

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA INTERCONEXÃO DE MICRORREDES ISOLADAS EXPERIMENTAIS

Luana Oliveira de Albuquerque (UFPA) - luanaalbuquerque.loa@gmail.com

TALES VINICIUS PINHEIRO SILVA (UFPA) - talesvpinheiro@gmail.com

CLAUDOMIRO FABIO DE OLIVEIRA BARBOSA (GEDAE/UFPA) - cfob@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo (GEDAE-UFPA) - wnmacedo@ufpa.br

João Tavares Pinho (GEDAE/UFPA) - jtpinho@ufpa.br

Marcos André Barros Galhardo (GEDAE/UFPA) - marcos.galhardo@gmail.com

Resumo:

Este trabalho apresenta a avaliação da qualidade do suprimento de energia elétrica na interconexão de duas microrredes isoladas experimentais pertencentes ao Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará. A avaliação dos fenômenos monitorados relacionados à qualidade do produto (tensão de suprimento), segundo as diretrizes do Módulo 8 do PRODIST, tomou como base um sistema elétrico cuja configuração reúne conjuntos de geração fotovoltaica no lado c.c. e geração diesel-elétrica no lado c.a., armazenamento de energia em bancos de baterias, condicionamento de potência c.c./c.c. e c.c./c.a (unidirecional e bidirecional), microrredes de distribuição c.a. e c.c. e cargas diversas. De acordo com os resultados obtidos neste estudo, o sistema elétrico implementado apresenta capacidade para atender diversas cargas, respeitando a sua capacidade de produção de energia, sem a deterioração da qualidade da energia elétrica produzida, como, por exemplo, mantendo os valores de tensão eficaz e de desequilíbrio de tensão dentro dos limites normativos. Por sua vez, os distúrbios nos quais foram encontradas disparidades quanto aos limites definidos no Módulo 8 do PRODIST são provenientes de configurações intrínsecas do sistema em análise, implicando, por exemplo, em variação da frequência de suprimento e no fator de potência em diferentes pontos do sistema.

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

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos*

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NA INTERCONEXÃO DE MICRORREDES ISOLADAS EXPERIMENTAIS

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

Tales Vinícius Pinheiro da Silva – talesvpinheiro@gmail.com

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

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

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

4.4. Controle e monitoramento de sistemas fotovoltaicos

Resumo. Este trabalho apresenta a avaliação da qualidade do suprimento de energia elétrica na interconexão de duas microrredes isoladas experimentais pertencentes ao Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará. A avaliação dos fenômenos monitorados relacionados à qualidade do produto (tensão de suprimento), segundo as diretrizes do Módulo 8 do PRODIST, tomou como base um sistema elétrico cuja configuração reúne conjuntos de geração fotovoltaica no lado c.c. e geração diesel-elétrica no lado c.a., armazenamento de energia em bancos de baterias, condicionamento de potência c.c./c.c. e c.c./c.a (unidirecional e bidirecional), microrredes de distribuição c.a. e c.c. e cargas diversas. De acordo com os resultados obtidos neste estudo, o sistema elétrico implementado apresenta capacidade para atender diversas cargas, respeitando a sua capacidade de produção de energia, sem a deterioração da qualidade da energia elétrica produzida, como, por exemplo, mantendo os valores de tensão eficaz e de desequilíbrio de tensão dentro dos limites normativos. Por sua vez, os distúrbios nos quais foram encontradas disparidades quanto aos limites definidos no Módulo 8 do PRODIST são provenientes de configurações intrínsecas do sistema em análise, implicando, por exemplo, em variação da frequência de suprimento e no fator de potência em diferentes pontos do sistema.

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

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável e o efeito estufa tem modificado o processo de produção de energia elétrica, outrora baseado no uso de fontes convencionais de origem fóssil ou de grande impacto ambiental, utilizando fontes renováveis, tais como a solar fotovoltaica e a eólica, que podem ser integradas a outras fontes, formando um Sistema Híbrido de Energia (Barbosa *et al.*, 2016).

É importante destacar ainda que o emprego destes sistemas baseados nos recursos solar, eólico, biomassa, etc. está modificando as redes convencionais de energia elétrica, as quais possuem clara distinção entre a geração, transmissão, distribuição e consumidores de energia elétrica. Nestas a eletricidade é predominantemente produzida de forma centralizada em grandes usinas e, em seguida, transmitida a longas distâncias para as subestações, de onde é distribuída para os consumidores. Na Geração Distribuída (GD), a produção de energia elétrica ocorre junto ao consumidor final, o que implica em alguns benefícios, como: redução e/ou postergação dos investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; redução do carregamento de transformadores e da própria rede; redução das perdas por efeito Joule; aumento da confiabilidade do sistema; redução dos impactos ambientais, dentre outros (Lucchese *et al.*, 2018).

Esse tipo de produção beneficia não somente os consumidores já atendidos pelo sistema de distribuição convencional, como também, o percentual da população atendida por intermédio de microrredes de distribuição alimentadas por geradores a diesel (típica forma de eletrificação de locais remotos) e que podem utilizar a geração distribuída ao longo da microrrede para diminuir o carregamento e reduzir as perdas, por exemplo.

Mesmo com inúmeras vantagens, a inserção de GD na rede pode, em alguns casos, acarretar impactos negativos, relacionados principalmente à qualidade de energia elétrica, como o aumento das componentes harmônicas (devido à grande quantidade de dispositivos de eletrônica de potência no sistema), variações na frequência (quando há excedente de geração em relação à quantidade de cargas do sistema) e aumento do desequilíbrio de tensão entre as fases, para o caso de GD com conexão monofásica (Bastos, 2015).

