

QUALIDADE DO SUPRIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS E MINIRREDES DO GEDAE/UFPA

Ulisses Carvalho Paixão Júnior – upaixaojr.eng@gmail.com

Luana Oliveira de Albuquerque – luanaalbuquerque.loa@gmail.com

Claudio Miro Fábio de Oliveira Barbosa – cfob@ufpa.br

João Paulo Alves Veríssimo – verissimo.joaop@gmail.com

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. Este trabalho apresenta a avaliação da qualidade do suprimento de eletricidade do Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes instalado no prédio do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), na Universidade Federal do Pará (UFPA). Os sistemas híbridos são compostos por sistemas de produção de eletricidade a partir de fontes renováveis e não renováveis, acumuladores de energia e atendem diversas cargas, destacando-se uma minirrede de distribuição de energia elétrica e as cargas de iluminação e tomadas/equipamentos do próprio prédio do GEDAE. No presente artigo dá-se ênfase às medições realizadas em três pontos do sistema: entrada e saída de três inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede; saída do grupo gerador a diesel; e quadro de distribuição de iluminação e tomadas/equipamentos do prédio, a fim de avaliar o desempenho dos mesmos dentro do contexto da qualidade de energia de sistemas híbridos de pequeno porte para o suprimento de eletricidade. Como resultado das análises é possível verificar o suprimento adequado da tensão em regime permanente pelos sistemas híbridos, apesar de sua menor capacidade de curto-circuito que a rede principal e a possibilidade de operação ilhada dos sistemas durante interrupções na rede convencional.

Palavras-chave: Minirredes, Sistemas Híbridos, Qualidade da Energia Elétrica.

1. INTRODUÇÃO

As redes de distribuição convencionais mudaram sua estrutura de passiva para ativa após o uso crescente da geração distribuída (GD). De maneira controlada, os processos de geração, distribuição e consumo de energia localizados podem ser executados formando uma minirrede (MR) de energia elétrica que, por sua vez, são compostas por sistemas com fontes de energia renováveis e não renováveis, sistemas de armazenamento, cargas fixas e variáveis, podendo estar conectadas à rede elétrica da concessionária local ou operar em rede isolada (Rahimi, 2016).

Uma MR conectada à rede elétrica principal através de um ponto comum de conexão é vista pela rede principal como um único gerador ou uma única carga. Neste tipo de conexão, uma das principais características da MR é sua capacidade de isolar-se sem causar distúrbios durante uma perturbação na rede da concessionária, com pouca ou nenhuma interrupção para as cargas atendidas pela MR. A MR também deve reconectar-se automaticamente à rede de distribuição quando esta retorna ao estado normal de operação, de modo a sincronizar-se novamente sem causar distúrbios nas cargas ou na rede da distribuidora (IEC, 2014). Além da proteção contra distúrbios externos, a MR também pode se desconectar da rede da concessionária visando à redução de custos, visto que, em determinados horários, como o horário de ponta, a energia é mais cara para algumas classes consumidoras (ANEEL – RN-414, 2012).

Na maioria das vezes as MR são dotadas de sistemas de GD, que estão conectados às MR por meio de interfaces baseadas em eletrônica de potência e, para atingir a característica de operação descrita acima, as MR possuem equipamentos e técnicas de controle que permitem alterações das suas configurações internas e externas, aumentos e reduções da energia adquirida da concessionária, controle de tensão e de potências ativa e reativa, etc. O modo de operação descrito é alcançado pelo uso de sistemas de gerenciamento, de conversores conectados às fontes de produção de eletricidade e outros dispositivos de eletrônica de potência distribuídos pela rede (Falcão, 2009).

As MR têm o intuito de atender às demandas das cargas locais e, para tal, utilizam fontes de energia renováveis, como sistemas fotovoltaicos (SFV), em conjunto com sistemas de armazenamento, como suporte para a operação, a fim de efetuar o balanceamento de energia para otimizar ganhos econômicos, além de melhorar a qualidade e a estabilidade da energia ofertada ao sistema.

Após a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL, em 2012, e sua revisão através da Resolução Normativa 687, em 2015, as instalações de SFV experimentaram crescimento exponencial (Pereira *et al.*, 2017). Apesar dos benefícios adquiridos com a instalação de SFV, como por exemplo, baixo impacto ambiental, menor tempo de implementação, aumento da confiabilidade do atendimento e redução do custo de energia elétrica, alguns autores

revelam a preocupação com a qualidade da energia suprida, principalmente quando há uma alta penetração dos SFV, tendo em vista que os SFV possuem uma capacidade de produção intermitente devido à variação da irradiância solar, de modo que esta oscilação pode propiciar flutuação de potência e de tensão (*flicker*) (Brito *et al.*, 2017). Assim também, os conversores c.c.-c.a. (inversores) que fazem a interconexão com a rede elétrica podem, eventualmente, excitar ressonância harmônica pela interação com a impedância do sistema elétrico (Hu *et al.*, 2015).

Com a forte tendência do crescimento da GD e também a possibilidade de utilização de sistemas híbridos (sistemas que utilizam mais de uma fonte de energia, renovável ou não, para produzir e fornecer energia elétrica), podendo estes operarem conectados à rede ou isolados, é importante a realização de estudos para a avaliação de impactos relacionados à qualidade da energia elétrica, requerendo-se essencialmente o suprimento de eletricidade adequado para as cargas, com a ausência ou a minimização de distúrbios que possam afetar a qualidade da energia elétrica.

Neste trabalho analisa-se a qualidade de energia suprida por dois sistemas híbridos (SH), solar fotovoltaico-diesel de pequeno porte, instalados no prédio do GEDAE, com ênfase na avaliação da conexão à rede de três inversores dos SH, do atendimento pelo grupo gerador a diesel e do suprimento autônomo dos SH atendendo às cargas de iluminação e tomadas/equipamentos do prédio nos momentos de interrupção de energia elétrica pela rede convencional.

2. CARACTERIZAÇÃO DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Os SH analisados neste trabalho estão localizados na Universidade Federal do Pará (UFPA) – Belém, PA – dentro das instalações do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), e têm por finalidade propiciar a pesquisa em sistemas híbridos e MR através de práticas de instalação e comissionamento das tecnologias associadas e, especialmente, através de experimentos e testes de operação para avaliar o desempenho desses sistemas (Barbosa *et al.*, 2016).

Conforme apresentado em Correa (2017), os SH são compostos por:

Sistema de produção de energia. Geração renovável: formada por 7 geradores fotovoltaicos (GFV-01, GFV-02, GFV-03, GFV-04, GFV-05, GFV-06 e GFV-07), com capacidade nominal total de 13,125 kW_p;

Geração não renovável: constituída por um gerador a diesel com capacidade de produção de 12 kVA.

