

ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Alessandro Bogila – alessandro.bogila@facens.br

Joel Rocha Pinto – joel.rocha@facens.br

Thales Prini Franchi – thales.prini@facens.br

Thiago Prini Franchi – thiago.prini@facens.br

Facens - Faculdade de Engenharia de Sorocaba, Departamento de Engenharia Elétrica

Marco Roberto Gonçalves – marco.goncalves@fluke.com

Fluke do Brasil Ltda, Departamento de Produtos

Resumo. Este artigo apresenta um estudo sobre qualidade da energia elétrica (QEE) na micro usina fotovoltaica do Campus da Facens. As análises se concentram nas distorções harmônicas das correntes e das tensões no sistema composto por quatro inversores fotovoltaicos do fabricante Fronius, com as respectivas potências de 20 kW; 17,5 kW; 15 kW e 12,5 kW, totalizando 64 kW. Estes inversores fotovoltaicos são responsáveis pela transformação da energia em corrente contínua (CC), que é gerada pelos painéis fotovoltaicos, em energia de corrente alternada (CA) para ser acoplada na rede de distribuição do Campus da Facens. Esta micro usina de geração fotovoltaica é on-grid e é composta por uma parte com sistema fixo e uma parte com sistema móvel, através de um rastreador solar. A potência total do sistema é 64 kWp, sendo 10 kWp do sistema advindo do rastreador solar e o restante do sistema fixo. A energia gerada pelo sistema fotovoltaico representa aproximadamente 15% do consumo total da conta de energia elétrica da Facens. Para o desenvolvimento do estudo, foi instalado um medidor de qualidade da energia elétrica do fabricante Fluke, modelo Fluke 438-II, permitindo analisar o comportamento harmônico das correntes e tensões de forma individualizada nos inversores fotovoltaicos e no computo total da micro usina. O estudo tem o propósito de verificar se está havendo injeção de correntes e tensões distorcidas na rede de distribuição, além dos valores pré-estabelecidos pelas regulamentações vigentes. Serão apresentadas as análises do conteúdo harmônico total e também das frequências harmônicas individuais que mais se destacaram em termos de amplitude. Os resultados de cada inversor fotovoltaico individualmente também serão apresentados.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica, Inversor Fotovoltaico, Qualidade da Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos de uma microgeração diretamente conectados à rede elétrica da concessionária permitem que parte da geração de energia elétrica seja disponibilizada para a instalação elétrica em questão e o excedente seja devolvido para a concessionária local. A medição do excedente é feita por um relógio bidirecional (ANEEL – Micro e Minigeração Distribuída, 2016).

O elemento responsável pela conversão da energia elétrica contínua, proveniente dos módulos fotovoltaicos, em energia elétrica alternada, com as características ideais de amplitude e frequência, para ser entregue no ponto de conexão da concessionária, são os inversores fotovoltaicos (Macêdo, 2015). No entanto, com o crescente aumento das instalações fotovoltaicas torna-se necessário verificar a qualidade da energia elétrica que os inversores fotovoltaicos estão produzindo. Uma vez que os mesmos podem gerar índices de harmônicos na rede elétrica e causar grandes impactos na qualidade da energia elétrica (Fortes, 2017).

Toda conexão de micro e minigeração distribuída deverá atender os requisitos explicitados nas regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ANEEL – Resolução 687, 2015; ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017).

Em relação aos painéis fotovoltaicos integrados, os principais distúrbios causados que serão analisados nesse artigo são:

Distorção harmônica

A qualidade da energia elétrica pode ser afetada quando suas formas de onda das correntes e tensões em relação à onda senoidal da frequência fundamental apresentam deformações. As distorções harmônicas são fenômenos associados a essas deformações. A Tab. 1 apresenta a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas, segundo o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017).

O valor de referência para a distorção harmônica total de tensão, de acordo com o Módulo 8 do PRODIST pode ser visualizado pela Tab. 2 (ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017).

Tabela 1 – Terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas segundo o Módulo 8 do PRODIST.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h _{máx}
Ordem harmônica mínima	h _{mín}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: Módulo 8 – PRODIST.

Tabela 2 – Valores de referência para a distorção harmônica total de tensão.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Módulo 8 – PRODIST.

Variação de frequência

A fonte geradora de energia elétrica que será conectada à rede elétrica deverá operar em condições normais na faixa de frequência de 59,9 a 60,1 Hz. Se ocorrer um distúrbio no sistema de distribuição a fonte geradora poderá operar na faixa de 59,5 a 60,5 Hz para recuperação do equilíbrio carga-geração e terá 30 segundos para deixar esta faixa e também atender os seguintes quesitos conforme o módulo 8 do PRODIST (ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017):

- a) não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- b) pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 (trinta) segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos;
- c) pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 (dez) segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 05 (cinco) segundos.

2. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo, foi instalado um medidor de qualidade da energia elétrica do fabricante Fluke, modelo Fluke 438-II, permitindo analisar o comportamento harmônico das correntes e tensões de forma individualizada nos inversores fotovoltaicos e no computo total da micro usina. A Fig. 1 indica no diagrama unifilar os pontos onde o medidor fora instalado. É importante salientar que o medidor utilizado atende os requisitos previstos no módulo 8 do PRODIST no que refere a: possuir classe de exatidão de 0,1% de tensão e de 0,5% para a corrente, taxa amostral de 500 amostras por ciclo e conversor analógico digital de 16 Bits (ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017; Silva, 2014).