Com a abrangência do uso da GD em microrredes, tanto em aplicações de sistemas conectados à rede elétrica convencional quanto em sistemas isolados, tem crescido o interesse de estudos na área de qualidade de energia elétrica, objetivando a investigação dos impactos causados por esse tipo de geração na rede de distribuição e a identificação de eventuais distúrbios no sistema de suprimento ao consumidor final (Paixão Júnior *et al.*, 2018).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), regulamenta os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, quanto à qualidade do produto, do serviço prestado e do tratamento de reclamações. No que se refere à qualidade do produto são definidos principalmente os indicadores, os limites ou valores de referência, e a metodologia de medição. Para consumidores atendidos por microrredes isoladas é importante que seja considerada a regulamentação nacional para sistemas de distribuição, e assim garantir o atendimento igualitário para todos os tipos de usuários.

No que concerne a aplicação de microrredes, pode-se incluir a interconexão como fator importante da modernização do processo de gerenciamento da geração e da demanda, tendo em vista o conceito de *smart grid*. As microrredes interconectadas destacam-se quanto à estabilização de tensão em regime permanente, melhoria da qualidade de energia elétrica e habilidade autônoma de direcionamento do fluxo de potência (dependendo da necessidade de demanda), entre outros aspectos (Brandão *et al.*, 2018; Martins, 2018).

Desta maneira, este trabalho analisa a qualidade da energia elétrica, em consonância com o Módulo 8 do PRODIST, referente ao suprimento de energia elétrica na interconexão de duas microrredes isoladas experimentais pertencentes ao Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes (GEDAE/UFPA).

2. LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS E MICRORREDES (GEDAE/UFPA)

O sistema elétrico do Laboratório é formado em sua essência por sistemas de geração, condicionamento de potência, armazenamento, microrredes c.a. e c.c e cargas diversas (Corrêa, 2017), cujas especificações são apresentadas a seguir.

Sistema de Geração - composto por geração renovável (7 Geradores Fotovoltaicos – GFV-01, GFV-02, GFV-03, GFV-04, GFV-05, GFV-06 e GFV-07), totalizando 13,125 kWp de potência instalada, e geração não renovável (Grupo Gerador a Diesel – GGD) com potência contínua de 10 kVA.

Sistema de Condicionamento de Potência - composto por dois *clusters* (A e B) e dois Inversores *Grid-tie* (INVG-04 e INVG-05 - *Sunny Boy*) alocados ao longo da microrrede. O *Cluster A* é formado por um Quadro de Distribuição e Comando (QDC) denominado *Multicluster Box*, três Inversores de Tensão Bidirecionais (INVB-01A, INVB-02A, INVB-03A - *Sunny Island*), três Inversores *Grid-tie* (INVG-01, INVG-02, INVG-03 - *Sunny Boy*) e dois Controladores de Carga (CC-01, CC-02 - *FlexMax*). O CC-02 é compartilhado com o *Cluster B* por meio de uma chave seccionadora. O *Cluster B* possui um Quadro de Distribuição e Comando (QDC), três Inversores de Tensão Bidirecionais (INVB-01B, INVB-02B, INVB-03B - *Sunny Island*) e compartilha o CC-02 com o *Cluster A*, dependendo da situação adotada para os ensaios operacionais. Salienta-se que os *clusters* podem atuar isolados ou interligados entre si (considerando o funcionamento em cascata), através da própria microrrede, a qual é conectada na entrada “fonte externa” de um *cluster*.

Sistema de Armazenamento de Energia – composto por dois bancos de baterias idênticos (BB-01 e BB-02), sendo cada banco composto por 24 baterias de 2 V e 1.000 Ah, conectadas em série, o que resulta em uma capacidade individual de 48 kWh. Salienta-se que através do acionamento de chaves de proteção/manobra, os dois bancos podem ser conectados em paralelo, resultando em 96 kWh de capacidade total de armazenamento.

A maioria dos equipamentos do sistema de condicionamento de potência e o sistema de armazenamento de energia estão agrupados em uma sala denominada Central de Energia, como apresentado na Fig. 1. Na mesma sala também estão localizados os dispositivos de monitoramento do sistema de condicionamento de potência, bem como o Quadro Geral de Distribuição do prédio do GEDAE/UFPA (Albuquerque, 2019).

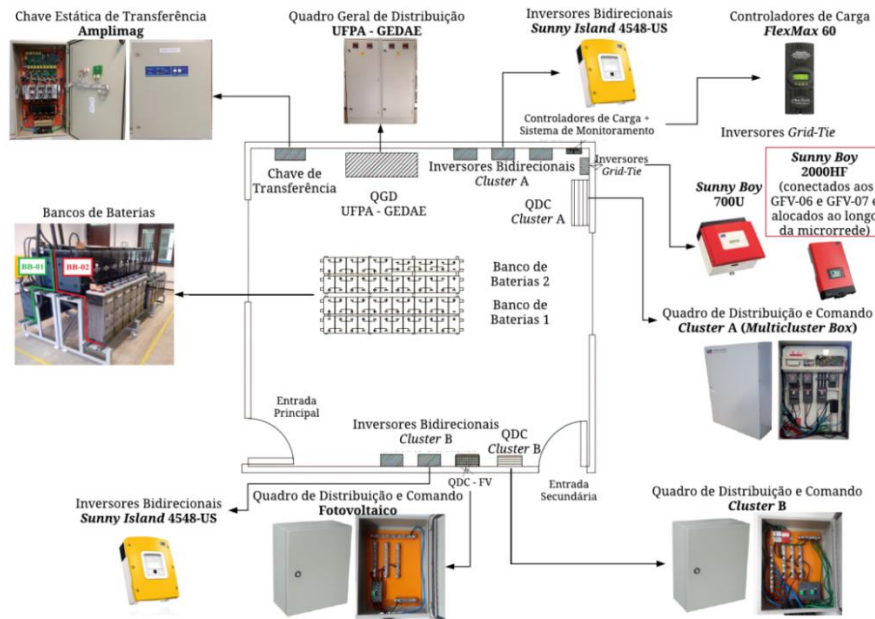


Figura 1 - Layout da Central de Energia e seus componentes.