Sistema de condicionamento de potência. 6 inversores de tensão bidirecionais de 4,5 kW cada (INVB-01A, INVB-02A, INVB-03A, INVB-01B, INVB-02B e INVB-03B);

3 inversores de tensão *grid-tie* de 700 W cada (INVG-01, INVG-02 e INVG-03) e 2 inversores de tensão *grid-tie* de 2.000 W cada (INVG-04 e INVG-05);

2 controladores de carga (CCA-01 e CCA-02) conectados respectivamente ao GFV-04 e ao GFV-05 (somando 6 kW_p de potência instalada).

Sistema de armazenamento de energia. 2 bancos de baterias (BB-01 e BB-02) com 24 baterias de 2 kWh cada, com capacidade total de 48 kWh cada banco.

Cargas elétricas. 11 refletores LED (diodo emissor de luz) de 20 W cada;

1 carga bifásica eletrônica programável com capacidade de até 3,6 kW;

1 carga trifásica resistiva com potência dissipada de até 20 kW;

O próprio prédio do GEDAE com o suprimento de seus circuitos de iluminação e tomadas/equipamentos.

Para interligar os sistemas de geração, proteção e cargas, a MR do GEDAE possui uma rede aérea trifásica com cerca de 1 km de comprimento linear, provida de 18 postes de concreto de 7 metros de altura e cabeamento com condutores de alumínio multiplex de 35 mm² (4 condutores - 3 fases e 1 neutro), além de contadoras e chaves auxiliares para atuação remota (Correa, 2017). A Fig. 1 apresenta o croqui com a disposição da MR.

A Fig. 2 apresenta o diagrama esquemático atual dos principais componentes dos SH do GEDAE/UFPA, que estão distribuídos nas áreas interna e externa ao prédio do GEDAE. Os itens 1, 2 e 3 destacados na Fig. 2 são os pontos dos SH que serviram como estudo de qualidade da energia elétrica (QEE) neste trabalho.

Uma importante característica do sistema implantado é a possibilidade de alimentação das cargas de iluminação e tomadas do prédio do GEDAE, pois, na ausência de energia elétrica da rede de distribuição convencional, os circuitos de iluminação e tomadas/equipamentos são supridos pela produção dos SH ou pelos seus bancos de baterias, proporcionando continuidade nos trabalhos que estão sendo realizados no prédio. A comutação da rede externa para os SH é feita através da chave estática trifásica de transferência automática (Fig. 3).

Os estudos realizados nos SH tiveram como foco principal o comportamento dos três inversores Sunny Boy (INVG-01, INVG-02 e INVG-03) (bloco 1 da Fig. 2), que estão conectados aos três geradores fotovoltaicos (GFV-01, GFV-02 e GFV-03), respectivamente, conforme especificações da Tab. 1. Também são avaliados o fornecimento de energia pelo grupo gerador a diesel (bloco 3 da Fig. 2), e o atendimento das cargas de iluminação (reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares, em sua maioria) e tomadas (que alimentam computadores, em sua maioria) do

prédio do GEDAE (bloco 2 da Fig. 2), pelos SH através da comutação da chave estática em caso de ausência da rede principal da UFPA.

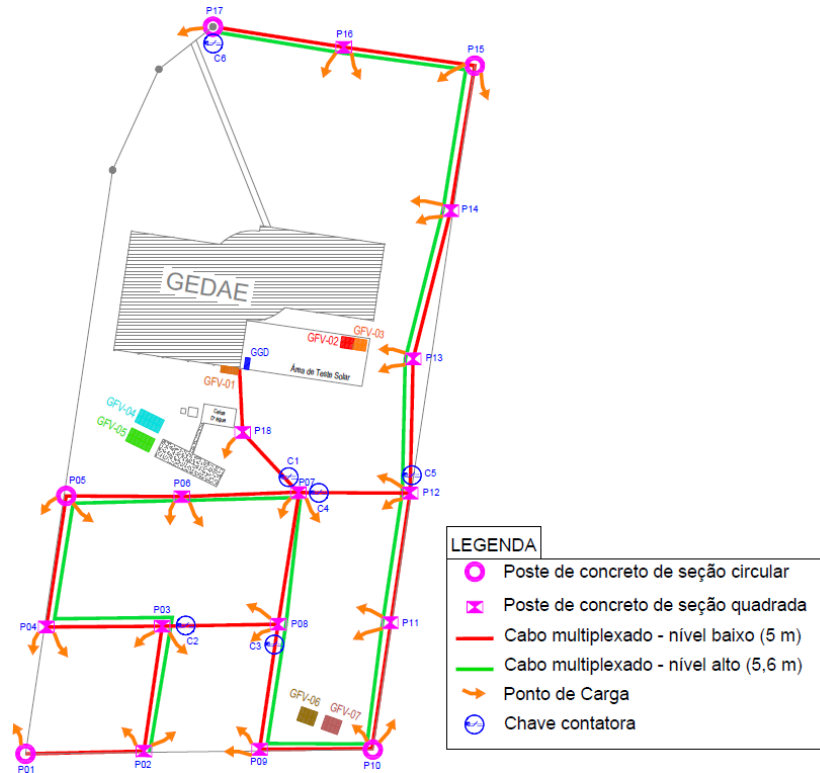


Figura 1 - Disposição da minirrede do GEDAE.

