

ANÁLISE DOS IMPACTOS GERADOS PELA CONEXÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA  
FOTOVOLTAICA NA REDE DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Helerrandro Santos Ribeiro<sup>1</sup> (IC), Arthur Costa Souza<sup>1</sup> (PG)  
Universidade Federal de Itajubá<sup>1</sup>.

**Palavras-chave:** Geração Distribuída Fotovoltaica. Correntes harmônicas. Qualidade da energia elétrica.

### Introdução

Este trabalho investiga a relação entre as distorções harmônicas de corrente e a variação da irradiância solar em sistemas de geração fotovoltaico, por meio de 3 estratégias distintas, sendo elas: a medição em um sistema real de 5.1kWp presente no campus da Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira; a emulação dos painéis fotovoltaicos por meio de um emulador fotovoltaico (FV) conectado ao inversor comercial, e por fim, a simulação computacional no *software* Matlab/Simulink.

### Metodologia

O sistema fotovoltaico instalado no Campus é composto por um total de 40 painéis solares de 255Wp, do fabricante Yingli Solar e ocupam uma área aproximada de 80m<sup>2</sup>. Estes foram instalados no telhado do quarto andar do prédio II da Universidade.

Para a instalação do arranjo a inclinação ideal deveria ser em 20°, entretanto, os painéis foram instalados acompanhando a inclinação do telhado, assim, as 4 *strings* apresentam as inclinações de 12°; 14°; 14,9° e 15,3°, tendo em consideração a primeira *string* na parte mais alta do telhado. Vale ressaltar que a orientação ideal dos painéis seria totalmente para o norte, contudo devido ao posicionamento do telhado, eles foram instalados com azimute corresponde a 290°. Como a instalação não foi realizada para a melhor inclinação e azimute recomendados, haverá uma redução de 4% na geração de energia (REIS, 2017). A Figura 1 representa a instalação supracitada anteriormente.

Figura 1: Geração Distribuída Universidade Federal de Itajubá.



Os painéis instalados conforme apresentado na Figura 1, são divididos em 4 *strings*, cada uma com 10 painéis. As *strings* por sua vez são conectadas em 2 inversores solares, sendo esses da marca ABB e PHB, ambos com potência nominal de 5kW. Tais equipamentos são apresentados na Figura 2.

Figura 2: Inversores Solares.



Para o presente trabalho realizou-se às medições no ponto de conexão do inversor à rede da universidade, desta maneira, foi adotado as medições apenas em um dos inversores comerciais, sendo escolhido o inversor da ABB. A fim de se realizar as medições, utilizou-se o Analisador de Energia do Fabricante Fluke, modelo 435 série II. O equipamento é apresentado na Figura 3.

Figura 3: Analisador de energia Fluke 435 série II.

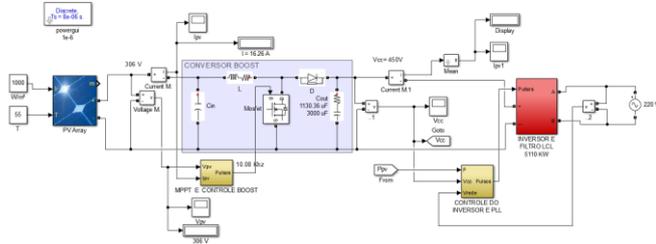


Fonte: Fluke, 2012.

Por meio do analisador de energia realizou-se as medições de tensão, corrente, frequência, potência, Harmônicos individuais, *THD* (*Total Harmonic Distortion*). Para simular o comportamento do sistema fotovoltaico, implementou-se um modelo computacional no *software* Matlab/Simulink. A mesma foi realizada de acordo com a simulação descrita por Souza (2020). A Figura 3 representa a simulação computacional realizada

por diagramas de blocos na plataforma Matlab/Simulink.

Figura 3: Simulação Computacional implementado no Matlab/Simulink.



A fim de confrontar os valores obtidos na medição da geração solar no campus da universidade, realizou-se um experimento no mesmo inversor, entretanto com o emulador FV conectado ao invés dos painéis. Vale ressaltar que o emulador tem a função de simular o comportamento dos painéis fotovoltaicos para determinados valores de irradiância e temperatura. A fonte utilizada é do modelo XR 400-20 do fabricante Magma Power. O emulador FV é apresentada na Figura 4. A Tabela 1 exibe os parâmetros utilizados do conversor *boost*. Enquanto a Tabela 2 apresenta os valores do filtro LCL. Valer ressaltar que a topologia do inversor trata-se do *full-bridge* com frequência de chaveamento de 20 kHz.