É importante comentar que existe a possibilidade do funcionamento do sistema elétrico do Laboratório de forma isolada ou conectada à rede de distribuição de energia da UFPA (rede convencional), através dos *Clusters* (principalmente o *Cluster B*). Neste caso, a rede da UFPA é conectada na entrada “fonte externa”, sendo possível a verificação do fluxo de energia da rede convencional para o Laboratório, assim como o fluxo reverso de energia do Laboratório para a rede convencional. Já a conexão da rede pelo *Cluster A* ainda está sendo avaliada, dadas as configurações intrínsecas do quadro de distribuição e comando (*Multiclustor Box*). Além disso, por meio de uma Chave Estática de Transferência, os circuitos de força e iluminação do prédio do GEDAE podem ser conectados ao sistema elétrico do Laboratório para ensaios operacionais ou durante o tempo de falta de energia elétrica fornecida pela rede da UFPA.

Microrrede de Distribuição de Energia. Trata-se de uma microrrede de distribuição aérea em corrente alternada, medindo cerca de 1 km de comprimento linear, com 4 condutores (3 fases e 1 neutro) passando por 18 postes de concreto com 7 m de altura. Na Fig. 2 apresenta-se a disposição da microrrede na área de testes do GEDAE, indicando-se também as localizações de todos os sistemas de geração utilizados no estudo (Veríssimo, 2019).

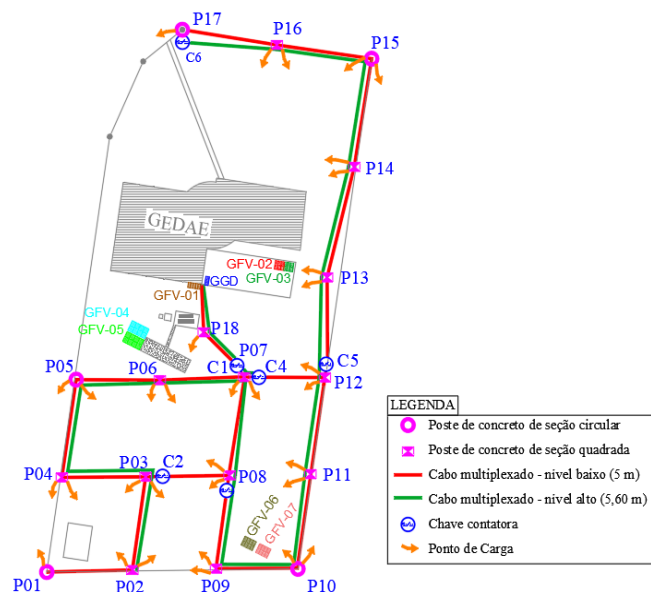


Figura 2 - Disposição da microrrede c.a. de distribuição.

3. CARACTERIZAÇÃO, VERIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE FENÔMENOS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA SEGUNDO O MÓDULO 8 DO PRODIST

O Módulo 8 do PRODIST se aplica tanto aos atendimentos conectados à rede quanto àqueles realizados por Microsistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI), classificados segundo a Resolução Normativa Nº 493, de 5 de junho de 2012 (ANEEL, 2012). O Módulo 8 aborda a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações (ANEEL, 2018). Desta forma, no presente trabalho busca-se avaliar os fenômenos relacionados à qualidade do produto nas microrredes experimentais, tanto em regime permanente (tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência), quanto em regime transitório (Variações de Tensão de Curta Duração - VTCD).

3.1 Configuração do Sistema e Equipamentos de Aquisição de Dados

A configuração utilizada para os ensaios (Fig. 3) abrange o uso dos dois sistemas de condicionamento de potência conectados em cascata (*Cluster A* como fonte externa do *Cluster B*, via microrrede de distribuição), todos os sistemas de geração de energia (renovável e não renovável) e os dois bancos de baterias (Albuquerque, 2019). As cargas utilizadas são do próprio prédio do GEDAE, o qual atuou em determinados momentos dos ensaios como carga, por meio dos seus circuitos de iluminação e força, e em outros como um prosumidor, com a utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (com ponto de conexão no barramento do circuito de força do prédio), com capacidade total instalada de 6,619 kWp. Ademais, utilizaram-se também cargas mistas alocadas em pontos específicos do sistema elétrico ensaiado: um quadro com receptáculos E27 para 12 lâmpadas (instalado na saída do *Cluster A*), sendo 5 fluorescentes do tipo PL e 7 incandescentes; um quadro com receptáculos E27 para 30 lâmpadas (conectado na saída do *Cluster B*), onde foram utilizadas apenas 28 lâmpadas, sendo 15 fluorescentes do tipo PL e 13 incandescentes, já que dois dos receptáculos apresentaram mau funcionamento.

A fim de coletar os dados necessários à avaliação dos fenômenos de qualidade de energia elétrica em regime transitório e permanente foram utilizados 3 equipamentos portáteis (*PowerNET P-600*, *Saga1000*, e *PowerPad 3945-B*), assim como foram extraídos os dados do sistema de monitoramento *Sunny WebBox*, conectado ao *Cluster A*, e do cartão SD do inversor *Master* do *Cluster B*, onde são armazenadas as variáveis de operação e os parâmetros elétricos dos três inversores deste *Cluster*.