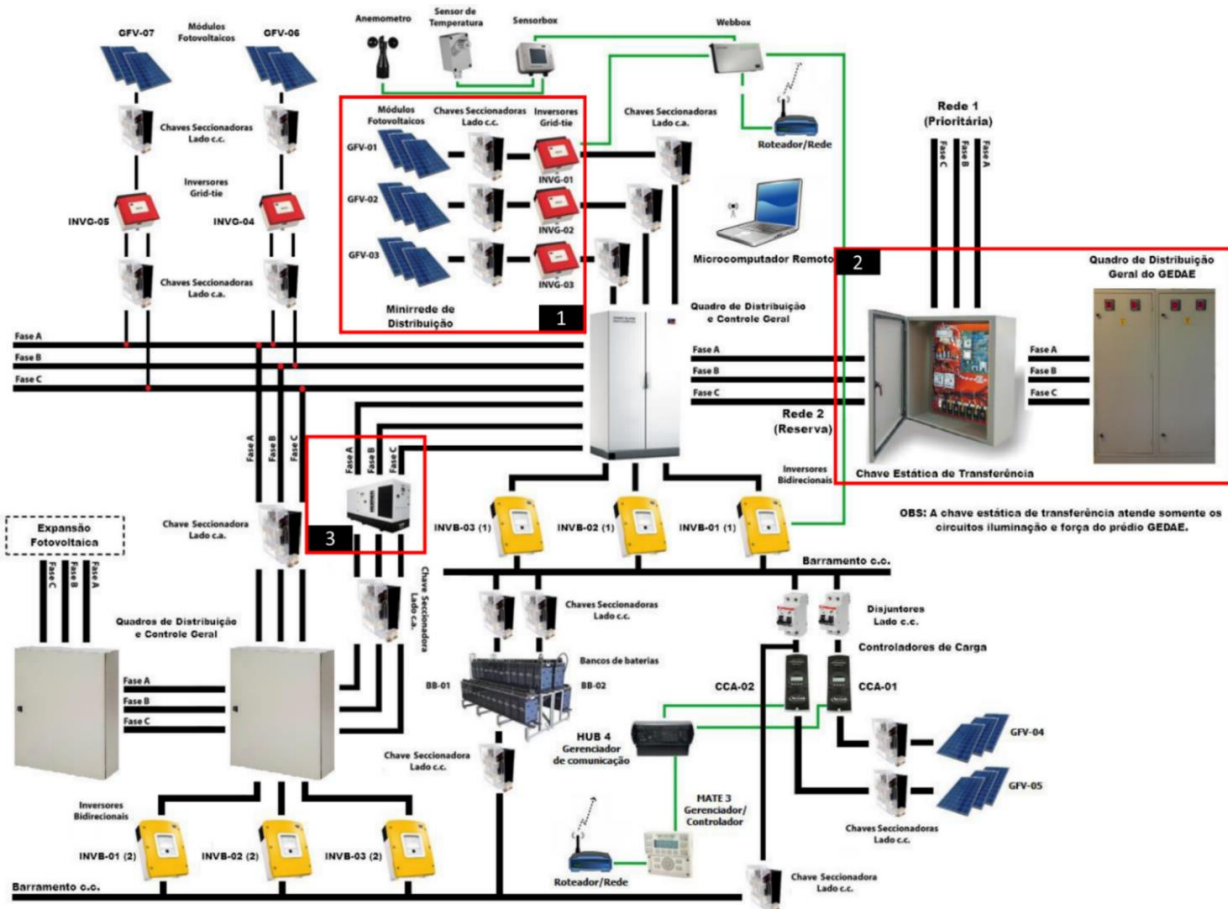


Figura 2 - Diagrama esquemático do Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes (GEDAE/UFPA).

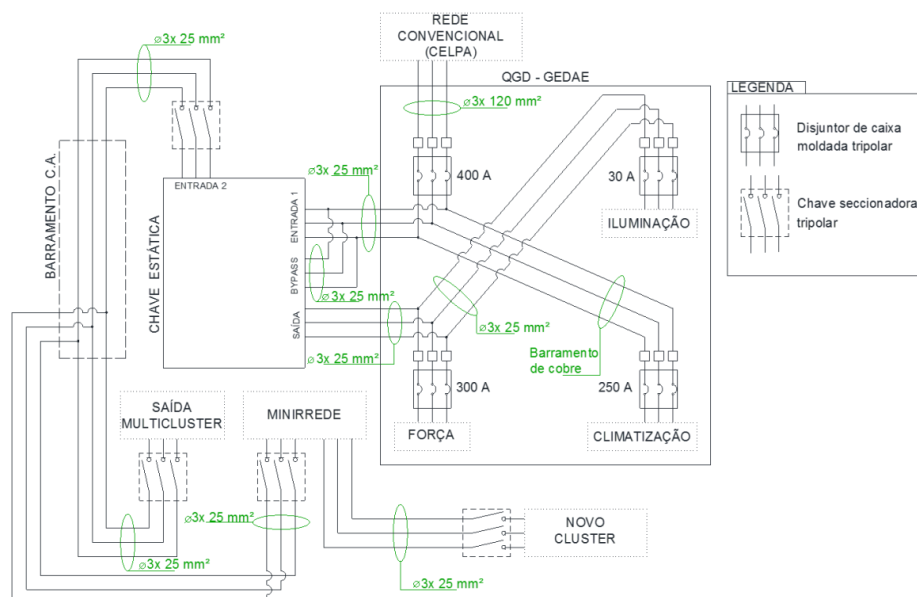


Figura 3 - Diagrama de conexão da chave estática.

Tabela 1 - Características dos geradores e inversores.

GFV-01	GFV-02 e GFV-03 (idênticos)
- Modelo: YL 185 P-23b - Fabricante: YINGLI - Quantidade: 5 módulos - Conexão: em série - Pmp: 0,925 kW_p* - Vmp: 117,5 V* - Imp: 7,87 A* - Voc: 147,5 V* - Isc: 8,45 A*	- Modelo: SPR-220-BLKU - Fabricante: SUNPOWER - Quantidade: 5 módulos - Conexão: em série - Pmp: 1,1 kW_p* - Vmp: 205 V* - Imp: 5,37 A* - Voc: 243 V* - Isc: 5,85 A*
*Nas Condições Padrão de Teste (STC – do inglês <i>Standard Test Conditions</i>): 1.000 W/m² e 25 °C.	
INVG-01 / INVG-02 / INVG-03	
- Modelo: 700U - Fabricante: SMA - Potência: 700 W	



3. MEDIÇÕES DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A Resolução Normativa N° 687 da ANEEL, 2015 estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica (ANEEL – RN 687, 2015) e, além desta, o acessante deve seguir os procedimentos técnicos e operacionais conforme Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que, por sua vez, menciona que os valores de referência a serem adotados para os indicadores: tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência, que estão estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST (PRODIST, 2016). Em relação ao equipamento para conexão à rede (inversores), a norma ABNT NBR 16149 estabelece as recomendações específicas para a interface de conexão entre os sistemas fotovoltaicos e a rede de distribuição.

3.1. Inversores

Para as medições de QEE nos inversores Sunny Boy (INVG-02, INVG-03 e INVG-01) foram utilizados um wattímetro (Digital Power Meter – Fabricante: Chroma; Modelo 66204 com exatidão de 0,1 % para medição de potência ativa na faixa de frequência utilizada), obtendo-se registros de potência ativa na entrada e saída dos inversores a cada segundo, e os dados integralizados a cada minuto, bem como um *datalogger* (Sol.connect meter mpp, Fabricante:

Papendorf Software Engenniering) para aquisição de dados de irradiância solar incidente no plano do arranjo fotovoltaico e temperatura na parte posterior de um dos módulos do arranjo.

