



ANÁLISE DE IMPACTO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA USINA FOTOVOLTAICA INSTALADA NA CIDADE DE UBERLÂNDIA

Luciana Rodrigues Santos*¹, Ivan Nunes Santos¹, Arthur Costa Souza¹, Celso Rosa de Azevedo Júnior¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Resumo – O objetivo central deste trabalho é realizar uma análise do impacto da conexão de uma usina fotovoltaica em um ambiente comercial na cidade de Uberlândia, considerando para tanto as parametrizações necessárias à implementação computacional dos modelos elétricos de tal arranjo de geração solar em *software* apropriado.

Palavras-Chave – Geração Distribuída, Planta Fotovoltaica, Qualidade de Energia, Redes Elétrica Inteligentes.

IMPACT ANALYSIS AND COMPUTER MODELING OF A PHOTOVOLTAIC PLANT INSTALLED IN THE CITY OF UBERLÂNDIA

Abstract – The main purpose of this work is to make a connection impact analysis of a photovoltaic plant in a commercial environment in the city of Uberlândia, considering therefore the parameterization necessary for computational implementation of electric models of such solar generation arrangement in an appropriate software.

Keywords - Distributed Generation, Photovoltaic Plant, Power Quality, Smart Grid.

I. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, é grande a preocupação da sociedade e também dos governantes por questões relacionadas à sustentabilidade ambiental da geração e uso de energias em geral. Isto ocorre em detrimento à utilização de energias não renováveis, tais como petróleo e derivados, carvão e outros. Tal preocupação está alinhada com a necessidade de redução dos gases que contribuem para o efeito estufa, bem como, com uma maior independência de combustíveis não renováveis. Dentre as alternativas, atualmente encontradas, destacam-se: geração hídrica, geração eólica e geração solar de energia elétrica. No tocante ao Brasil, a geração hídrica, a qual representa mais de 70% da matriz energética nacional [1], tem nos últimos anos encontrado problemas para sua ampliação e mesmo relacionados ao seu desempenho, sendo este último

devido à constantes crises hídricas, enquanto o primeiro (ampliação de novas usinas) tem esbarrado em questões de ordem ambiental.

Neste contexto, as fontes solares e eólicas têm ganhado crescente importância no cenário energético brasileiro [2]. Os parques eólicos têm se expandido por meio de conexões na rede básica [3], enquanto a geração fotovoltaica de energia tem se ampliado por meio da chamada geração distribuída [4], a qual se baseia na geração de energia nas plantas elétricas dos consumidores, eliminando-se assim a necessidade de transmissão da mesma. Tal procedimento de geração distribuída está vinculado com as políticas de uso racional da energia elétrica. Adicionalmente, no que diz respeito à geração fotovoltaica, vale ressaltar que o sol é uma das fontes mais ricas e inesgotáveis de energia.

Assim sendo, no presente trabalho, pretende-se focar na geração distribuída de energia fotovoltaica. Para tanto, será empregado um detalhamento da estratégia principal de geração fotovoltaica seguida de uma adequada modelagem elétrica das distintas etapas correlatas à esta tecnologia. Tal modelagem terá seu desempenho verificado por meio de um estudo de caso em uma planta urbana de geração solar. Este estudo de caso será realizado na cidade de Uberlândia, em uma planta comercial de geração distribuída que se encontra conectada à rede elétrica de distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

II. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO COMERCIAL ANALISADO

A planta comercial selecionada possui um total de 292 painéis fotovoltaicos conectados à rede local da CEMIG, para tanto, utilizou-se 16 inversores, dispostos em sete arranjos diferentes, os quais, por sua vez, possuem sub-agrupamentos. O texto a seguir caracteriza e expõe, de forma geral, as condições físicas e topológicas do sistema a ser estudado.

A. Instalação física dos painéis

No tocante a topologia da usina fotovoltaica que permeia o cerne de análises deste trabalho, tem-se que a instalação ocupa aproximadamente 462,4m² do telhado de um comércio, localizado na cidade de Uberlândia, estado de Minas Gerais, tal área está coberta pelos módulos fotovoltaicos que estão distribuídos em 27 fileiras, compondo 7 arranjos. A Figura 1,

Arthur_costasouza@hotmail.com*

corresponde a vista superior do comércio no qual estão dispostos os painéis fotovoltaicos.