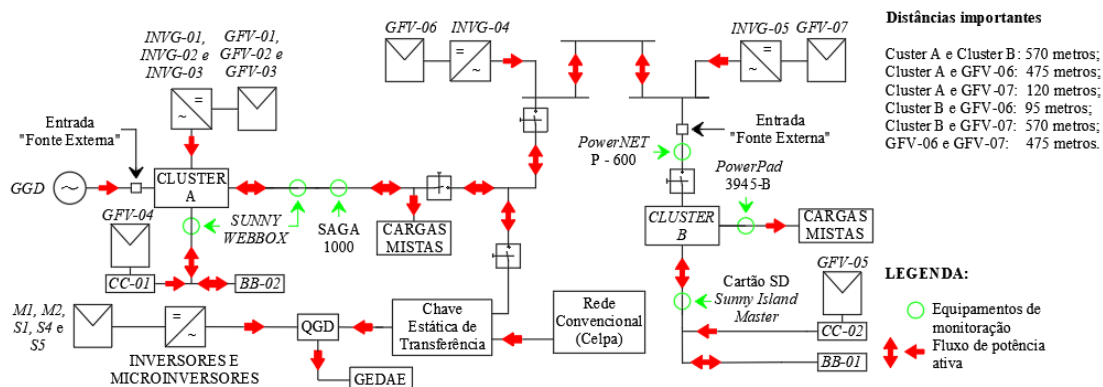


Figura 3 - Configuração utilizada durante o período de medições.

3.2 Resultados

A partir dos dados obtidos por meio das medições no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes (GEDAE/UFPa) com a configuração experimental proposta, foi possível avaliar as condições de funcionamento do sistema elétrico ensaiado quanto à qualidade de energia em diversos pontos. Os conceitos e resultados são apresentados separadamente para cada fenômeno abordado no Módulo 8 do PRODIST.

As medições realizadas iniciaram no dia 14/12/2018 e terminaram no dia 27/12/2018. O parâmetro flutuação de tensão foi medido em um período diferente, que iniciou em 11/04/2019 e terminou em 26/04/2019, com a mesma configuração da primeira medição, porém, sem a inclusão das cargas mistas (Fig. 3).

Tensão em Regimento Permanente. As variações de tensão em regime permanente abrangem desvios dos valores quadráticos médios (V_{rms}), podendo ser sobretensões ou subtensões (Dugan *et al.*, 2003). No Módulo 8 do PRODIST são definidos os limites adequado, precário e crítico, para os níveis de tensão em regime permanente, variando com base nos valores de tensão contratados.

Para caracterização da tensão em regime permanente, realizou-se a comparação entre os valores de tensão obtidos por meio de medições contínuas apropriadas (1.008 leituras integralizadas em 10 minutos) (ANEEL, 2018).

Considerando os níveis de tensão monitorados no ponto da microrrede conectado na entrada “fonte externa” do *Cluster B* (cerca de 570 m da saída do *Cluster A*), verifica-se que os valores estão dentro do critério adequado de tensão, mesmo apresentando alterações em todos os períodos de medição. Tais alterações são decorrentes do acionamento de cargas (entrada e saída), pela injeção de potência dos geradores fotovoltaicos conectados (GFV-06 e GFV-07) na microrrede e pelo acionamento do GGD quando da necessidade do uso da fonte externa do *Cluster A* para atendimento das cargas e carregamento do BB-02 (dias 20 e 21/12). Salienta-se que os valores das medições de tensão na saída do *Cluster A* também atenderam ao mesmo critério.

Ademais, os intervalos de tempo (Fig. 4) em que a tensão permanece com os valores constantes, em torno de 127 V, tratavam-se de períodos noturnos, quando o fornecimento de energia elétrica é oriundo do sistema de armazenamento de energia (bancos de baterias) e as cargas alimentadas são a iluminação da microrrede.

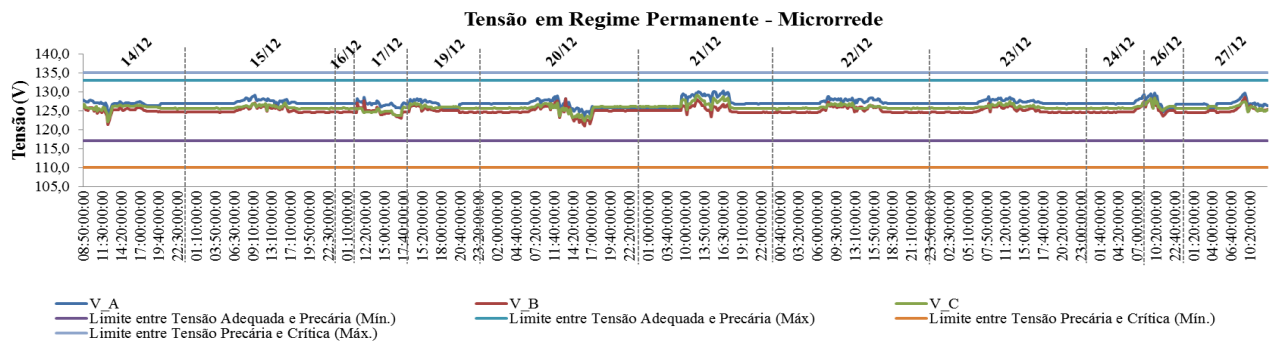


Figura 4 - Tensão em regime permanente na microrrede (entrada “fonte externa” do *Cluster B*).

A Fig. 5 apresenta o comportamento da tensão em regime permanente na entrada “fonte externa” do *Cluster B*, nos dias 20 e 21/12, em comparação com o intercâmbio de potência ativa entre as microrredes formadas pelos *Clusters A* e *B*. Neste caso foram observados os maiores valores de tensão, por influência dos pontos de conexão da GD - GFV-06 (fases A e B a 95 metros do *Cluster B*) e GFV07 (fases A e C a 570 metros do *Cluster B*) - e do acionamento do GGD, que passa a ser o formador de rede, para carregamento dos bancos de baterias. Os valores positivos de potência indicam o fluxo de potência do *Cluster A* para o *Cluster B* e os negativos apontam o sentido contrário.

