

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 *DHT*; de fato, a forma de onda da

tensão de linha revelou-se muito próxima de uma senoide, para operação com os filtros *fuzzy*.

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 $y_{ref}(t)$, atenuando os harmônicos de ordem menor ou próxima a f_o . O espectro da tensão no *PAC* encontra-se nas Figs. 6 e 7, respectivamente, para os filtros *RLS* e *NNC*.

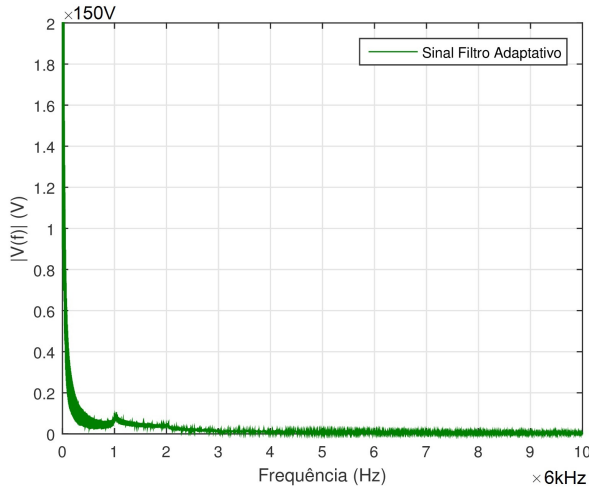


Fig. 6: Espectro da tensão de linha - Filtro *NNC*.

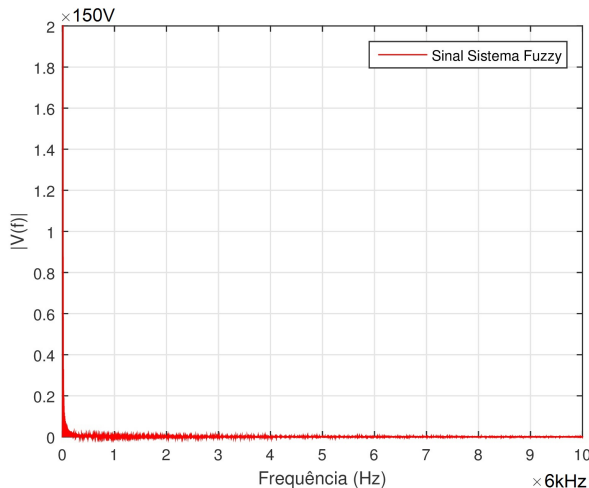


Fig. 7: Espectro da tensão de linha - Filtro *RLS*.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma contribuição à simulação de painéis fotovoltaicos por meio da proposta de um modelo de simulação baseado em uma modificação do equacionamento clássico desenvolvido em [1]. A modificação realizada consistiu na consideração do efeito, sobre a corrente fotogerada, surtido pelo aquecimento da célula com relação à 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 com relação ao obtido com a solução via filtro LC.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Buresch, M. "Photovoltaic Energy Systems: Design and Installation", McGraw-Hill, 1983.
- [2] El-Sayed, M. M., El-Ela, A. A. A., El-Sehiemy, R. A., "Effect of Photovoltaic System on Power Quality in Electrical Distribution Networks", *Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2016.
- [3] Castilla, M., Miret, J., Camacho, A., Matas, J., Vicuña, L. G., "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, 2013.
- [4] Das, S., Sadhu, P. K., Shrivastav, A. K., "Synchronization and Harmonic Reduction of a Grid-Connected Photovoltaic Generation System", *International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*, 2015.
- [5] Moftah, M. A., El-Saady, G. Ibrahim, E. N. A., "Active Power Filter for Power Quality Enhancement of Photovoltaic Renewable Energy Systems", *Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, 2016.
- [6] Adekol, O. I., Almaktoof, A. M., Raji, A. K., "Design of a Smart Inverter System for Photovoltaic System Application", *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE)*, pp 310-317, 2016.
- [7] Isabella, O., Jager, K., Smets, A., Swaaij, R., Zeman, M., "Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems", *UIT Cambridge Ltd*, 2016.
- [8] "MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules", Disponível em <<https://www.solarelectricsupply.com/media/>>, último acesso em 03/2017.
- [9] Franco, R. A. P., Vieira, F. H. T., Castro, M. S., "Estimação de Parâmetros para Modelagem de Painéis Fotovoltaicos Utilizando Algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado", *VI Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2016.
- [10] Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W.P., "Power Electronics: Converters, Applications and Design", *John Wiley and Sons*, 2003.
- [11] Moralez, D.S., "Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications", *Tese de mestrado, Aalto University*.
- [12] Kuo, F.F., "Network Analysis and Synthesis". *John Wiley and Sons*, 1962.
- [13] Klir, G. J., Yuan B., "Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications", *Prentice-Hall Press*, 2008.
- [14] Zadeh, L. A., "Fuzzy Sets". *Information and Control*, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353, 1965.
- [15] Wang, L. X., "A course in fuzzy systems". *Prentice-Hall Press*, 1997.