Tabela 1: Parametrização do conversor boost.

Parâmetros	Valor
$L_{boost}$	1167,58 $\mu$ H
$C_o$	3000 $\mu$ F
$F_{sw}$	20 kHz

Tabela 2: Parametrização do filtro LCL.

Parâmetros	Valor
$L_1$	10,18 mH
$C_f$	12,457 $\mu$ F
$L_2$	0,12 mH
$R_f$	1,023 $\Omega$

Onde:  $L_{boost}$  trata-se da indutância do conversor boost,  $C_o$  é a capacitância de saída do boost,  $F_{sw}$  refere-se à frequência de chaveamento do boost,  $L_1$  indica o indutor do lado do inversor,  $C_f$  aponta a capacitância do filtro,  $L_2$  o indutor do lado rede e  $R_f$  o resistor de amortecimento.

Figura 4 - Emulador FV.

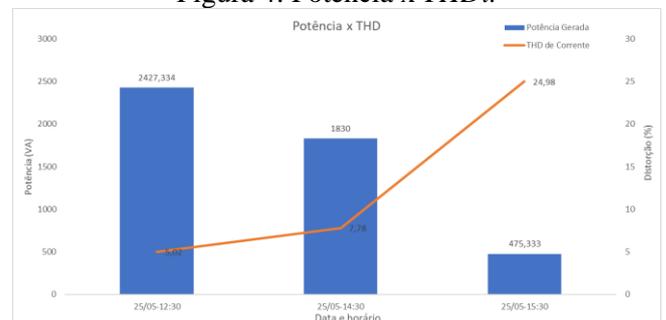


## Resultados e discussão

Uma vez realizado a medição no campus com o analisador de energia Fluke no período de 24 horas com intervalo de amostragem de 10 em 10 minutos, escolheu-se três instantes que apresentam valores de potência gerada distintos. Neste sentido, determinou-se a leitura nos horários das 12:30, 14:30 e das 15:30.

A Figura 5, representa a distorção harmônica total de corrente *THDi* (*Total Harmonic Distortion*) juntamente com a respectiva potência gerada pelo sistema fotovoltaico em cada horário. Percebe-se que no horário de 12:30 é o momento de maior potência gerada e menor grau de distorção harmônica. Por outro lado, às 15:30 é o horário de menor potência gerada e que ocorre o maior grau de distorção harmônica de corrente injetada na rede. Vale ressaltar que a potência gerada tem uma relação direta com a irradiância solar, portanto, quanto maior for a incidência da luz do sol sobre os módulos FVs, maior será a potência injetada na rede. Neste sentido, conclui-se que para baixos índices de irradiância, há uma tendência de aumentar o grau da distorção harmônica total de corrente.

Figura 4: Potência x *THDi*.



Os dados apresentados na Figura 4 são demonstrados de forma quantitativa na Tabela 3, onde inseriu-se também o valor da corrente fundamental para cada horário de geração, sendo 8,103 A, 5,427 A e 2,326 A respectivamente, para os horários de 12:30, 14:30 e 15:30.

Tabela 3: Corrente, *THDi* e potência por horário.

Horário (h)	Corrente Fundamental (A)	<i>THDi</i> (%)	Potência (W)
12:30	8,103 A	5,02 %	2427,35 W
14:30	5,427 A	7,78 %	1830 W
15:30	2,326 A	24,98 %	475,34 W

Analisando-se então as correntes harmônicas individuais mais significativas geradas pelo inversor fotovoltaico do campus, converteu-se os valores coletados em % das principais ordens harmônicas em ampère (A), a fim de

avaliar se as correntes harmônicas realmente aumentam em amplitude no decorrer da redução da irradiância. O resultado obtido nas medições é apresentado na Figura 5, onde observa-se que a partir da diminuição da potência gerada há o aumento da corrente harmônica injetada na rede, como por exemplo a harmônica de 5ª ordem que apresentam os valores de 0,2398 [A], 0,2425 [A] e 0,3991 [A] de injeção na rede nos respectivos horários de 12:30, 14:30 e 15:30.

Figura 5: Principais ordens harmônicas obtidas na medição do campus.