As grandezas principais medidas foram registradas em intervalos de integração de um minuto: frequência, tensão, corrente, distorção harmônica total de tensão (DHT-V), distorções harmônicas individuais de tensão e corrente (pares até 50ª e ímpares até a 49ª), distorção harmônica total de corrente (DHT-I) com os respectivos ângulos de fase e outros indicadores de qualidade da energia.

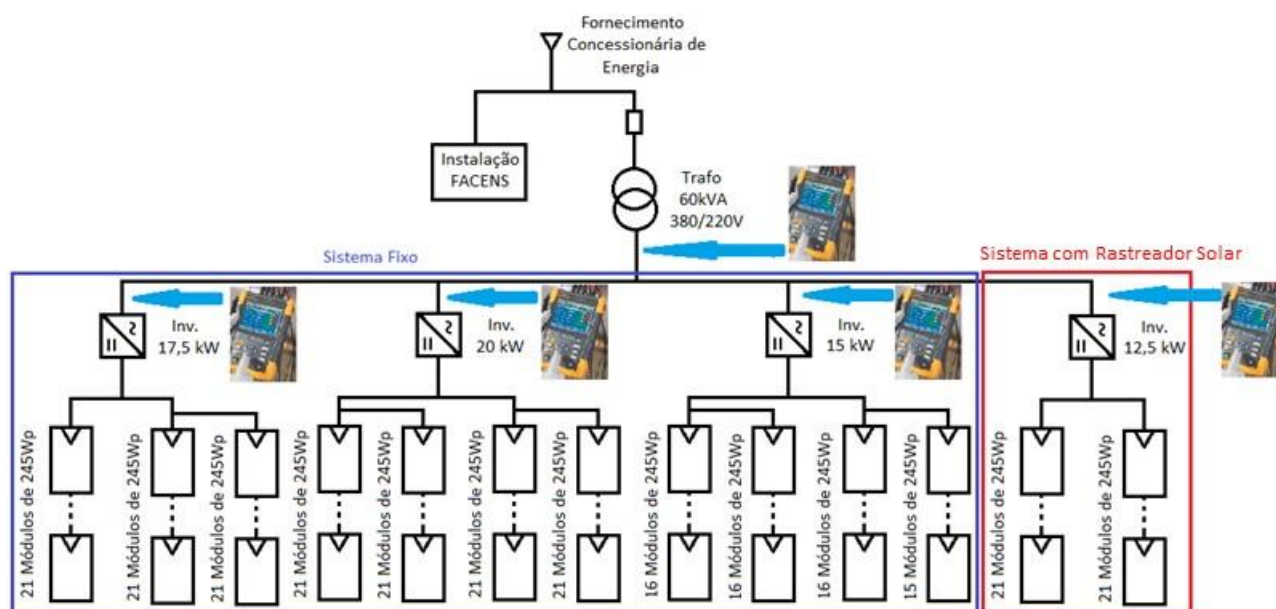


Figura 1 – Diagrama unifilar da micro usina e os pontos de medições.

O procedimento para efetuar as medições também segue os requisitos definidos no Módulo 8 do PRODIST que compreendem (ANEEL – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017):

- O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deve compreender o registro de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada.

Através das medições, os estudos das análises se concentraram no perfil de tensão, frequência, distorção harmônica total e individual de tensão e distorção harmônica total e individual de corrente. Tais análises visam a verificação dos índices de qualidade da energia elétrica da micro usina fotovoltaica em conformidade com o Módulo 8 do PRODIST e da norma IEE-519 referente a distorção harmônica de corrente, sendo os valores de referência da distorção de demanda total (TDD) conforme a relação da corrente de curto-circuito pela corrente de demanda da carga, na frequência fundamental no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) da Rede, apresentados na Tab. 3 (IEEE 519-2014; IEEE 1159-1992).

A conexão da micro usina fotovoltaica com a rede no Campus da Facens, apresenta uma corrente de curto-circuito de 7,57 kA, com isso a relação I_{sc}/I_L no PAC é de 78, o que é evidenciado na Tab. 3 (IEEE 519-2014).

Tabela 3 – Limites de valores para distorção de corrente.

Current Distortion Limits for General Distribution Systems
(120 V Through 69 000 V)

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
$<20^*$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 \leq 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 \leq 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 \leq 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above.

Current distortions that result in a dc offset, e.g., half-wave converters, are not allowed.

*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L .

where

I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC.

I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC.

Fonte: IEE-519-2014.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Através das medições e do software Power Log 5.3 obteve-se as figuras para o norteamo das análises da qualidade da energia elétrica da micro usina fotovoltaica do Campus da Facens (Starosta, 2015). As figuras são apresentadas da seguinte forma:

3.1 Análises do inversor fotovoltaico de 20 kW

A Fig. 2 mostra a frequência da rede registrada pelo inversor fotovoltaico de 20 kW. Nota-se que a frequência da rede é praticamente 60 Hz, garantindo o acoplamento desse e dos demais inversores fotovoltaicos na rede.

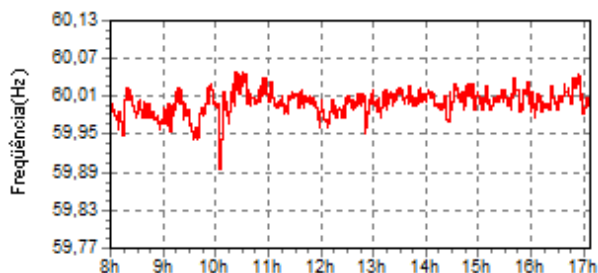


Figura 2 – Frequência da rede registrada pelo inversor fotovoltaico de 20 kW no dia 16/11/2017.