No que se refere as placas instaladas, estas totalizam 292 unidades, modelo *Sun-Earth TPB156x156-60-P* [5] de 235 watt pico (Wp) de potência, afim de garantir a irradiância máxima possível nas mesmas, impôs-se uma inclinação de 9° a 11° na estrutura dos módulos e desvio azimutal ora 72° a nordeste e ora 108° a sudoeste, de acordo com o lado do telhado.

Figura 1: Imagem aérea da instalação com a indicação dos arranjos.



Nesse sistema são utilizados três tipos de inversores diferentes, de um mesmo fabricante, porém de cargas diferentes. Os equipamentos possuem potência nominal de 2,9 kW, 3,8 kW e de 4,4 kW - modelos *Theia He-t 2.0*, *Theia He-t 3.8*, *Theia He-t 4.4* da *Eltek* [6], respectivamente. Cada arranjo abrange uma certa quantidade de inversores próprios para a quantidade de placas instaladas e a potência gerada por elas.

Cabe aqui ressaltar, que para as análises e estudos que seguem, utilizar-se-á o arranjo 7, apontado na Figura 2, este será computacionalmente implementado e caracterizados nas seções seguintes.

B. Arranjo de geração fotovoltaica selecionado

Neste trabalho foi selecionado para análise e estudo de impacto o arranjo de número 7, foco das investigações e avaliações devido ao tamanho do sistema e a dificuldade em se simular toda a instalação. Vale ressaltar que, como todos os arranjos possuem uma certa proporcionalidade de parâmetros devido a compatibilidade dos equipamentos utilizados, as considerações feitas para esse arranjo podem ser aplicadas aos demais, respeitando-se, evidentemente, suas particularidades.

O arranjo em questão possui 22 painéis fotovoltaicos divididos em duas fileiras de 11 unidades cada, conectadas em paralelo, sendo os painéis de cada fila (*string*) conectados em série, sendo as placas fotovoltaicas do sistema modelo *Sun-Earth TPB156x156-60-P* de 235 Wp.

Vale ressaltar, em consonância com [5], que tal arranjo em condições excelentes de operação (irradiância 1000 W/m^2 e temperatura 25°C), produz na saída uma tensão de 321,2 V, potência de 5170 Wp e corrente de 16,1 A. A corrente do painel é diretamente proporcional à irradiância do sol, sendo assim, esses valores são dependentes das condições climáticas e de sombreamento nas placas. Quando ocorre uma redução luminosa incidente nos painéis solares, a corrente de curto-

circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) diminuem, alterando os valores de tensão e corrente fornecidos à rede.

Por fim, tem-se um inversor instalado do modelo *Theia He-t 4.4* da *Eltek* de 4,4 kW de potência de saída, maiores informações e demais características são expostas em [6].

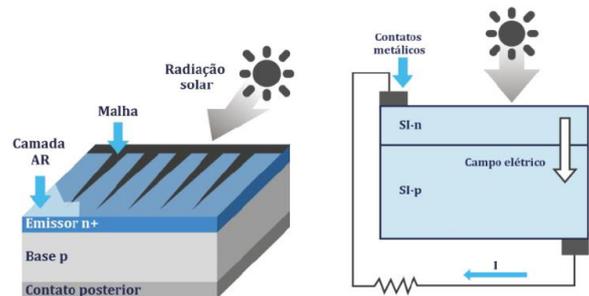
III. MODELAGEM MATEMÁTICA DA INSTALAÇÃO COMERCIAL SELECIONADA

A fim de contextualizar a temática elencada e sua filosofia de funcionamento, os tópicos seguintes pormenorizam seus principais aspectos físicos e matemáticos.