Vale destacar que os valores das harmônicas injetadas na rede são maiores mesmo com a diminuição da corrente fundamental que é apontada pela Tabela 03. Contudo, a 13ª harmônica se comporta de forma divergente das demais, onde tem-se a diminuição de sua corrente para os horários de 12:30 para 14:30, tal fato pode ser explicado diante da falta da manutenção associado a limpeza dos painéis solares, conforme apresenta na Figura 6, uma vez que, os módulos sujos provocam fenômenos imprevisíveis/aleatórios nos painéis, como o comprometimento da eficiência do sistema em termos de geração e qualidade da energia gerada.

Figura 6: Situação atual dos Painéis Solares instalados no campus.

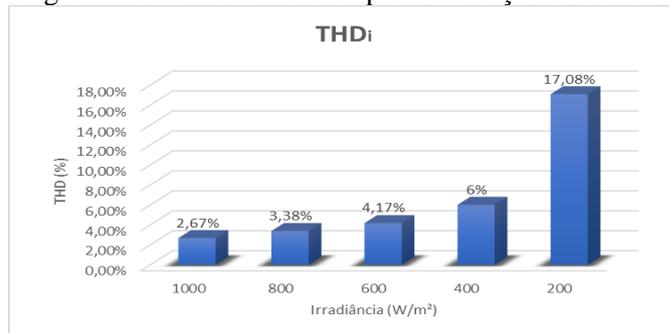


A fim de comprovar computacionalmente o experimento descrito anteriormente, realizou-se a simulação de um sistema solar fotovoltaico no *software* Matlab/Simulink, contemplando todas as unidades que integram o módulo FV e o inversor solar, estando de acordo com as estratégias de modelagens descritas por Souza (2020).

Para a realização da simulação computacional, fixou-se a temperatura dos painéis solares em 55° celsius e definiu-se cinco níveis distintos de irradiâncias, são eles: 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² e 200 W/m².

A Figura 7 apresenta a distorção harmônica total de corrente (*THDi*) a partir da variação da irradiância solar, onde é possível perceber conforme apresentado na Figura 1, na ocorrência da redução da irradiância solar há o aumento da *THDi*, pois para uma irradiância de 1000 W/m² tem-se uma *THDi* de 2,67% contra 17,08% provocada pela irradiância de 200 W/m².

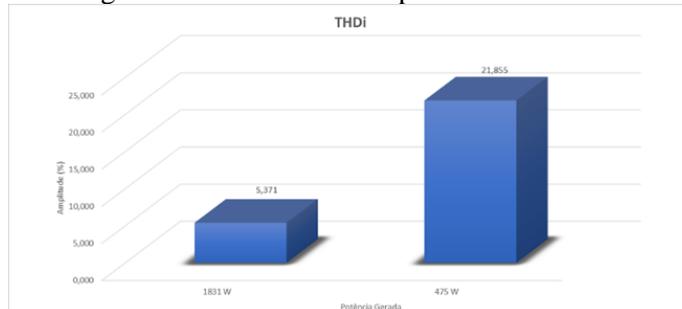
Figura 7: *THDi* x Irradiância pela simulação no Matlab



A fim de reproduzir os resultados obtidos na estratégia de medição do sistema fotovoltaico no campus, o inversor fotovoltaico foi conectado ao emulador FV, assim, o emulador foi ajustado para fornecer uma potência de 475 W e 1831 W. Vale ressaltar que, devido a limitação física do emulador FV, não foi possível realizar a medição para a situação de 2427,35 W.

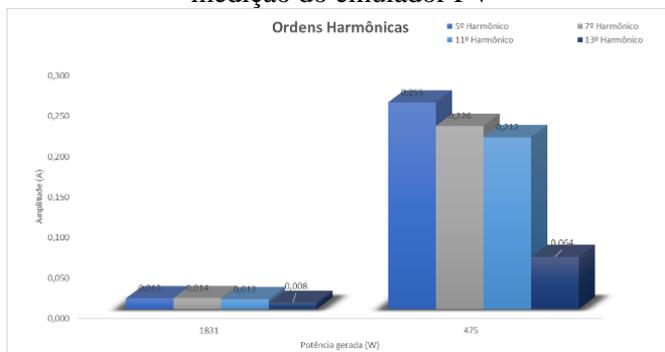
A Figura 8 apresenta os valores de *THDi* obtidos a partir de cada ensaio realizado, onde foi constatada uma distorção harmônica total de corrente de 21,85% para 475 W e 5,37% para 1831 W. Dessa forma, conclui-se que quanto menor a potência gerada pela GD maior será a distorção injetada na rede.