A Fig. 3 apresenta o comportamento temporal da distorção harmônica total de tensão e a distorção harmônica de tensão de 5ª ordem, sendo possível verificar que a maior contribuição da distorção harmônica total de tensão é proveniente em grande parte pela 5ª harmônica. A Fig. 4 mostra o histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão, corroborando com a Fig. 3 e atendendo os valores de referência do Módulo 8 do PRODIST.

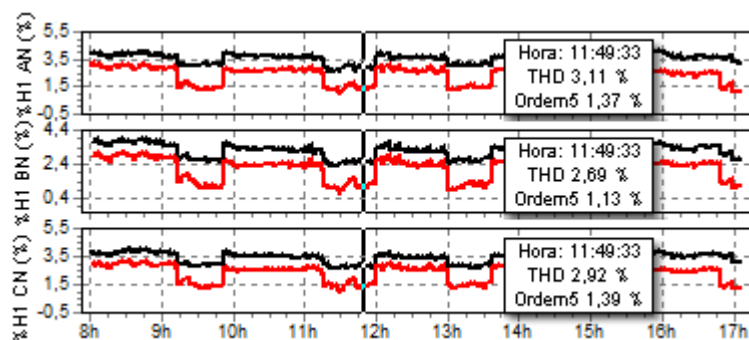


Figura 3 – Comportamento temporal da distorção harmônica total de tensão (em preto) e a distorção harmônica de tensão de 5ª ordem (em vermelho) do inversor fotovoltaico de 20 kW obtido no dia 16/11/2017.

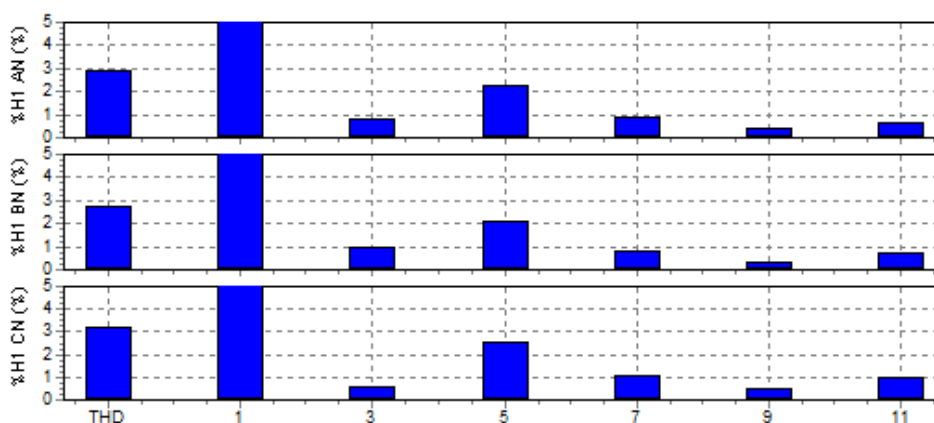


Figura 4 – Histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão do inversor fotovoltaico de 20 kW no dia 16/11/2017.

A Fig. 5 e a Fig. 6 evidenciam o atendimento do índice da DHT-V com os valores de referência do Módulo 8 do PRODIST, tanto no horário da geração máxima às 12h15 quanto no horário da mínima geração às 17h05, diferentemente do que se contata na distorção harmônica total de corrente DHT-I, pois no período de menor geração a corrente fundamental é menor, o que traduz o maior índice da DHT-I no horário das 17h05. E mesmo quando o índice DHT-I é menor, na melhor condição de geração, o mesmo não atende na plenitude os limites de valores para distorção de corrente, conforme mostra a Tab. 3.

A Fig. 7 mostra o histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente com valores acima dos limites de distorção de corrente conforme mostra a Tab. 3, principalmente para a 3ª harmônica de corrente.

Data	Função	AN(V) / A(A) Méd.	BN(V) / B(A) Méd.	CN(V) / C(A) Méd.
16/11/2017 12:15:33 484msec	Tensão Fundamental	229,9 V (f)	229,3 V (f)	230,2 V (f)
16/11/2017 12:15:33 484msec	Corrente Fundamental	25,4 A (f)	25,6 A (f)	25,8 A (f)
16/11/2017 12:15:33 484msec	Tensão Phi	0 °	-119,92 °	-239,98 °
16/11/2017 12:15:33 484msec	Corrente Phi	-180,54 °	-60,86 °	-300,9 °
16/11/2017 12:15:33 484msec	THD V	3,63 % (f)	3,25 % (f)	3,56 % (f)
16/11/2017 12:15:33 484msec	THD A	29,65 % (f)	31,1 % (f)	30,23 % (f)
16/11/2017 12:15:33 484msec	Frequência	59,988 Hz (f)		

Figura 5 – Distorção harmônica total da tensão e da corrente do inversor fotovoltaico de 20 kW no dia 16/11/2017 às 12h15.

Data	Função	AN(V) / A(A) Méd.	BN(V) / B(A) Méd.	CN(V) / C(A) Méd.
16/11/2017 17:05:33 484msec	Tensão Fundamental	219,4 V (f)	219,3 V (f)	219,9 V (f)
16/11/2017 17:05:33 484msec	Corrente Fundamental	4,4 A (f)	4,8 A (f)	4,4 A (f)
16/11/2017 17:05:33 484msec	Tensão Phi	0 °	-119,76 °	-239,74 °
16/11/2017 17:05:33 484msec	Corrente Phi	-175,24 °	-151,52 °	-210,68 °
16/11/2017 17:05:33 484msec	THD V	3,21 % (f)	2,69 % (f)	3,05 % (f)
16/11/2017 17:05:33 484msec	THD A	327,67 % (f)	157,29 % (f)	327,67 % (f)
16/11/2017 17:05:33 484msec	Frequência	59,991 Hz (f)		

Figura 6 – Distorção harmônica total da tensão e da corrente do inversor fotovoltaico de 20 kW no dia 16/11/2017 às 17h05.