A. Modelagem do painel fotovoltaico

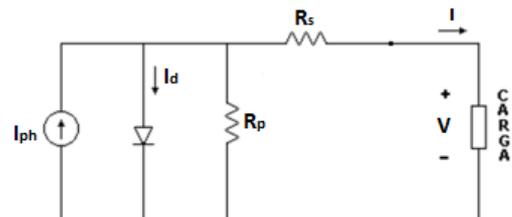
Os modelos teóricos das células solares são derivados da teoria física do estado sólido. Em consonância com a temática elencada, a célula solar é um dispositivo que transforma a energia emitida pela luz solar, diretamente, em energia elétrica. Ela é formada por um diodo semicondutor de junção p-n exposta à luz. Os filmes de silício (Si) destas células são dopados com fósforo e boro, afim de se obter carga negativa (tipo *n*) e carga positiva (tipo *p*), respectivamente, e são montadas sobre uma superfície metálica, conforme mostrado na Figura 2. A parte superior da junção semicondutora p-n é conectada a uma fina grade de contatos metálicos por onde incide a radiação solar.

Figura 2 – Estrutura física simplificada de uma célula solar fotovoltaica.



O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é exemplificado na Figura 3, esta denota uma fonte de corrente de magnitude I_{ph} , equivalente a intensidade de radiação solar (irradiância) e temperatura ambiente, além da corrente I_d do diodo diretamente polarizado que flui internamente na junção p-n do semicondutor em uma determinada temperatura absoluta T , e a tensão nos terminais, V .

Figura 3: Modelo real da célula solar.



Vale ainda ressaltar que a resistência R_p em paralelo com o diodo representa as perdas por correntes de fuga que ocorrem nas extremidades da célula solar, enquanto a

resistência série R_s , na saída, caracteriza as quedas de tensão na condução de carga entre o material semiconductor e o contato externo. Desta forma, os equacionamentos matemáticos, conforme [7], são descritos e contextualizados nas no conteúdo que segue. No que concerne a expressão (1), está representa a característica de uma célula solar real, em consonância com o circuito equivalente da Figura 3, anteriormente tratado.

$$I = I_{ph} - I_R \left[e^{\frac{qV}{nVT}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

Com relação à corrente gerada pela célula (I_{FV}), conforme denota a equação (2), está dá-se em função da temperatura e irradiância incidente na unidade celular. Uma aproximação para esta corrente I_{FV} gerada, considerando a dependência linear entre essa célula, pode ser dada, então por:

$$I_{FV} = (I_{FV,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (2)$$

Em que: G e G_n são as irradiâncias solares em W/m^2 na superfície da célula e o valor nominal da mesma, respectivamente; $\Delta T = (T - T_n)$ é a variação de temperatura em Kelvin, sendo T e T_n as temperaturas atual e nominal, respectivamente; K_I é o coeficiente de temperatura em A/K da corrente de curto circuito e $I_{FV,n}$ é a corrente em ampères gerada pela incidência de luz sobre a célula fotovoltaica nas condições nominais ($T_n = 25^\circ C$ e $G_n = 1000 W/m^2$).

Em relação as associações série e/ou paralelo de várias células fotovoltaicas, forma-se os chamados painéis fotovoltaicos. Estas disposições têm o objetivo de se obter sistemas com correntes e tensões mais elevadas, e são denominados de arranjos fotovoltaicos. Para um arranjo formado por N_s células em série e N_p células em paralelo, pode-se reescrever a relação dada na equação (3) conforme expressão que se segue.

$$I = I_{pv,a} - I_{R,a} \left[e^{\frac{V + I R_{s,a}}{nVT,a}} - 1 \right] - \frac{V + R_{s,a} I}{R_{p,a}} \quad (3)$$

Sendo que: $V_{T,a} = N_s K T / q$ é a tensão térmica do arranjo em Volts devido a conexão de N_s células em série; $I_{pv,a} = N_p I_{ph}$ e $I_{R,a} = N_p I_R$ são as correntes das N_p células em paralelo e reversa do arranjo fotovoltaico em A, respectivamente; $R_{s,a}$ e $R_{p,a}$ são as resistências equivalentes série e paralelo do arranjo em Ω , respectivamente. O sub-índice (a) é usado na equação (3) para diferenciá-la da Equação (1), por se referir ao arranjo fotovoltaico.