As medições nos inversores foram realizadas em três dias consecutivos no mês de setembro de 2017, das 08h30 às 17h45. O local de instalação dos geradores fotovoltaicos possui alguns obstáculos no entorno (árvores e edificação) que provocam o sombreamento nos geradores tanto no período inicial do dia, quanto no final da tarde. Como os comportamentos dos inversores nos três dias são similares, para efeito de ilustração dos resultados, na Fig. 4 são apresentados apenas os dados medidos no inversor INVG-03, que apresenta uma curva diária característica da potência elétrica ativa do sistema fotovoltaico em que a geração acompanha a irradiância solar, com exceção do início da manhã, devido ao sombreamento do gerador.

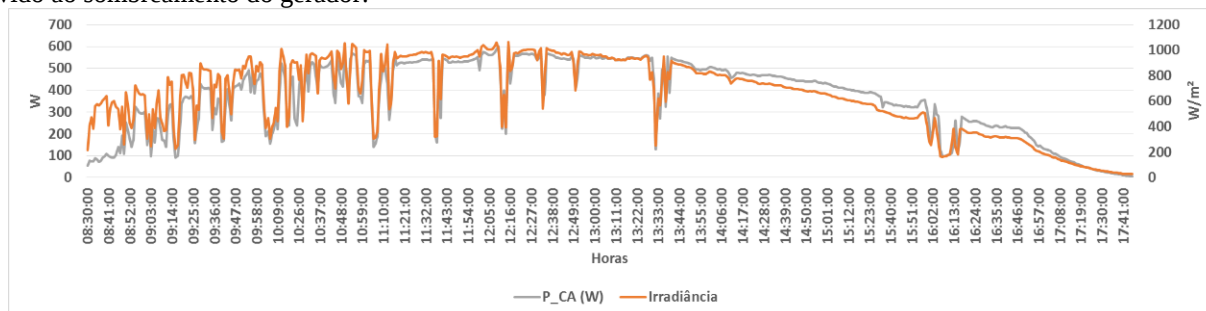


Figura 4 - Potência elétrica ativa na saída do inversor INVG-03 e irradiância solar incidente no arranjo fotovoltaico correspondente.

Para avaliar a eficiência dos inversores Sunny Boy o fabricante disponibiliza curvas de eficiência baseadas no nível de tensão c.c. de operação. De acordo com a Tab. 1, o GFV-01 possui tensão nominal diferente do GFV-02 e do GFV-03. Logo, para efeito de comparação de eficiência dos inversores, foram utilizadas as curvas de tensão de 125 Vcc e 200 Vcc, respectivamente. Apesar da diferença de tensão existente entre os inversores, eles apresentaram o mesmo comportamento quando comparados aos dados do fabricante. Assim sendo, na Fig. 5 é apresentada apenas a curva de eficiência do inversor INVG-03. Da Fig. 5 pode-se observar que a eficiência do fabricante está maior do que a eficiência medida; contudo, tal resultado era esperado, visto que a curva de eficiência do fabricante foi realizada em laboratório sob condições padrão, com tensão de entrada c.c. constante, além da possibilidade de haver discrepância na exatidão dos aparelhos utilizados nas medições.

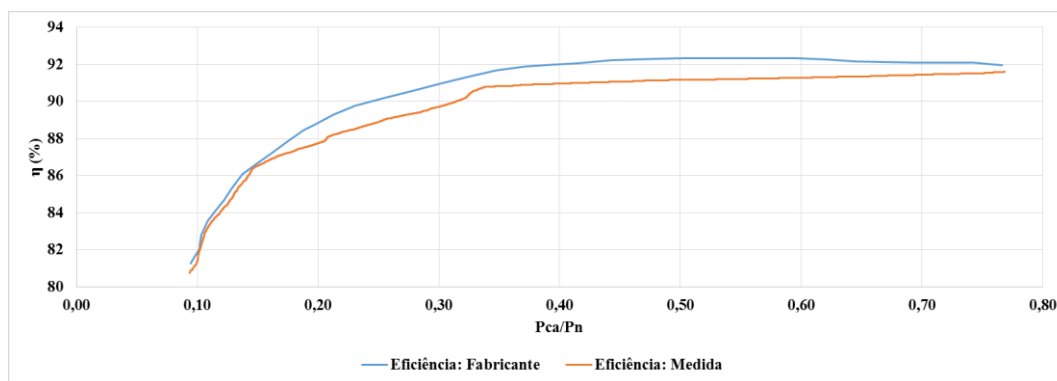


Figura 5 - Curva de eficiência do inversor INVG-03.

O manual do fabricante não apresenta dados de perdas da conversão, impossibilitando efetuar comparações com as medições. Porém, na Fig. 6 é possível visualizar que existe uma perda superior a 50 W para valores de carregamento acima dos 75 %.

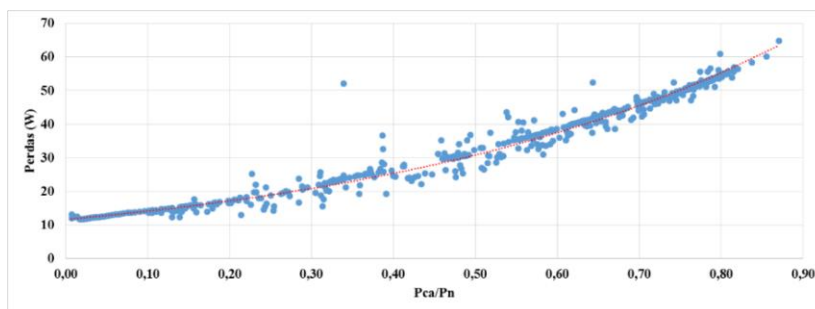


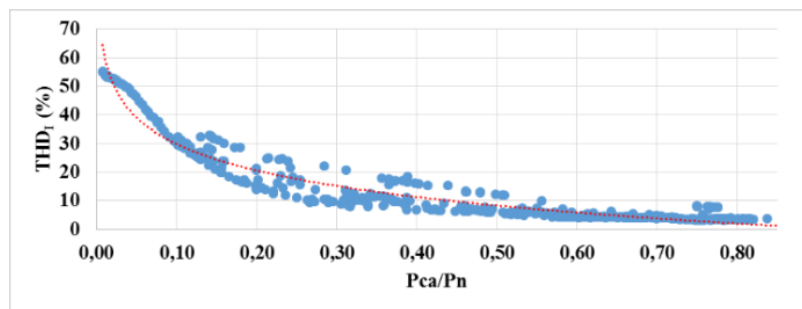
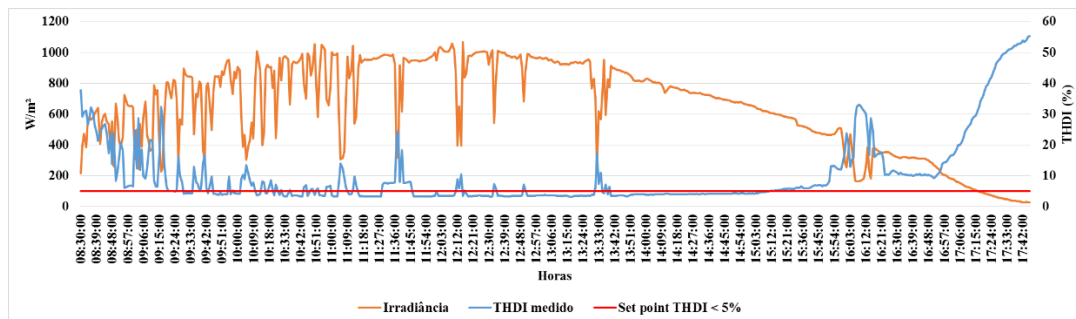
Figura 6 - Perdas no inversor INVG-03.