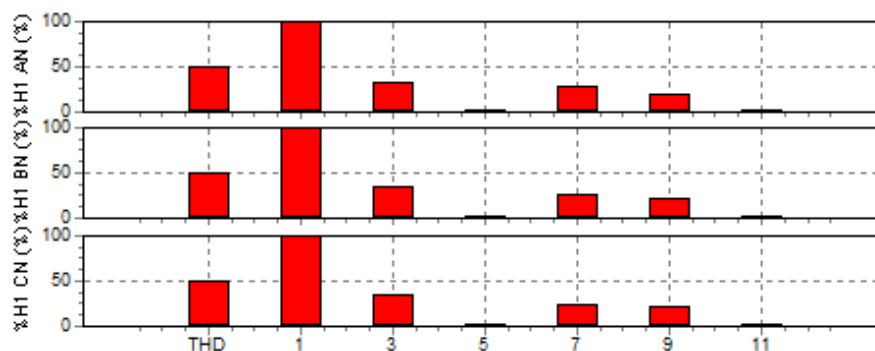


Figura 7 – Histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente do inversor fotovoltaico de 20 kW no dia 16/11/2017.

3.2 Análises do inversor fotovoltaico de 17,5 kW

A análise do inversor fotovoltaico de 17,5 kW será feita através de histograma de tensão e corrente para verificar as distorções harmônicas geradas pelo inversor fotovoltaico. Também serão apresentadas na Tab. 4 as medições em alguns instantes de tempo para verificar o comportamento instantâneo da geração de energia elétrica. Da mesma maneira serão feitas as análises para os inversores de 15 kW e 12,5 kW.

A Fig. 8 mostra o histograma das distorções harmônicas de corrente do inversor fotovoltaico de 17,5 kW. Os valores variam de acordo com a seleção da amostragem do período de medições. Este histograma contém valores do dia 01/11/2017, das 7h às 18h. Nota-se através do histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente que os valores estão acima dos limites de distorção de corrente, conforme mostra a Tab. 3.

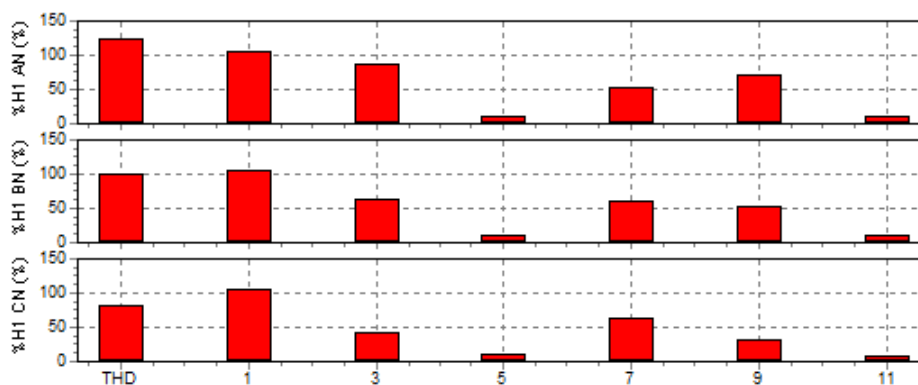


Figura 8 – Histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente do inversor fotovoltaico de 17,5 kW no dia 01/11/2017.

A Fig. 9 mostra o histograma das distorções harmônicas de tensão do inversor fotovoltaico de 17,5 kW. Nota-se que as distorções harmônicas de tensão estão abaixo de 3%.

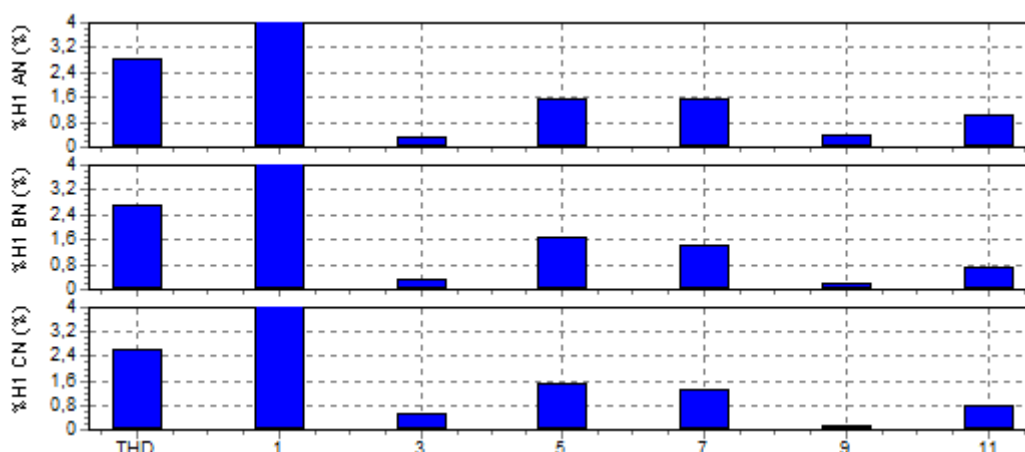


Figura 9 – Histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão do inversor de 17,5 kW no dia 01/11/2017.