Portanto, a equações que tipifica a corrente gerada por um conjunto de células fotovoltaicas, para este arranjo fotovoltaico, caracteriza-se da seguinte forma:

$$I_{FV,a} = (I_{FV,an} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

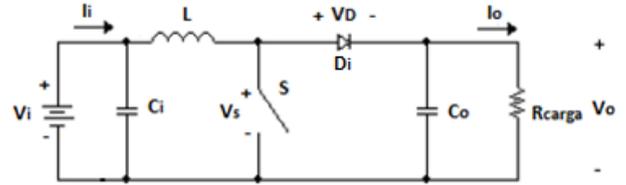
Equivalentemente $I_{FV,an}$ à corrente nominal do arranjo fotovoltaico nas condições nominais.

B. Modelagem do conversor boost

O conversor *boost* apresentado neste tem a característica de ser um conversor elevador de tensão, que consiste no chaveamento da tensão vinda de uma fonte de energia em série

num circuito com uma reatância que armazena energia [8]. A tensão de saída será a energia vinda da fonte mais a energia armazenada na reatância. A relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é definida por ganho estático (D), ou em regime permanente, do conversor. A Figura 4, a seguir, denota o circuito equivalente do conversor modelado.

Figura 4: Circuito equivalente do Conversor Boost.



O conversor *boost* foi projetado para as condições de saída da tensão do arranjo fotovoltaico. Para cálculo dos componentes do conversor é necessário levar em consideração o modo de condução contínua dos componentes. A tensão de saída do *boost* é a tensão de entrada do inversor e será considerado um valor de 500V para a mesma, que é um valor próximo ao máximo do inversor instalado e acima da soma das tensões dos painéis ligados a ele que é de 321,2 V. A potência de entrada do conversor também será aquela vinda dos 22 painéis que equivale a 5170 W.

Com os valores de tensão e potência de entrada e saída do conversor é possível se calcular o tempo de chaveamento da chave, levando em conta que a frequência de chaveamento adotada será de 20 kHz, a razão cíclica de ganho estático e a reatância indutiva que será colocada em série com a fonte. A indutância é calculada de acordo com a equação (5).

$$L_{boost} = \frac{V_{mp} \cdot D}{f_{chaveamento} \cdot \Delta I} \quad (5)$$

onde ΔI é valor de ondulação da corrente (*ripple*) que é expressa por $I_i = \frac{P_{entrada}}{V_{máx}}$. O *ripple* considerado aqui será de 50% da corrente I_i . Os valores de potência e tensão admitidos aqui são aqueles de saída dos painéis, já citados, levando a um valor de ondulação de corrente de 8,04 A e de indutância de 713,6 μH .

A reatância capacitiva é dividida em duas, sendo uma de entrada (C_i) não muito convencionalmente usada, mas empregada afim de diminuir os *ripples* de tensão na entrada do conversor; e uma de saída (C_o) que também pode ser considerada como reatância capacitiva de entrada do inversor. O capacitor de entrada é dependente da corrente de entrada, da razão cíclica e frequência de chaveamento de acordo com a equação (6) e para esse modelo encontrou-se o valor de 90 μF .

$$C_{i,min} \geq \frac{I_i \cdot D}{f_s \cdot 0,01 \cdot V_i} \quad (6)$$

Já o capacitor de saída depende do fator de modulação da tensão ($M = \frac{V_{ca,pico}}{V_o}$), da tensão de pico, do rendimento do conversor, da frequência da rede, entre outros fatores como o descrito na equação (7).

$$C_o = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \cdot M}{V_{ca.pico}} - \frac{1}{\eta \cdot V_o} \right) P_{saída}}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta V_{cc}} \quad (7)$$

Levando em consideração os valores admitidos para esse trabalho, foi encontrado para esses capacitores o valor de 930 μ F. Porém na simulação escolheu-se usar os valores de capacitores típicos encontrados no mercado sendo 100 μ F para o capacitor de entrada e 1000 μ F para o capacitor de saída.