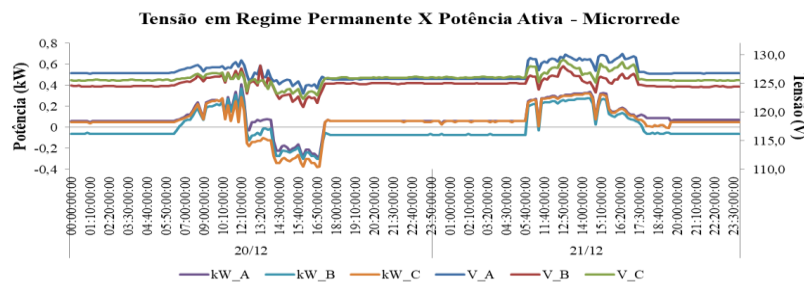


Figura 5 - Tensão em regime permanente na microrrede e potência ativa na entrada “fonte externa” do *Cluster B*.

No dia 20/12 pode-se perceber que os valores de tensão são mais altos quando o fluxo de potência é do GGD (formador de rede), com influência da geração distribuída (GD), para o *Cluster B*. No fluxo reverso, os valores de tensão eficaz são influenciados pela GD e decaem à medida que a injeção de potência no ponto de conexão diminui, voltando a aumentar quando os inversores são desconectados por baixa irradiância e a microrrede passa a ser atendida pelos bancos de baterias. Quando comparados os níveis de tensão em regime permanente na saída do *Cluster A* e na entrada “fonte externa” do *Cluster B*, é notória a influência da GD, conforme mostrado na Fig. 6, onde são mostrados os gráficos de tensão na Fase A nos dois pontos de medição, verificando-se que o aumento dos valores de tensão na saída do *Cluster A* está associado à injeção de potência advinda da GD.

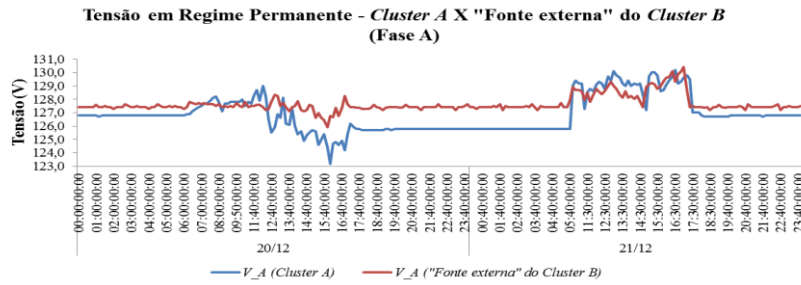


Figura 6 - Tensão em regime permanente na Fase A (*Cluster A* e “fonte externa” do *Cluster B*).

Desequilíbrio de Tensão. O fenômeno desequilíbrio de tensão é decorrente de assimetrias entre os valores de magnitude das tensões de fase e/ou ângulos de fase diferentes de 120° em um sistema trifásico (Baggini, 2008). No Módulo 8 do PRODIST são definidos os limites para o desequilíbrio de tensão, por meio do cálculo do Fator de Desequilíbrio de Tensão (*FD*), que pode ser avaliado utilizando as Eq. (1) e (2).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (1)$$

sendo,

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2)$$

Os limites para o desequilíbrio de tensão são baseados na grandeza *FD95%*, cujo limite para consumidores com tensão nominal menor ou igual a 1 kV é de 3 % e representa o valor do indicador *FD%* que é superado em apenas 5 % das 1.008 leituras válidas. Para o cálculo do indicador *FD%* (Fator de Desequilíbrio Percentual), utilizaram-se as medições contínuas na entrada “fonte externa” do *Cluster B* (microrrede) e na saída do *Cluster A*.

Na Fig. 7 apresenta-se o gráfico de desequilíbrio de tensão no *Cluster A* (saída) e no ponto da microrrede localizado na entrada “fonte externa” do *Cluster B* em comparação com o indicador *FD95%*, onde se pode observar que a variável *FD%* não ultrapassou os limites desejáveis.

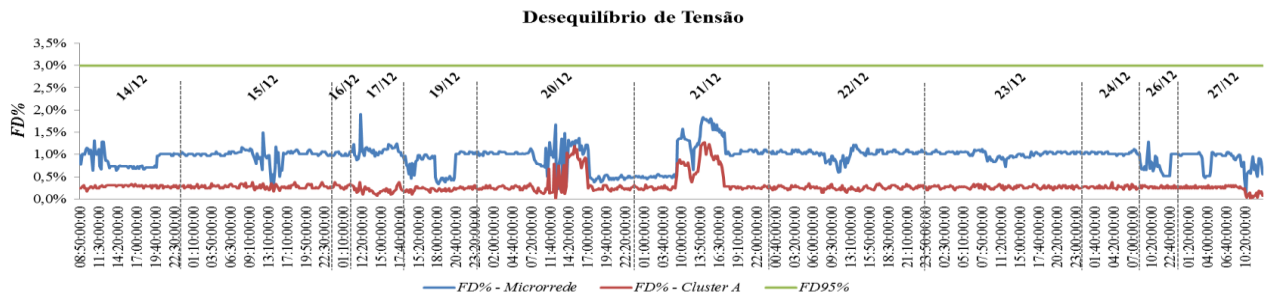


Figura 7 - Desequilíbrio de tensão na microrrede (entrada “fonte externa” do *Cluster B*).