A Tab. 4 apresenta os valores das distorções harmônicas pontuais para verificar o comportamento instantâneo. Os horários escolhidos têm objetivo de mostrar a variação da intensidade solar. Nota-se que os valores das DHT-I têm valores bastante elevados. No entanto, a tensão apresenta valores de acordo com as regulamentações vigentes, independente do horário de geração de energia elétrica.

Tabela 4 – Valores de DHT-V e DHT-I em função da corrente fundamental do inversor fotovoltaico de 17,5 kW.

Data	Hora	I (A)	DHT-I – a (%)	DHT-I – b (%)	DHT-I – c (%)	DHT-V-a (%)	DHT-V-b (%)	DHT-V-c (%)
01/11/2017	09h00	10,2	167,31	128,83	111,43	3,13	3,38	3,17
01/11/2017	12h51	26,2	102,51	88,81	69,17	3,52	3,37	3,21
01/11/2017	15h00	18,6	126,25	96,45	72,58	3,62	3,53	3,39
01/11/2017	17h01	7,4	78,51	80,04	62,21	4,07	4,08	3,92

3.3 Análises do inversor fotovoltaico de 15 kW

A Fig. 10 mostra o histograma das distorções harmônicas de corrente do inversor fotovoltaico de 15 kW. Nota-se que o resultado obtido é próximo dos valores obtidos no inversor fotovoltaico de 17,5 kW e as distorções harmônicas apresentam valores acima dos limites de distorção de corrente, conforme mostra a Tab. 3.

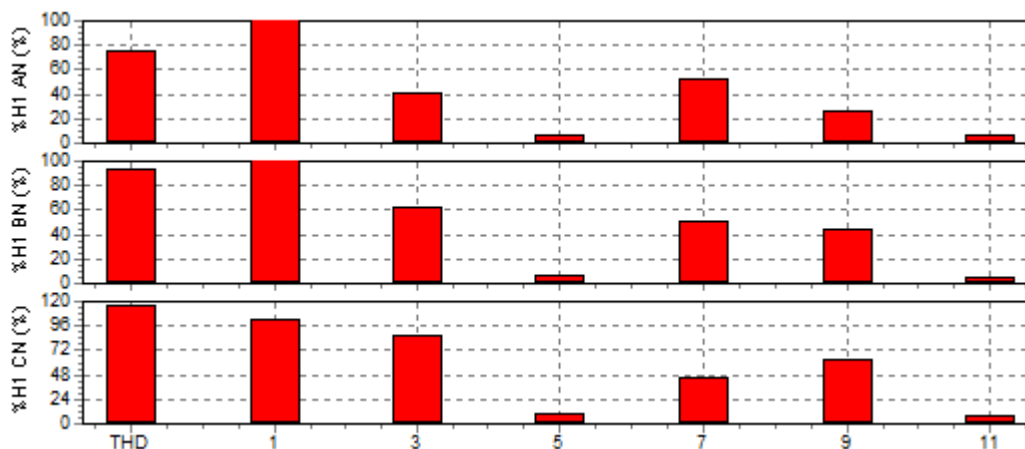


Figura 10 – Histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente do inversor fotovoltaico de 15 kW no dia 09/11/2017.

A Fig. 11 mostra o histograma das distorções harmônicas de tensão do inversor fotovoltaico de 15 kW. O comportamento harmônico é muito próximo do inversor fotovoltaico de 17,5 kW.

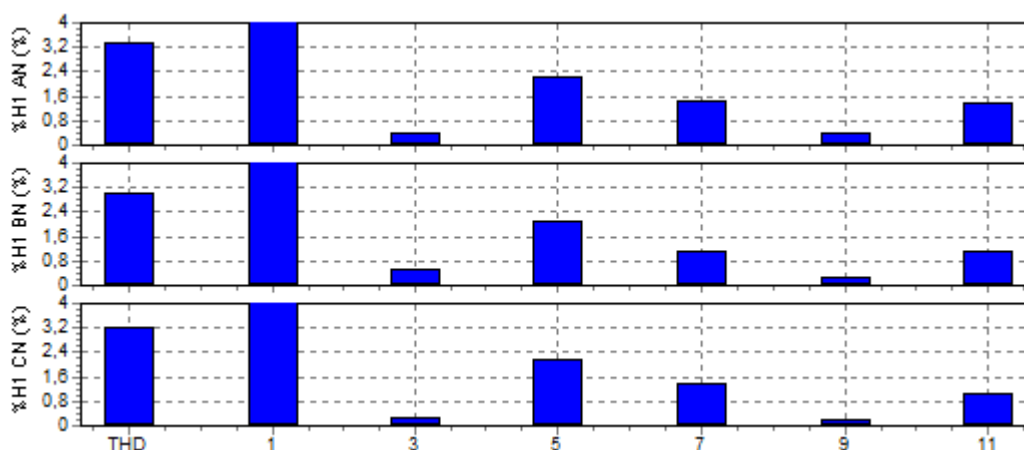


Figura 11 – Histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão do inversor fotovoltaico de 15 kW no dia 09/11/2017.

A Tab. 5 infere que este inversor fotovoltaico apresenta valores de distorções harmônicas de corrente acima dos limites de distorção de corrente recomendado pela IEE-519. As distorções harmônicas da tensão têm valores abaixo de 5%, atendendo os valores de referência do Módulo 8 do PRODIST.

Tabela 5 – Valores de DHT-V e DHT-I em função da corrente fundamental do inversor fotovoltaico de 15 kW.