O conversor *boost* ainda conta com um meio de otimização de desempenho da conversão de energia utilizando um controle de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) através do rastreador. Esse controle conta com o método perturba e observa (P&O) [8], que é uma técnica de estrutura simples, com poucos parâmetros a ser medidos e de fácil implementação. Tal método atua com perturbações periódicas na tensão de saída dos módulos, incrementando ou decrementando, e compara a potência de saída do sistema com a do ciclo de perturbação anterior (P_{atual} com $P_{anterior}$).

Assim sendo, o controle do MPPT foi realizado a partir do sensoramento da tensão e da corrente dos painéis fotovoltaicos juntamente com um conversor CC-CC *boost*. O conversor irá apenas controlar a tensão de saída do arranjo fotovoltaico e, em consequência, fará com que o arranjo opere no ponto de máxima potência. O algoritmo P&O foi configurado para operar com perturbações de 0,5 V e -0,5 V e o valor inicial para a tensão de referência é igual a 335,5 V, valor este um pouco superior ao equivalente da tensão vinda dos módulos fotovoltaicos (321,7 V). Essa diferença é devida ao resultado da tensão de operação de um único módulo solar apresentar um valor superior em relação ao valor posto pelo *datasheet*.

Para finalizar com o sistema Placa-Boost, foi preciso escolher um método a partir do qual o conversor *boost* será chaveado. Foi escolhido a modulação por PWM [9] (*Pulse-Width Modulation*) por ser um procedimento mais usual. Considera-se que os pulsos de comando da chave são gerados com frequência de chaveamento fixa. Tem-se assim a modulação por largura de pulso. O fator que determina o *duty cycle* é variação da amplitude do sinal de referência, onde variando-se a largura do pulso, é possível controlar a corrente que chega na carga e, portanto, a potência média aplicada a esta carga.

C. Modelagem do inversor de conexão à rede de distribuição

Como já dito anteriormente, a geração distribuída fotovoltaica necessita em seu sistema conversores CC-CA [9], para que seja possível a sua conexão à rede elétrica. Para este trabalho foi utilizado um inversor monofásico *full-bridge*, em função da menor complexidade em implementá-lo se comparado com o controle do inversor trifásico. Nesse tipo de sistema é predominante os problemas de sincronização com a rede. Sendo assim, para evitar esse tipo de problema e para atingir um fator de potência mais elevado na ligação à rede, o PLL (*Phase-Locked Loop*) foi utilizado. De um modo geral, sua função é sincronizar a corrente gerada pelo arranjo fotovoltaico com a tensão da rede em que ele é ligado.

A estratégia aplicada ao PLL desse modelo, é bem simples: a partir da leitura de tensão nos terminais da rede elétrica, tem-se como saída a frequência e a velocidade angular

multiplicada pelo tempo (w.t) do sinal lido. Em seguida, multiplica-se a frequência por 2π , obtendo-se a velocidade angular (w). Baseando-se nessas manipulações, dividimos o valor de w.t gerado pelo PLL por w, obtendo o tempo (t) que será aplicado na função seno, finalizando a malha de captura de fase.

O conversor CC-CA aqui utilizado é classificado conforme o tipo de alimentação CC existente na sua entrada, como sendo um do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*) [8] [9], o qual utiliza um filtro capacitivo no elo CC e indutor de acoplamento à rede. A composição do inversor envolve dois elementos: o elo CC e as chaves. O primeiro aborda um filtro capacitivo, com o objetivo de manter a tensão CC constante e com ondulação reduzida, enquanto o segundo elemento consiste em uma ponte composta por quatro chaves semicondutoras controladas. De acordo com a frequência de chaveamento, a tensão CA é variada em amplitude e frequência.