A NBR 16149 estabelece que os níveis de harmônicos individuais dos inversores estejam dentro dos limites estabelecidos na Tab. 2 e que a distorção harmônica total (THD, do inglês – *Total Harmonic Distortion*) de corrente seja inferior a 5 % em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor (ABNT, 2013).

Tabela 2 - Limite de distorção harmônica de corrente.

Harmônicos ímpares	3° a 9°	11° a 15°	17° a 21°	23° a 33°
Limite de distorção	< 4,0 %	< 2,0 %	< 1,5 %	< 0,6 %
Harmônicos pares	2° a 8°	10° a 32°	-	-
Limite de distorção	< 1,0%	< 0,5 %	-	-

Os inversores INVG-01, INVG-02 e INVG-03 apresentam baixa THD_i quando operam próximo à potência nominal, conforme estabelecido na NBR 16149. Contudo, quando operam sob baixos valores de carregamento (Fig. 7), o valor de 5 % é ultrapassado sempre que a irradiância solar está baixa (Fig. 8). Tal situação ocorre no início do dia, no final da tarde, e quando o Sol é encoberto por nuvens. Haja vista que as correntes geradas nestes instantes são pequenas, devido à baixa geração, os efeitos na rede não são significativos. Contudo, caso existam diversos inversores injetando correntes com alto THD_i , os circuitos podem eventualmente apresentar problemas de QEE, podendo ocasionar prejuízos em equipamentos elétricos mais sensíveis (Falcão *et al.*, 2017).

Figura 7 - Variação da THD_i com o nível de carregamento (INVG-03).Figura 8 - Acompanhamento da THD_i na saída do INVG-03 ao longo de um dia.

A NBR 16149 estabelece parâmetros para a variação de frequência de inversores fotovoltaicos (FV) conectados à rede. A variação aceitável para o funcionamento do sistema está entre 59,9 Hz e 60,5 Hz, mas a norma também trata as exceções para valores tanto acima, quanto abaixo dos limites aceitáveis (NBR 16149, 2013). Os inversores INVG-01, INVG-02 e INVG-03 sincronizam com a rede elétrica operando com frequência entre 59,3 Hz e 60,5 Hz. A fim de direcionar o fluxo de energia da rede dos SH, o Sunny Island (*master*) gerencia a frequência do sistema entre 55 Hz e 65 Hz. Com isto, o gerenciador monitora a demanda do sistema, o estado de carga do banco de baterias e os geradores FV. Os inversores dos geradores FV funcionam sempre que houver demanda de energia para as cargas e o banco de baterias não esteja cheio, pois, caso o estado de carga do banco seja máximo, o Sunny Island eleva a frequência da rede, ocasionando a redução da potência ou a interrupção da geração pelos inversores conectados à rede. Nas condições de operação com frequência nominal, o tempo de interrupção dos inversores até que estes voltem a reconectar-se fica abaixo de 300 segundos, atendendo aos requisitos da NBR 16149.

3.2. Operação do grupo gerador a diesel

O grupo gerador a diesel (GGD) conectado aos SH tem por finalidade formar a rede quando solicitado pelo Sunny Island, a fim de carregar o banco de baterias. O GGD entra em funcionamento no caso dos SH estarem operando em

modo isolado, ou em ilha. Além da energia elétrica produzida pelo GGD necessitar de fonte não renovável e ser uma das mais poluentes, possui custos de manutenção mais elevados. Logo, o uso do GGD deve ser minimizado e sempre que o funcionamento do mesmo for necessitado, este também deve atender a rede com tensões de fase e frequência de forma adequadas quanto à QEE.

Nas Fig. 9(a) e 9(b) são ilustradas as formas de onda de tensão e corrente em cada fase e os parâmetros elétricos medidos na saída do GGD atendendo cargas resistivas e mistas (banco de resistências e conjunto de lâmpadas na fase A). A potência da carga medida é equivalente a cerca de 38 % da capacidade do GGD e, com isto, não foi possível verificar distúrbios no sistema medido (como THD de tensão elevada, desequilíbrio na tensão, variação de frequência, etc.), mas enfatiza-se que, em geral, mesmo com maior carregamento, devido ao GGD possuir controle microprocessado, há a regulação da amplitude da tensão e da frequência de suprimento.

Quanto ao atendimento de cargas não lineares em situações maiores de carregamento do GGD, medições futuras serão realizadas a fim de verificar o impacto na THD de tensão.

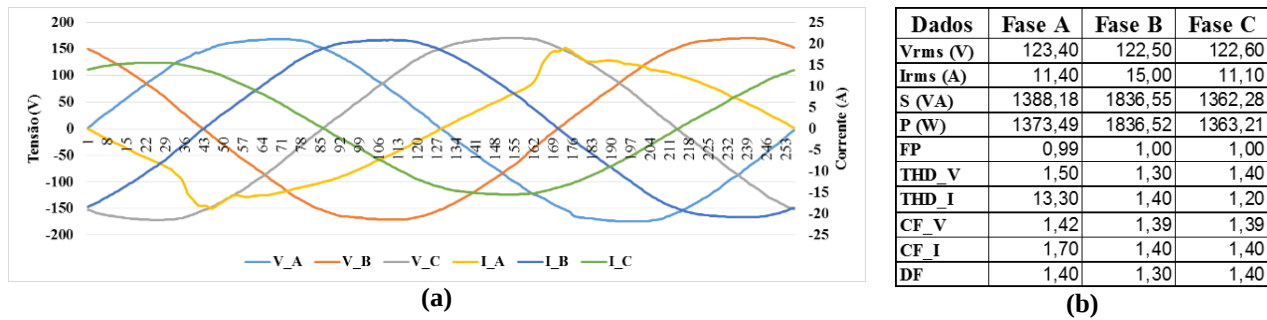


Figura 9 - (a) Modelo de curva e (b) dados de medição do GGD com carga.