Data	Hora	I (A)	DHT-I -a (%)	DHT-I -b (%)	DHT-I -c (%)	DHT-V-a (%)	DHT-V-b (%)	DHT-V-c (%)
09/11/2017	10h29	18,8	134,13	168,22	223,23	3,51	3,32	3,13
09/11/2017	12h03	26,0	77,34	97,44	131,03	3,42	3,11	3,22
09/11/2017	16h00	21,4	84,71	102,47	123,83	3,70	3,43	3,53
09/11/2017	17h58	20,4	116,81	145,87	193,34	4,31	3,92	4,38

3.4 Análises do inversor fotovoltaico de 12,5 kW

A Fig. 12 mostra o histograma das distorções harmônicas de corrente do inversor de 12,5 kW. Nota-se que as distorções harmônicas têm valores melhores do que os inversores de 17,5 kW e 15 kW. Porém, com valores acima do valor máximo desejado.

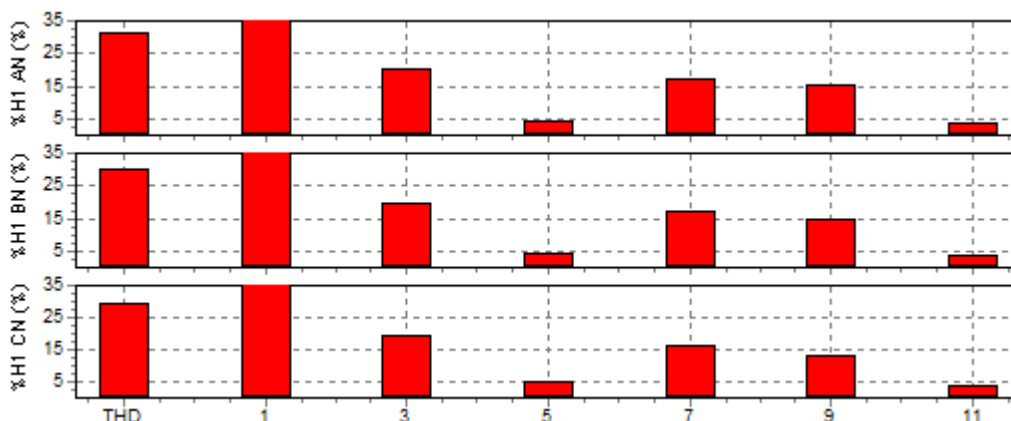


Figura 12 – Histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente do inversor fotovoltaico de 12,5 kW no dia 14/11/2017.

A Fig. 13 mostra o histograma das distorções harmônicas de tensão do inversor fotovoltaico de 12,5 kW. O comportamento harmônico é muito semelhante dos inversores fotovoltaicos de 17,5 kW e 15 kW, com valores de acordo com o Módulo 8 do PRODIST.

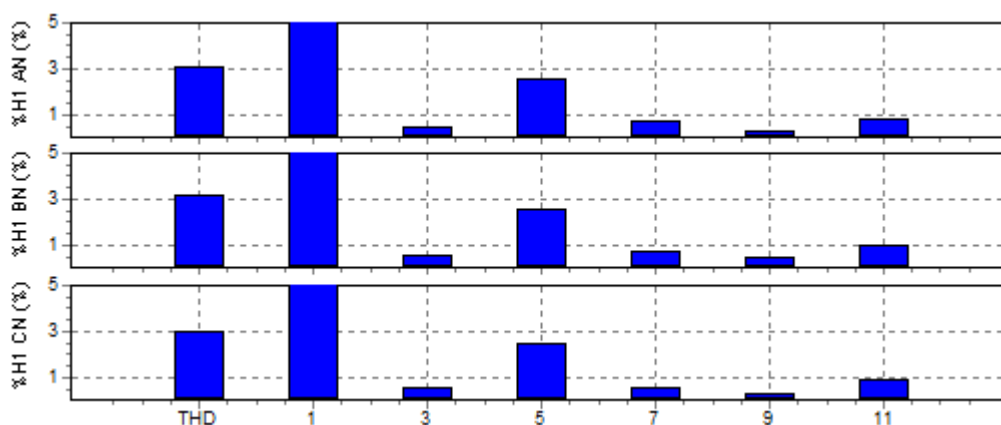


Figura 13 – Histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão do inversor fotovoltaico de 12,5 kW no dia 14/11/2017.

A Tab. 6 mostra que este inversor fotovoltaico apresenta distorções harmônicas de corrente um pouco melhor do que os inversores de 17,5 kW e 15 kW, mas com valores acima dos limites estabelecidos pela IEE-519. As distorções harmônicas da tensão têm valores abaixo de 4%.

Tabela 6 – Valores de DHT-V e DHT-I em função da corrente fundamental do inversor fotovoltaico de 12,5 kW.

Data	Hora	I (A)	DHT-I -a (%)	DHT-I -b (%)	DHT-I -c (%)	DHT-V-a (%)	DHT-V-b (%)	DHT-V-c (%)
14/11/2017	08h21	9,8	39,64	37,45	33,99	3,27	3,73	3,48
14/11/2017	10h06	12,8	41,74	40,19	38,67	3,04	3,26	3,01
14/11/2017	12h00	13	24,96	25,59	24,87	3,47	3,56	3,32
14/11/2017	15h00	10,4	25,76	26,43	27,95	3,28	3,16	27,95

3.5 Análises da geração total da micro usina fotovoltaica do Campus da Facens

A Fig. 14 mostra o histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão no transformador 60 kVA, 380/220V, Y/Y, da geração total advinda dos quatro inversores fotovoltaicos conectados em paralelo no lado de 380V atendendo os valores de referência do Módulo 8 do PRODIST.