O controle da unidade inversora acontece por etapas. Primeiro tem-se o controle da tensão no elo CC, que é responsável por manter a tensão nesse ponto constante mediante as perturbações da rede e determinar a amplitude da corrente injetada pelo conversor. Posteriormente temos o controle das correntes injetadas na rede, onde se fornece a referência de corrente para o modulador de pulsos do inversor, sendo assim responsável pela corrente injetada na rede elétrica. Por fim tem-se a sincronização com a rede que é realizada pelo sincronismo da corrente injetada com a tensão da rede. O inversor conectado à rede elétrica terá controle de corrente no indutor de acoplamento, já que a tensão no barramento da rede tem amplitude e frequência pré-estabelecidas. Dessa maneira, efetua-se o controle de potência injetada através do controle de corrente. Em relação ao elemento de acoplamento do sistema fotovoltaico à rede, foi utilizado um filtro de terceira ordem (filtro LCL).

Para esse conversor, foi-se necessário a utilização de modulação PWM senoidal bipolar, pelo fato dos inversores carecerem de controle ou regulação da tensão nos terminais da carga. Este tipo de controle parte do princípio da comparação entre uma onda moduladora senoidal (de baixa frequência) de referência com uma portadora triangular (de alta frequência), permitindo a comutação das chaves de alta frequência. Na modulação PWM senoidal bipolar a tensão de saída pode apresentar dois tipos de respostas, são elas: $+V_{cc}$ ou $-V_{cc}$ e, diante dessas condições, esta modulação é também chamada de modulação de dois níveis. Os sinais de saída dessa modulação são então enviados para os MOSFETs do inversor, os quais, a partir desses sinais de entrada, definem a amplitude e frequência da onda senoidal a ser gerada no barramento ao qual o inversor está conectado.

IV. MEDIÇÕES EM CAMPO NA INSTALAÇÃO COMERCIAL SELECIONADA

As medições foram realizadas no ambiente comercial onde se encontra a planta fotovoltaica selecionada para o presente estudo. Procurou-se realizar o mesmo em um horário em que o sistema pudesse estar em uma condição de operação próxima ao seu valor máximo, afim de se obter os resultados em geração máxima do arranjo. Para se obter todos os dados para a análise do funcionamento da simulação computacional

implementada, assim como dos impactos da planta na rede, fez-se necessário a medição dos parâmetros de saída do inversor e das condições de operação em que os painéis se encontravam naquele momento, de forma simultânea.

Um equipamento de qualidade da energia elétrica (RMS-RMS Sistemas Eletrônicos – Figura 5), capaz de medir as grandezas necessárias ao estudo, foi instalado no quadro de distribuição onde o inversor a ser estudado estava ligado, medindo as tensões fase-neutro e correntes de linha. Apesar da rede em que o sistema encontra-se conectado ser trifásica, os inversores em questão são monofásicos, havendo apenas a necessidade de se medir duas fases denominadas A e B. Conforme já esperado, os módulos se encontravam em condições de operação próximas à máxima. A Tabela I mostra os valores de irradiância e de temperatura obtidos no presente estudo via utilização de solarímetro da marca HT, modelo Solar-02 – Figura 7.

Deste modo foi possível obter os valores de tensão e corrente, e as distorções harmônicas de tensão (DHT%) e distorção harmônica de corrente (DHI%). Pontua-se que o valor medido de tensão na fase A é de 125,78V e na fase B de 123,7V. Os componentes harmônicos de tensão e corrente mensurados são expostos na Tabela II, bem como, as respectivas distorções harmônicas totais (DHT% e DHI%)

TABELA I. PARÂMETROS AMBIENTAIS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES

Parâmetros	Valores
Irradiância	815 W/m ²
Temperatura Ambiente	37,32°C
Temperatura no Pannel	38,88°C