Da Fig. 6 percebe-se maior variação nos valores de *FD%* nos períodos em que há influência da geração de energia advinda dos sistemas fotovoltaicos conectados na microrrede (*GFV-06* e *GFV-07*). No *Cluster A* as alterações encontradas foram oriundas do atendimento realizado com o *GGD* nos dias 20 e 21/12.

Variação de frequência. As variações de frequência ocorrem quando o equilíbrio dinâmico de um sistema é modificado (Vedam e Sarma, 2008). O Módulo 8 do PRODIST define que em condições normais de operação em regime permanente os sistemas de distribuição e as instalações de geração devem operar nos limites de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Havendo ocorrência de distúrbios, deve ser garantido o retorno da frequência em 30 segundos para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz.

A variação de frequência foi avaliada seguindo os dados de monitoração contínua da tensão no ponto situado na entrada “fonte externa” do *Cluster B*. A Fig. 8 mostra os valores de frequência no período de medição considerado, comparando-se com os limites inferior e superior para a frequência, segundo o Módulo 8 do PRODIST.

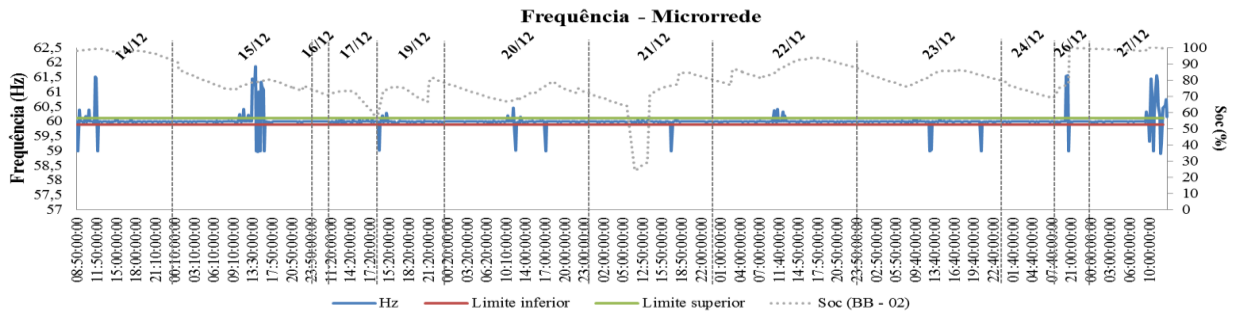


Figura 8 - Frequência da microrrede (entrada “fonte externa” do Cluster B).

Nos dias 20 e 21/12, verificou-se um nível de frequência alto devido ao acionamento do GGD. Quanto ao restante do período de medição, os aumentos e diminuições do nível de frequência são explicados pelo funcionamento dos inversores *Sunny Island* (formadores de rede) devido ao carregamento e descarregamento dos bancos de baterias e ao atendimento de cargas em situação de menor geração. Tal princípio de funcionamento é denominado *Frequency Shift Power Control - FSPC* (Controle de Potência via Mudança de Frequência). Os valores elevados registrados da frequência, mesmo quando do descarregamento do banco de baterias, devem-se à modificação do equilíbrio dinâmico do sistema, podendo ser por demanda de potência ativa ou geração de energia pelos GFV.

As alterações de frequência apresentadas na Fig. 8 não estão em conformidade com o Módulo 8, e são decorrentes de configurações intrínsecas do sistema, como estratégia de retirada da geração distribuída quando o banco de baterias está carregado e a demanda de potência ativa pelas cargas não é alta.

Distorções Harmônicas. As distorções harmônicas são consideradas uma espécie de poluição no sistema, pois podem causar problemas, como distúrbios eletromagnéticos, erros de medição, saturação de transformadores, vibração em motores, atuação incorreta da proteção, dentre outros (Baggini, 2008). No Módulo 8 do PRODIST ditam-se os limites para os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_{p95\%}$, $DTT_{l95\%}$ e $DTT_{395\%}$, baseados nos indicadores $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_l\%$ e $DTT_3\%$, calculados a partir da Eq. (3), onde h e h_{max} dependem das ordens harmônicas consideradas para o cálculo (todas as componentes harmônicas, componentes harmônicas pares não múltiplas de 3, componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3, e componentes harmônicas múltiplas de 3, respectivamente), M_h é a magnitude da tensão harmônica de ordem h , e M_1 é a magnitude da tensão na frequência fundamental.

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

Os limites para os indicadores $DTT_{95\%}$, $DTT_{p95\%}$, $DTT_{l95\%}$ e $DTT_{395\%}$ para consumidores atendidos com tensão nominal menor ou igual a 1 kV são, respectivamente, 10 %, 2,5 %, 7,5 % e 6,5 %, obtidos por meio de 1.008 leituras válidas integralizadas em 10 minutos.

Para a avaliação das distorções harmônicas na forma de onda de tensão foram considerados os dados de medições das distorções harmônicas totais, bem como a obtenção da magnitude de cada componente harmônica, entre a 2ª e a 41ª ordem harmônica.

O indicador $DTT\%$ na saída do Cluster A não foi superado em todo o período de medição, e a Fig. 9 evidencia o indicador $DTT_p\%$ na microrrede (entrada “fonte externa” do Cluster B) em todo o período de medição, o único dos quatro indicadores que transgrediu os limites do Módulo 8 do PRODIST, sendo 4,8 % o maior valor de $DTT_p\%$, na fase A.