3.3. Atendimento das cargas do prédio

Esta seção apresenta as medições efetuadas no quadro de distribuição do prédio do GEDAE, no circuito atendido pelos SH, ou seja, circuito desconectado da rede externa e atendido na operação de forma ilhada pelos inversores Sunny Island. Utilizou-se o instrumento de medição PowerPad (Modelo: 3945-B, Fabricante: AEMC Instruments) para capturar as condições de operação das cargas do prédio e tensão de suprimento em regime permanente e dos transientes ocorridos durante entrada e saída das cargas. Por meio das medições foi possível averiguar o comportamento das cargas enquanto atendidas pelos SH e no instante da transferência da rede da concessionária de energia elétrica para os SH e vice-versa. Também foram monitoradas a entrada e a saída das cargas de iluminação (reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes tubulares, em sua maioria) e tomadas/equipamentos (computadores e instrumentos eletrônicos diversos) de cada bloco do prédio.

A Fig. 10(a) apresenta a forma de onda de tensão e o perfil característico da corrente das cargas por fase, e no quadro da Fig.10(b) apresentam-se os parâmetros elétricos obtidos com o atendimento ao agrupamento do circuito de iluminação e tomadas/equipamentos. A seguir avalia-se o atendimento das cargas pelos SH relacionado às variações de tensão de longa e curta duração, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

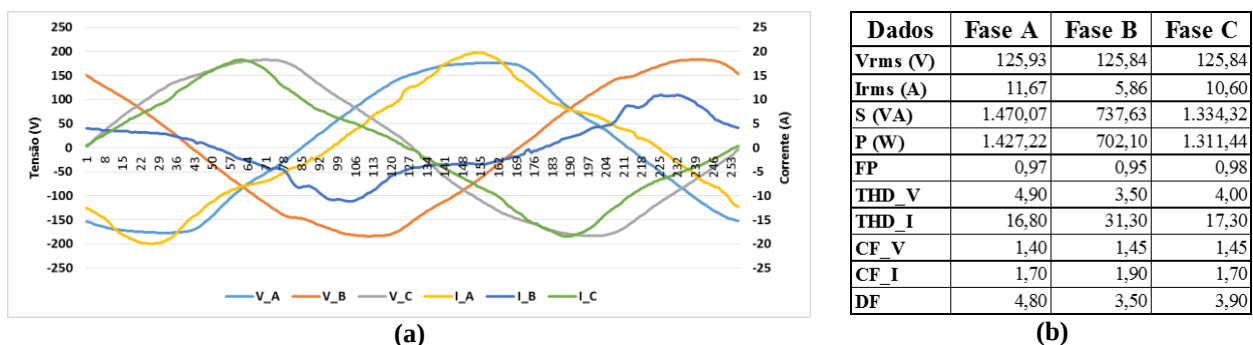


Figura 10 - (a) Modelo de curva e (b) dados de medição das cargas de iluminação e tomadas/equipamentos do prédio.

Tensão em regime permanente. As medições efetuadas nos três pontos dos SH estão conectadas ao mesmo ponto de acoplamento. Logo, os níveis de tensão detectados possuem valores e características similares, estejam as cargas atendidas pelo Sunny Island ou pelo GGD. No caso de operação isolada dos SH, o Sunny Island faz o gerenciamento da rede e, caso o estado de carga do banco de baterias fique reduzido, o Sunny Island aciona o GGD para formar a rede e

também recarregar o banco de baterias. O PRODIST estabelece os limites de tensão em regime permanente como adequado, precário ou crítico (Tab. 3). De acordo com a monitoração, a faixa de tensão nas três fases permanece próxima ao valor nominal de 127 Vrms, sendo classificada como adequada.

Tabela 3 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Distorções harmônicas. As componentes harmônicas de tensão e corrente podem ser originadas por diversos fatores, como a presença de componentes e cargas não lineares no sistema de distribuição (Bollen, 2006). O PRODIST caracteriza as distorções harmônicas através da deformação nas formas de onda da tensão e corrente em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST, 2016). Durante a operação desconectada da rede externa principal, isto é, enquanto o sistema é operado pelo Sunny Island, os SH possuem menor capacidade de curto-circuito que a rede principal. Logo, a tensão de saída tende a apresentar valores de THD_V maiores. Mesmo assim, conforme valores apresentados na Fig. 10(b) para o atendimento da demanda característica dos circuitos de iluminação e tomadas/equipamentos, os valores de THD_V das três fases ficam abaixo de 10 %. Além disto, observa-se que, por ter maior carregamento, a fase A apresenta maior valor de THD_V.

Desequilíbrio de tensão (DF). O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões. Para níveis de tensão menores ou iguais a 1 kV, o PRODIST estabelece que o valor do indicador DF95% deve ser de no máximo 3 %, correspondente ao valor do indicador DF% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas (PRODIST, 2017). Assim, futuramente serão realizadas monitorações obtendo-se no mínimo 1008 leituras válidas em intervalos de integração de 10 minutos, a fim de melhor avaliar o comportamento do indicador DF, pois devido ao desbalanceamento das cargas do prédio, o sistema opera com desequilíbrio na tensão, conforme medição pontual (correspondente ao perfil típico da carga) apresentada na Fig. 10(a).

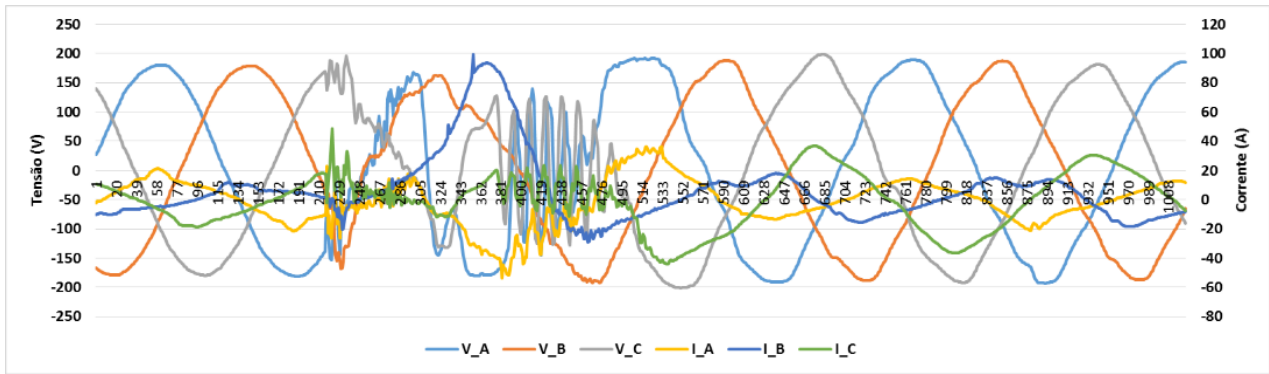
Variação de tensão de curta duração (VTCD). Analisando o suprimento dos circuitos de iluminação e tomadas/equipamentos são verificadas VTCD em duas situações diferentes de funcionamento dos SH, sendo uma durante a transição da chave estática da rede externa da concessionária para os SH e vice-versa, e outra durante a entrada e saída de cargas no circuito de iluminação.