Figura 8: *THDi* x Potência pelo emulador FV



A Figura 9 apresenta os valores das amplitudes das correntes harmônicas individuais injetadas na rede de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, onde novamente pode-se perceber que com a diminuição da potência gerada ocorre o aumento das correntes harmônicas injetadas na rede.

Figura 9: Principais ordens harmônicas obtidas na medição do emulador FV



Contudo, ao compararmos os resultados das Figuras 8 e 9, respectivamente com as Figuras 4 e 5, percebe-se que com a utilização do emulador FV obteve-se resultados inferiores tanto da  $THDi$  quanto das amplitudes das harmônicas individuais em relação ao ensaio com a utilização dos painéis solares que estão instalados no campus. Tal discrepância, se dá devido a sujeira presente nos painéis solares, conforme evidencia a Figura 10, o arranjo fotovoltaico em dois momentos distintos, sendo o da esquerda representando os dias atuais, enquanto o da direita representando o dia que foram instalados.

Figura 10: Comparação entre os painéis na condição suja e na condição limpa.



## Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento das distorções harmônicas geradas por um sistema fotovoltaico presente na Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, submetido a variação da irradiância solar, assim como a simulação no *software* Matlab/Simulink e também a utilização de um emulador FV para emulação dos painéis solares.

No que tange aos resultados no sistema instalado na universidade, apesar da sujeira presente nos módulos, o qual é responsável por fenômenos aleatórios na geração de energia no quesito de distorção harmônica, os resultados encontrados foram pertinentes ao esperado, visto que, a partir da diminuição da potência gerada, ocorre o aumento tanto da  $THDi$  quanto das harmônicas

individuais de corrente injetadas na rede.

A partir dos dados obtidos através da utilização do emulador FV, constatou-se resultados similares aos obtidos no sistema da universidade, no qual a partir da diminuição da potência ocasionou o aumento da distorção harmônica de corrente injetada na rede. Contudo, os valores da  $THDi$  e das correntes harmônicas individuais foram menores ao compararmos com a medição feita pelos painéis fotovoltaicos propriamente dito, onde ambos injetam a mesma potência na rede. Tal discrepância pode ser explicada pela presença de sujeira nos módulos fotovoltaicos, fazendo com que ocorra fenômenos incertos na geração, como por exemplo a 13ª ordem que teve o comportamento contrário das demais.

Por último, se tratando dos dados obtidos pela simulação, foi constatado o comportamento similar ao ensaio da medição dos painéis no campus, uma vez que com a diminuição da irradiância solar por sequência tem-se a diminuição da potência gerada, ocasionando assim, o aumento da distorção harmônica total de corrente.

Portanto, a partir da realização dos três ensaios descritos anteriormente, comprovou-se que os sistemas fotovoltaicos apresentaram o mesmo comportamento associado ao fenômeno de distorção harmônica.

## Agradecimento

Agradeço ao Prof. Dr. Arthur Costa de Souza por todo apoio, colaboração e por nunca medir esforços para passar todo seu conhecimento para o desenvolvimento do presente trabalho. Agradeço ao Prof. Geovane Reis pelo apoio no desenvolvimento prático durante a aquisição de dados. Agradeço ao colega de curso Iury Severino Rosa por todo apoio, comprometimento, empenho e troca de ideias para o desenvolvimento da pesquisa. E ao Luccas Tadeu Farnezes Soares por todo apoio e auxílio.

## Referências

FLUKE CORPORATION, Fluke434-II/435-II/437-II – Analisador de Qualidade de Energia, Manual do Usuário, Disponível em <[https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II\\_umpor0100.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf)> janeiro de 2012.

Reis, Geovane Luciano dos. R375p Projeto e construção de um conversor monofásico em ponte H multicelular entrelaçado para geração fotovoltaica e eólica de pequeno porte [manuscrito] / Geovane Luciano dos Reis. - 2017. xviii, 143 f., enc.: il.

Souza, A. C.; “Sistemas Fotovoltaicos Trifásicos com Compensação de Reativo, Armazenamento Interno de Energia e Inércia Virtual”, Tese de doutorado apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2020.