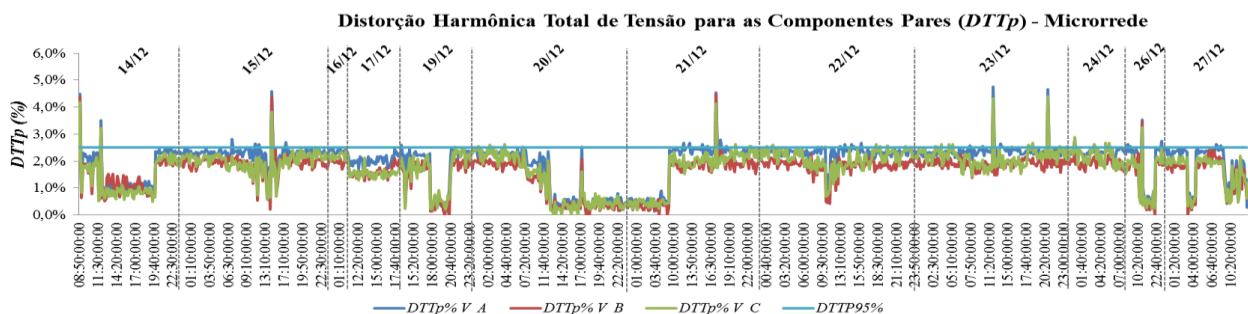


Figura 9 - Distorção harmônica total de tensão na microrrede (entrada “fonte externa” do Cluster B) - $DTT_p\%$.

No caso estudado, percebeu-se que as distorções harmônicas de tensão encontradas são resultantes das correntes com altos níveis de distorção harmônica injetadas na rede quando os inversores *Sunny Boy* (*Grid-tie*) estão funcionando com baixo carregamento (razão entre a potência de saída e a potência nominal), embora, neste caso, a intensidade da corrente injetada seja pequena. A interação entre as correntes harmônicas com a impedância do sistema (cargas atendidas) influencia as distorções harmônicas presentes na tensão.

Fator de Potência. É a relação entre as potências ativa e aparente, e denota a conversão da potência total fornecida pelo sistema (kVA) em potência ativa (kW), que é empregada efetivamente na realização de trabalho. O Módulo 8 do PRODIST especifica as equações para o cálculo do fator de potência (*FP*), que pode ser realizado por meio dos valores medidos de potência ativa (*P*) e potência reativa (*Q*), Eq. (4) ou, ainda, pelos valores de energia ativa e reativa (*EA* e *ER*, respectivamente) (ANEEL, 2018).

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

Os valores de referência para o fator de potência no ponto de conexão, para unidade consumidora ou conexão entre distribuição com tensão menor que 230 kV, devem permanecer na faixa de 0,92 e 1, indutivo (corrente atrasada em relação à tensão), ou 1 e 0,92, capacitivo (corrente adiantada em relação à tensão). Vale ressaltar que não há obrigatoriedade em manter o fator de potência acima de 0,92 para unidades consumidoras dos subgrupos B2, B3 e B4 do grupo B (fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV) (ANEEL, 2010).

Na Fig. 10 são mostrados os dados de medição no ponto correspondente à conexão da microrrede (entrada “fonte externa” do *Cluster B*). Comparando-se com o limite do Módulo 8, pode-se observar que a maior parte dos valores medidos está abaixo do permitido.

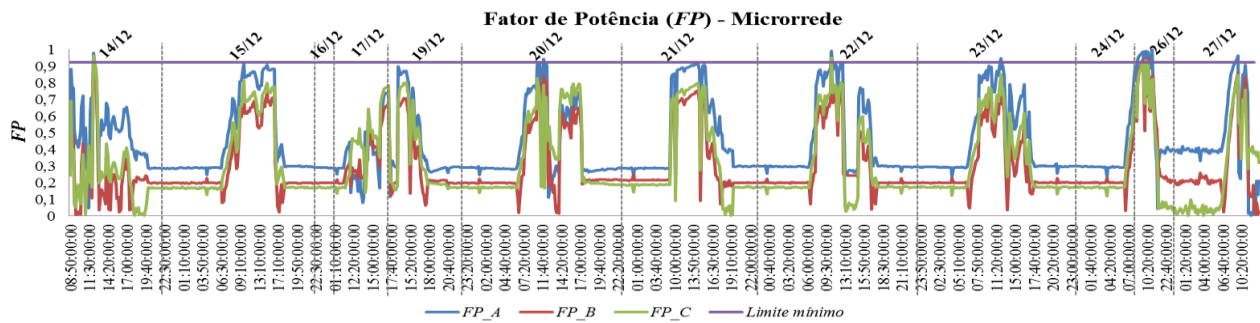


Figura 10 - Fator de potência na microrrede (entrada “fonte externa” do *Cluster B*).

O baixo fator de potência encontrado diz respeito ao tipo de cargas alimentadas no momento dos ensaios, sendo predominantes os refletores a LED e as luminárias com lâmpadas fluorescentes tubulares (que utilizam reatores eletrônicos). Por outro lado, quando há cargas conectadas na microrrede demandando grandes quantidades de potência ativa, no período diurno, o fator de potência tende a ser mais alto.

Flutuação de Tensão. Flutuação de tensão é definida como uma variação cíclica do valor eficaz, ou de pico, de tensão, que pode ser repetitiva, aleatória ou esporádica e não exceda 10 % do valor de referência (ANEEL, 2018; Baghini, 2008; Deckmann e Pomilio, 2018).

O principal efeito das flutuações de tensão é a cintilação ou *flicker* em lâmpadas, o que dificulta a avaliação de tal fenômeno, por envolver o fator humano em sua definição e ter que considerar características do processo fisiológico de percepção (Baghini, 2008). Em ANEEL (2018) são expostas as formulações para cálculo da sensação de cintilação luminosa, e emprega-se o indicador P_{st} , para a severidade de flutuação de tensão de curta duração (Eq. 5).