TABELA II. DISTORÇÃO HARMÔNICA DE CORRENTE E TENSÃO MEDIDA

Ordem Harmônica	Corrente A (%)	Corrente B (%)	Tensão A (%)	Tensão B (%)
0	0,259	0,239	0,819	0,549
1	100	100	100	100
2	1,231	1,119	0,084	0,153
3	2,129	3,49	0,363	0,875
4	0,417	1,541	0,171	0,13
5	1,425	1,788	1,116	1,177
6	1,875	1,8	0,146	0,108
7	1,559	1,909	0,854	0,858
8	5,838	6,264	0,178	0,125
9	7,941	8,331	0,095	0,329
10	10,199	9,403	0,248	0,142
11	2,680	3,717	1,247	1,055
12	12,340	11,406	0,197	0,222
13	5,369	3,958	0,306	0,375
14	3,622	2,469	0,195	0,117
15	1,444	2,347	0,086	0,169
16	0,866	1,319	0,149	0,126
17	2,330	0,965	0,264	0,091
18	1,299	0,269	0,054	0,196
19	0,845	1,402	0,408	0,171
20	1,058	1,112	0,284	0,127
21	0,912	1,172	0,157	0,155
22	0,233	0,544	0,186	0,059
23	1,419	0,323	0,256	0,232
24	1,154	0,817	0,085	0,119
25	0,660	0,836	0,126	0,233
26	0,519	0,587	0,035	0,259
27	1,204	0,469	0,17	0,02
28	0,656	0,427	0,139	0,139
29	0,619	0,604	0,072	0,064
30	1,076	0,713	0,082	0,092
31	0,814	0,133	0,077	0,176
DHT	20,918	20,121	2,134	2,194

Com o intuito de uma posterior análise comparativa entre valores encontrados em medição e aqueles simulados no modelo computacional implementado, tem-se na Tabela III a seguir, as correntes harmônicas na saída do arranjo fotovoltaico, contudo agrupados em grupos de harmônicos pares, ímpares múltiplos de 3 e ímpares não múltiplos de 3.

TABELA III. DISTORÇÕES AGRUPADAS DE CORRENTE (DHI%)

Componentes	Corrente A (%)	Corrente B (%)
Pares	17,76	16,60
Ímpares múltiplos de 3	8,48	9,42
Ímpares não múltiplos de 3	7,07	6,35

Figura 5: Quadro geral arranjo 7, medidor RMS e Solarímetro em medição em campo.



Observando essas grandezas, pode-se perceber que as componentes pares realmente são as de maior influência no valor resultante das DHIs. Quando comparados esses números com os das outras medidas, vemos que o valor de todas se encontra por volta do 17% assim como nesse exemplo. Essa situação faz parte de uma característica particular do inversor em questão e será analisada mais à frente.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SISTEMA COMERCIAL IMPLEMENTADO NO MATLAB

Uma vez inseridas as informações do painel fotovoltaico utilizado e as condições ambientais no momento das medições (Tabela I), torna-se possível analisar os parâmetros e variáveis de interesse da modelagem computacional perante as medições em campo realizadas no sistema real.

No que se refere a análise de corrente obtida, qual seja, a de curto circuito, é de aproximadamente 13,9A, já no ponto de máxima potência ela se apresenta como próxima de 13,0A. Considerando agora a corrente elétrica injetada na rede, esta apresenta-se nas simulações com um valor eficaz de aproximadamente 16,09A.

Outro ponto meritório de destaque, traduz-se a respeito da injeção harmônica de corrente provocada por esta simulação de geração distribuída, foi possível observar que o resultado da mesma é de 6,12%, sendo que as componentes pares contribuem com 0,96%, as ímpares múltiplos de 3 com 5,93% e as ímpares não múltiplos de 3 com 1,17%. Tais condições ocorreram em um cenário com injeção de potência ativa da planta fotovoltaica em torno de 3,7kW.

Analisando as distorções harmônicas de tensão nas fases A e B, percebe-se que estas esboçaram valores dentro das normativas vigentes, sendo: DHT para a tensão Va de 2,34% e para a tensão Vb de 2,11%.