As medições foram realizadas com o instrumento PowerPad 3945-B, que registra um ciclo antes do transiente detectado e dois após o mesmo, proporcionando a verificação do *status* do sistema antes e após o distúrbio. A comutação da rede da concessionária para os SH, assim como o inverso, normalmente é realizada de forma automática e instantânea e, com isso, eventualmente há a possibilidade da ocorrência de transição fora de fase entre as redes.

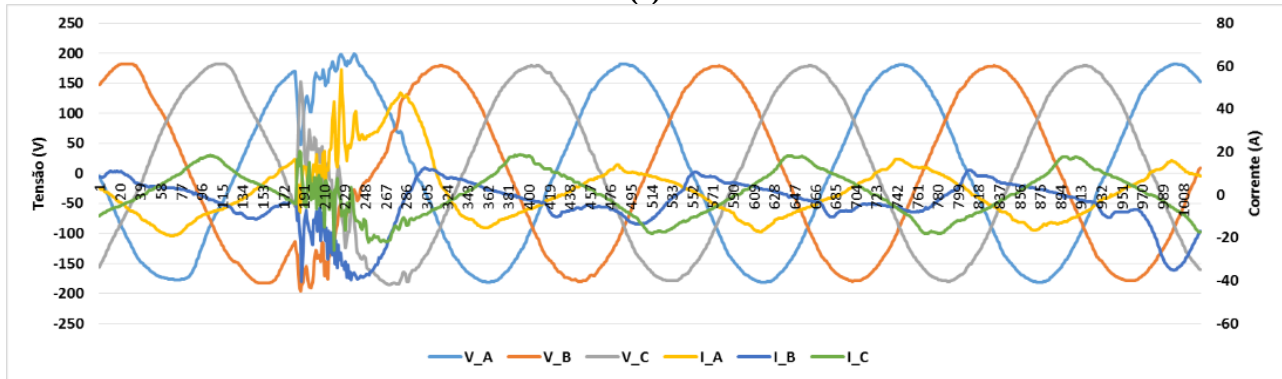
Para fins de medição e registro dos dados de transientes durante a transferência pela chave estática, efetuou-se o acionamento da mesma no modo manual. Na Fig. 11(a) observa-se um evento de mudança de suprimento da rede externa para os SH. As tensões nas fases são afetadas durante a transição entre as redes e, neste caso, a corrente da Fase B atingiu valor de pico de corrente de quase 100 A, contra o valor de pico de 20 A na situação normal de operação. No evento apresentado na Fig. 11(b), a transição ocorreu de forma mais suave (pequena defasagem entre as tensões de rede), havendo maior variação na amplitude da corrente da fase A, que durante a transição saiu de seu valor de pico de 20 A para 50 A, aproximadamente. Devido à sua rapidez, estes eventos normalmente são absorvidos por componentes do circuito e não se propagam muito além da fonte geradora, o que explica as alterações de sua característica de um local para outro. Entretanto, estes distúrbios podem excitar os circuitos ressonantes do sistema de energia para produzir outro tipo de transiente como os oscilatórios (Maia, 2011).

Na Fig. 12 apresenta-se o registro da ocorrência da transição da rede da concessionária para os SH, mas neste caso há uma maior defasagem na tensão entre as redes (concessionária e SH). Assim, após o acionamento da chave estática e transferência das cargas para os SH, ocorreu o desarme do disjuntor da fase A do conversor *master*. A desenergização do *master* é efetuada por proteção, através do disjuntor (*slave* 1), e este, por sua vez, desenergiza a contatora que permite a alimentação elétrica das cargas através dos SH.

O sistema de iluminação do prédio do GEDAE é dividido em três blocos internos e mais a iluminação externa. Na Fig. 13 apresenta-se um caso de suprimento dos circuitos de iluminação pelos SH e acionamento de cargas de iluminação nas fases A e B, havendo a ocorrência de elevação na corrente em ambas as fases durante meio ciclo. Neste caso, a corrente eleva-se em sete vezes mais que seu valor em regime, além de proporcionar um recorte durante meio ciclo na tensão, devido ao evento transiente impulsivo na corrente das cargas.



(a)



(b)

Figura 11 - Transientes da comutação da chave estática (a) rede externa para os SH; (b) SH para a rede externa.

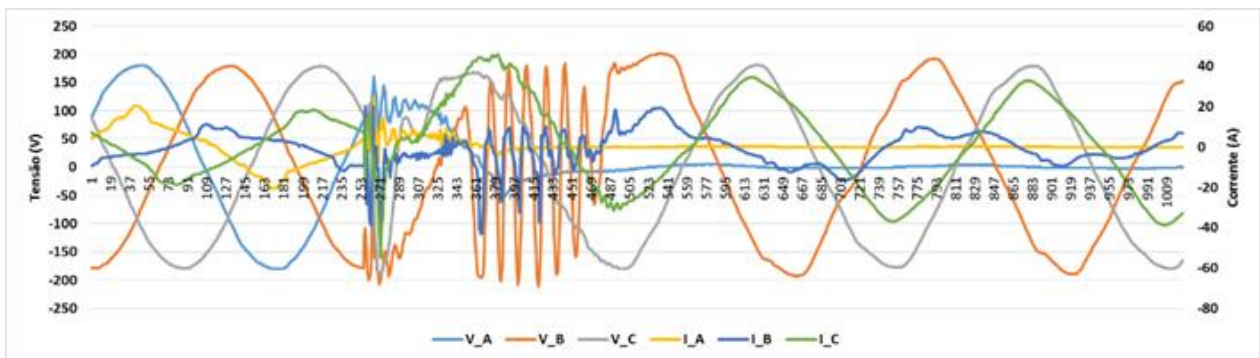


Figura 12 - Transiente da comutação da chave estática da rede externa para os SH (com desarme).