As medições permitem verificar que no período de geração total de energia, normalmente das 8h às 17h, as distorções harmônicas de tensão e de corrente, apresentadas nos histogramas da Fig. 14 e Fig. 15 respectivamente, são baixas e atendem as regulamentações da ANEEL. Porém, as distorções harmônicas de corrente começam a aumentar depois das 17h, no entanto a corrente fundamental fornecida pelo sistema solar é muito baixa, esse comportamento é facilmente constatado na Fig. 16.

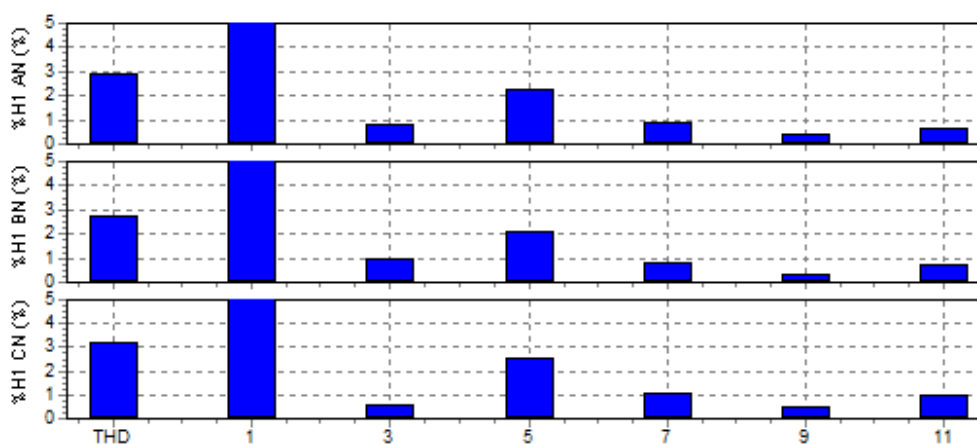


Figura 14 – Histograma da DHT-V e das distorções harmônicas individuais de tensão da geração total no período de 16/10/2017 à 23/10/2017.

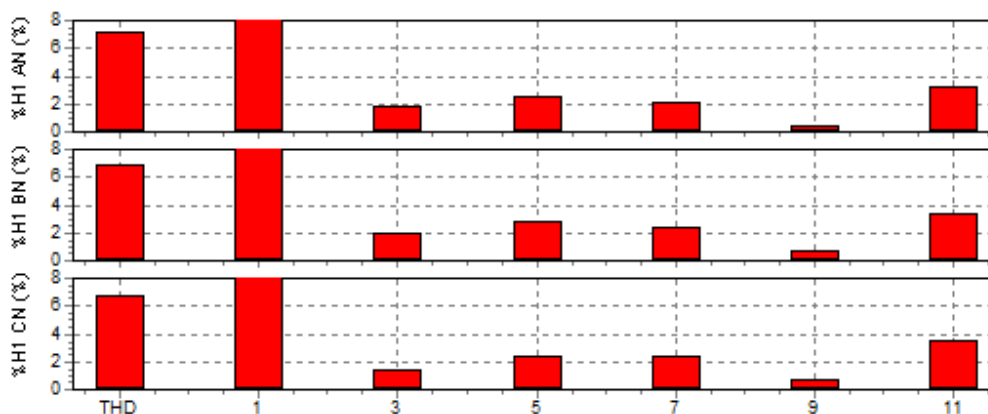


Figura 15 – Histograma da DHT-I e das distorções harmônicas individuais de corrente da geração total no período de 16/10/2017 à 23/10/2017.

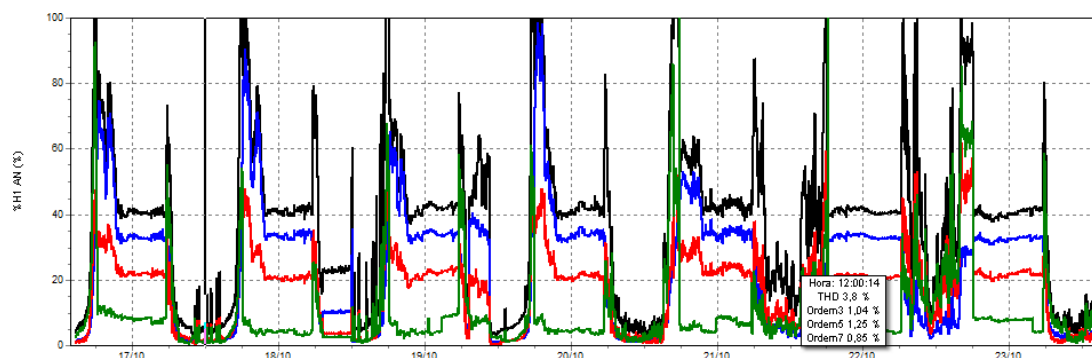


Figura 16 – Distorção harmônica total de corrente e distorções harmônicas individuais de corrente da geração total da fase *a* no período de 16/10/2017 às 14:47h até o dia 23/10/2017 às 14:46h.

Nota-se que independentemente do período de medição, a distorção harmônica de tensão está abaixo de 5%. Já a distorção harmônica de corrente depende do nível da geração fornecida pelo sistema fotovoltaico, fato já conhecido e que é possível verificar na Tab. 9.

Tabela 9 – Valores de DHT-V, DHT-I e da corrente fundamental da geração total da fase *a* no dia de 17/10/2017.