VI. ANÁLISE DE DESEMPENHO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL IMPLEMENTADA FRENTE AOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM CAMPO

Tendo em vista os resultados das medições em campo e também aqueles advindos de simulação computacional, pode-se afirmar que:

- as tensões A e B da medição se mostraram com valores 125,78V e 123,7V, respectivamente, enquanto na simulação tivemos 121,8V para a tensão e 137V para a tensão B. Em relação a tensão A, os valores não se encontram tão distantes e podem ser considerados compatíveis. Quanto a tensão B, podemos observar que a discrepância de uma para a outra é muito grande. Isso se explica no desequilíbrio de tensão que o inversor simulado está proporcionando à conexão do mesmo com a rede. Esse resultado tão alto pode ser explicado pelos capacitores de entrada e saída do conversor *boost* utilizado, que está proporcionando um ganho de tensão nessa fase e de corrente no sistema como um todo.
- em relação às harmônicas de tensão verificados, em ambos resultados (simulação e medição) as distorções totais se encontram com valores extremamente próximos, pouco acima dos 2%. Isso mostra que as duas condições estão compatíveis nesse quesito.
- na medição foi possível ver que a corrente injetada na rede pelo inversor foi de 13,45A na fase A e 13,16A na fase B. Observando a simulação do painel fotovoltaico, pode-se perceber que a corrente de saída do mesmo é um valor perto do apresentado, de aproximadamente 13,0A. Porém durante o processo de conversão da corrente passa a ter um ganho indo de 13,0A para 16,1A. Essa situação não era esperada para a simulação, deixando claro que algum padrão utilizado não está compatível com o real.
- nas distorções harmônicas de corrente, vê-se que ambas não são compatíveis, sendo a distorção medida na instalação muito maior que a dada pela simulação. Como dito, isso se deve a grande influência das componentes pares naquele sistema, o que não ocorre no caso da simulação.
- com relação as potências apresentadas, os valores da simulação se encontram maiores, 3,68kW, que o apresentado pela medição, 2,82kW. Isso se deve pela corrente de saída do inversor da simulação ser superior à medição. Como a potência tem relação direta com a corrente, quanto maior a mesma, maior a potência sendo injetada na rede pelo inversor.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou, em um primeiro momento, as principais etapas do processo de geração fotovoltaica, focando, particularmente, na modelagem computacional do painel fotovoltaico.

Posteriormente e em sequência, foi realizada o detalhamento da implementação computacional das distintas etapas de conversão fotovoltaica de energia. Medições em campo em uma planta comercial existente na cidade de

Uberlândia foram realizadas. O procedimento de análise de desempenho partiu de medições em campo e posterior comparação dos resultados assim encontrados com aqueles advindos das modelagens implementadas.

A partir dos resultados apresentados, é possível afirmar que a modelagem computacional utilizada necessita de maiores aprimoramentos e teste. Já no que se refere ao sistema fotovoltaico medido em campo, ressalta-se que estudos complementares também são importantes, no sentido de justificar e/ou identificar a origem das correntes harmônicas aferidas de ordem pares nesta planta, as quais não são ordens características neste tipo de conversão.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos ao CNPQ (Proc. 460208/2014-4) e à FAPEMIG (Proc. TEC-APQ-02447-15) pelo suporte financeiro concedido via Projetos de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS, “Operador Nacional do Sistema,” ONS, 19 03 2019. [Online]. Available: http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. [Acesso em 19 03 2019].
- [2] ONS, “Plano de Operação Energética 2019 - 2023,” Operado Nacional do Sistema, 2019.
- [3] ONS NT 009/2016 - REV. 02, “Instruções para a Realização de Estudos e Medições d QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras,” Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- [4] ANEEL, “Procedimento de Distribuição - PRODIST - Módulo 3: Acesso ao Sistema de Distribuição,” Agência Nacional de Energia Elétrica, Revisão 7, 2016.
- [5] Sun-Earth, *Modulo Fotovoltaico Policristallino TPB 156X156-60-P 230W 235W 240W 245W*.
- [6] Theia , *Theia™ Product Series - Product Guide String Inverters*.
- [7] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*, New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- [8] A. C. Souza; C. R. A. Júnior; G. T. Silva; I. N. Santos, “Simulation and Dynamic Analysis of Three-Phase Photovoltaic System Connected on Grid Employing Matlab/Simulink Software,” em *SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Niterói, RJ, Brasil, 2018.
- [9] M. G. Simões e F. A. Farret, *Modeling Power Electronics and Interfacing Energy Conversion Systems*, New Jersey, Canada: IEEE PRESS, Wiley, 2017.