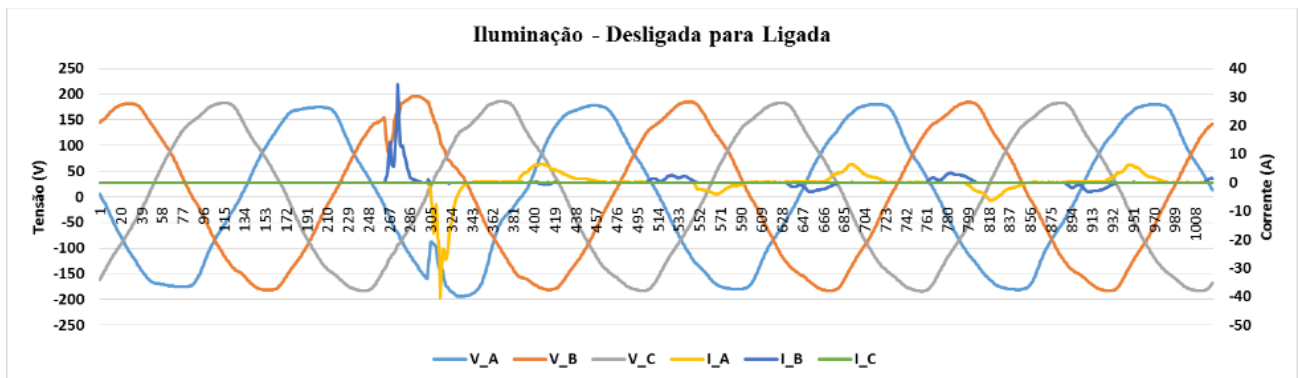


Figura 13 - Medição de transiente do sistema de iluminação – Entrada de carga.

4. CONCLUSÃO

A análise dos parâmetros relacionados à QEE nos pontos de medição apresentados neste artigo, concernente ao Laboratório de Sistemas Híbridos e Minirredes instalado no GEDAE/UFPA, enfatiza a necessidade de manter um suprimento adequado da qualidade de energia. Quanto ao suprimento isolado da rede elétrica convencional da UFPA, é possível verificar que o barramento c.a. dos SH é mais afetado pelo fato do sistema possuir menor capacidade de curto-circuito. Contudo, tanto a tensão de suprimento em regime permanente dos inversores bidirecionais quanto do GGD apresentam níveis aceitáveis para o atendimento dos SH, ou seja, quando operando de forma ilhada, os SH do GEDAE/UFPA apresentam, em geral, bons rendimentos operacionais e não apresentam impactos negativos diretos nos parâmetros de QEE.

Contudo, nas instalações do sistema tratado neste trabalho, um problema encontrado que ainda está em estudo, é o eventual desarme do disjuntor do conversor *master* durante a transição da chave estática da rede externa para os SH, e vice-versa. Apesar da falha não ocorrer sempre que a chave de transferência atua, busca-se mitigar este problema, pois em caso de necessidade de utilização da geração dos SH para fornecer energia para as cargas do prédio, poderia casualmente haver um desarme e cargas essenciais poderiam ficar sem o suprimento de energia.

A forte tendência do crescimento da GD mostra a importância de estudos como este, onde há também a possibilidade do sistema operar de forma ilhada da rede convencional, sendo fundamental como alternativa de suprimento de cargas essenciais ou prioritárias na ausência ou interrupção da rede elétrica convencional.

Agradecimentos

Os Autores agradecem o apoio do CNPq para a realização do presente trabalho, no âmbito do projeto “Estudo de Minirredes Inteligentes Aplicadas a Sistemas Isolados e Interconectados”, aprovado na Chamada MCTI/CNPq/CT-ENERG Nº 33/2013 – Tecnologia em *Smart Grids*.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. “NBR 16149: Sistemas Fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição”.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa Nº 414, de 09 de Setembro de 2010. Brasília, 2012
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015. Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015. Brasília.
- Barbosa, C. F. O.; Verissimo, P. H. A.; Pinho, J. T.; Correa, J. A. L.; Galhardo, M. A. B., 2016. Laboratório de Sistemas Híbridos de Energia e Minirredes (Implementação e Ensaios Operacionais). VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Bollen, M. H. J.; Gu, I. Y. H., 2006. Signal Processing of Power Quality Disturbances. IEEE PRESS Series on Power Engineering, Wiley-IEEE Press, p. 225-228; 419-427.
- Brito, R. R.; Ferreira, S. C.; Silva, J. P., *et al.*, 2017. Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Instalados na UFLA. 12ª Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Curitiba, PR.
- Correa, J. A. L., 2017. Implantação e avaliação de desempenho de dois geradores fotovoltaicos conectados diretamente no barramento C.C. de um sistema híbrido de energia. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará (UFPA). Belém, PA.
- Falcão, Djalma M., 2009. Smart Grids e Microrredes: O Futuro Já é Presente. VIII Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos. Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- Hu, H.; Shi, Q.; He, Z.; He, J.; Gao, S., 2015. Potential Harmonic Resonance Impacts of PV Inverter Filters on Distribution Systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 6, no. 1.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 2014. Microgrids for disaster preparedness and recovery. Genebra, Suíça.
- Maia, R. M., 2011. Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, MG.
- Falcão, M. C.; Machado, L. O. M.; Júnior, D. P., *et al.*, 2017. Avaliação da Distorção Harmônica de Tensão e Corrente em uma Instalação com Geração Fotovoltaica. 12ª Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Curitiba, PR.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves A. R., *et al.*, 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. 2ª Edição. São José dos Campos, SP.
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), 2016. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.
- Rahimi, K.; Mohajveryami, S.; Majzoobi, A., 2016. Effects of Photovoltaic Systems on Power Quality. Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). Cairo, Egito.

POWER QUALITY IN THE LABORATORY OF HYBRID SYSTEMS AND MINIGRID OF GEDAE/UFPA

Abstract. *This paper presents the evaluation of power quality in the Laboratory of Hybrid Systems and Minigrids installed in the building of the Group of Studies and Development of Energy Alternatives (GEDAE), at the Federal University of Pará (UFPA). The hybrid systems are composed of systems with renewable and nonrenewable generation sources, and energy accumulators, and supplies several loads, highlighting a minigrid for electricity distribution and the lighting and outlets (equipment) loads of GEDAE's building. In this article emphasis is placed on the measurements made in three points of the system: input and output of three grid-connected inverters; output of the diesel generator; and the distribution board of lighting and outlets/equipment of the building, in order to evaluate the their performance within the context of the power quality of small hybrid systems for electricity supply. From the analysis results, it is possible to verify the adequate supply of the steady state voltage of the hybrid systems, in spite of their smaller short-circuit capacity when compared to the main grid and the possibility of their isolated operation during interruptions in the conventional grid.*

Keywords: Minigrid, Hybrid Systems, Power Quality.