Data	HORA	CORRENTE FUNDAMENTAL (A)	DHT-V (%)	DHT-I (%)
17/10/2017	8h00	47,9	2,76	7,56
17/10/2017	10h00	83,8	2,03	3,53
17/10/2017	12h10	106,1	2,72	4,06
17/10/2017	15h00	70,8	2,83	6,41
17/10/2017	17h00	27,4	3,57	15,9

4. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS GERAIS

Este artigo apresenta uma análise das distorções harmônicas de tensão e de corrente em quatro inversores fotovoltaicos de diferentes potências, sendo de 12,5 kW; 15 kW; 17,5 kW e 20 kW e da geração total fornecida pelo sistema fotovoltaico. Estes inversores fotovoltaicos são responsáveis por converter, em corrente alternada, toda a energia em corrente contínua gerada pelo sistema fotovoltaico da micro usina do Campus da Facens. As saídas dos inversores fotovoltaicos estão conectadas em paralelo no transformador de 60 kVA, 380V/220V, Y-Y no lado de 380V.

A maioria dos resultados apresentados no horário próximo das 12h foram obtidos nas condições de geração plena da micro usina, podendo ser constatados em função da proximidade das correntes injetadas pelos inversores fotovoltaicos com as suas respectivas correntes nominais, caracterizando condições plenas de irradiância solar (Donadon, 2017). Os resultados também mostram que quanto maior for a corrente fundamental na saída dos inversores fotovoltaicos menor serão as distorções harmônicas de corrente, e embora as distorções harmônicas totais de corrente e as distorções harmônicas individuais de corrente apresentem valores acima dos limites de distorção de corrente, conforme a Tab. 3 para as análises dos inversores fotovoltaicos de forma individualizada, na geração total onde a

corrente fundamental gerada é maior, os índices de distorções harmônicas de corrente atendem aos limites estabelecidos pela IEE-519 no PAC.

Através dos resultados obtidos na análise da distorção harmônica de tensão é possível verificar que o índice é sempre menor que 5% em todos os casos analisados, tanto para as análises individuais dos inversores fotovoltaicos, quanto para a análise na geração total, independente do horário de geração.

A análise da qualidade da energia elétrica desse caso reforça a necessidade de estudos adicionais dos inversores fotovoltaicos para os sistemas de micro usinas fotovoltaicas considerando principalmente os aspectos de qualidade da corrente injetada e os desenvolvimentos tecnológicos dos inversores. As campanhas de medições e verificações são extremamente importantes por parte do Usuário e da Distribuidora com estabelecimento dos limites a serem seguidos: de corrente (IEE-519) e/ou de tensão pelo Módulo 8 do PRODIST com atenção direcionada ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) da rede de distribuição de energia elétrica.

Agradecimentos

Queremos agradecer a Facens pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e a Fluke do Brasil por ceder o Medidor de Qualidade de Energia Fluke 438-II utilizado nas análises dos inversores fotovoltaicos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL – Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2ª ed. Brasília, 2016.
- ANEEL – Resolução 687, 2015.
- ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2017.
- Donadon, A. R. et al. Análise de sistema fotovoltaico de grande porte conectado à rede. Revista Fotovolt, Ano 3, 2017.
- Fortes, Rárisson Roberto Acácio. Distorções Harmônicas Produzidas por Inversores de Geração Distribuída em Condição de Ressonância Paralela. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/138262/fortes_rra_me_ilha.pdf?sequence=3. Acesso em: 16/11/2017.
- IEEE 519-2014 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- IEEE 1159-1992 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
- Macêdo, Wilson Negrão. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede, 201 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-29112006-153307/pt-br.php>. Acesso em: 06/09/2015.
- Silva, Márcio Melquíades et al, 2014. "A Qualidade da Energia Elétrica Durante os Jogos da Copa do Mundo FIFA 2014 em Belo Horizonte", in INDUSCOM 2014, Juiz de Fora, p. 5, 2014.
- Starosta, J. Qualidade de Energia Elétrica. Anotações das aulas da disciplina de QEEPG1 do curso de pós-graduação em Especialização em Instalações Elétricas Prediais, Comerciais e Industriais – Faculdade de Engenharia de Sorocaba – Facens, 2015.

HARMONIC ANALYSIS IN PHOTOVOLTAIC INVERTERS OF A PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION

Abstract. *This paper presents a research about the quality of electric power (EQ) in photovoltaic micro power plant at Facens. The analysis focuses on the harmonic distortions of currents and voltages in the system composed by four photovoltaic inverters manufactured by Fronius, with respective powers of 20 kW; 17.5 kW; 15 kW and 12.5 kW, figuring up 64 kW. These inverters are responsible for transforming the energy produced in Direct Current (DC), which was generated by photovoltaic panels, into AC power to be coupled to the distribution network at Facens. This photovoltaic micro power plant is on-grid and is composed by a part in a fixed system and a part in a mobile system known as Tracker. The total power of the system is 64 kWp, from which 10 kWp from the Tracker system and the rest from the fixed system. The energy generated by the photovoltaic system represents approximately 15% of the total electricity consumption invoice of Facens. For the development of the study, an electric power quality meter of Fluke 438-II model was installed, allowing the analyses of the harmonic behavior of the currents and voltages in an individualized way in the inverters and in the total reckoning of the micro power plant. The study aims at verifying if there is an injection of distorted currents and voltages in the distribution network, above the values established by the regulatory norms. The analyses of the total harmonic content are shown and also the individual harmonic frequencies that are the most outstanding in terms of amplitude. The results of each individual inverter will also be presented.*

Key words: *Photovoltaic Energy, Photovoltaic Inverter, Electric Power Quality.*