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (5)$$

Para sistemas com tensão nominal menor ou igual a 1 kV o limite do indicador $P_{st,95\%}$ (valor do indicador P_{st} superado em apenas 5 % das 1.008 leituras válidas integralizadas a cada 10 minutos), segundo o Módulo 8 do PRODIST, é de 1 pu (por unidade).

Em todo o período de monitoração, o indicador P_{st} manteve-se dentro do limite adequado. O indicador P_{lt} não tem uma referência a ser seguida; porém, é proporcional ao P_{st} , e varia devido às cargas utilizadas.

Quando o banco de baterias estava carregado, os níveis de P_{st} foram menores e, quando em processo de carregamento, o nível do indicador foi mais elevado, devido à influência da injeção de corrente variável oriunda dos geradores fotovoltaicos conectados na microrrede. Houve também maior elevação nos níveis de P_{st} quando o sistema híbrido atendeu o prédio e foram acionadas as cargas motrizes presentes na oficina (entre 14h00 e 16h00 do dia 12/04).

A Fig. 11 apresenta os gráficos de P_{st} (comparado ao indicador $P_{st95\%}$) e P_{lt} na saída do *Cluster B*, para todo o período de medição.

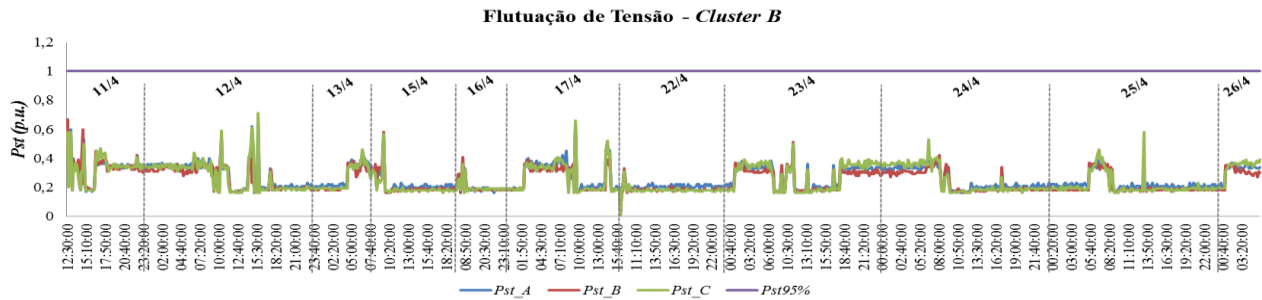


Figura 11 - Flutuação de tensão na microrrede (entrada “fonte externa” do *Cluster B*).

Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD). As variações de tensão de curta duração (VTCD) fazem parte de uma categoria que abrange interrupções, afundamentos e elevações de tensão, podendo ser classificados como momentâneos e temporários, de acordo com a duração do evento (ANEEL, 2018).

No estudo realizado levou-se em consideração medições de transientes na comutação da chave estática (cabe ressaltar que a caracterização e a especificação de limites para transientes não são tratadas no Módulo 8 do PRODIST) da Rede Secundária (Laboratório) para a Rede Primária (rede de distribuição da UFPA), e vice-versa, devido a ser a ocorrência operacional mais frequente no sistema relacionada a transientes oscilatórios. Considerou-se como carga adicional para as microrredes interconectadas a utilização dos circuitos de força e iluminação da edificação do GEDAE, pois trata-se de uma carga mista com elevada potência instalada (composta por microcomputadores, lâmpadas fluorescentes tubulares com reatores eletrônicos, entre outras cargas).

Os distúrbios ocorrem pelo desacoplamento automático da fonte de alimentação do sistema, tendo tempos e respostas diferentes, dependendo da fonte de suprimento, seja pelo sistema híbrido ou pela rede de distribuição da UFPA, e a carga a ser suprida. A Fig. 12 apresenta as formas de onda para a comutação da rede primária para a rede secundária, o caso mais crítico entre as duas possibilidades de comutação. Estes distúrbios oscilatórios não se propagam muito além da fonte de geração, pois são absorvidos por outros componentes do sistema.

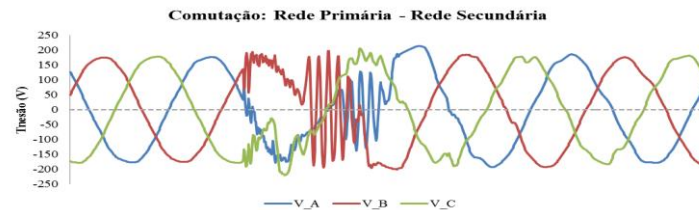


Figura 12 - Transiente de comutação da chave estática (rede primária para rede secundária).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que tange ao Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes (GEDAE/UFPA), há grande capacidade de divulgar pesquisas e estudos sobre sistemas híbridos (com ênfase no recurso solar) e microrredes de distribuição de eletricidade, no âmbito da qualidade de energia elétrica, com a utilização de *clusters* que podem operar isolados ou interconectados.

Assim, avaliou-se a qualidade de energia do Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes na configuração de operação com o *Cluster A* e o *Cluster B* conectados via microrrede com todos os sistemas de geração auxiliando na produção de energia para o atendimento das cargas e carregamento dos bancos de baterias. Dentre os parâmetros avaliados, a tensão em regime permanente, o desequilíbrio de tensão e a flutuação de tensão apresentaram-se dentro dos limites especificados no Módulo 8. Já os parâmetros referentes à variação de frequência, ao fator de potência e às distorções harmônicas apresentaram algumas disparidades em relação aos limites, por configurações intrínsecas dos inversores bidirecionais, tipo e quantidade de cargas durante o processo de monitoração, quantidade de potência ativa fornecida pela geração distribuída, e baixo carregamento dos inversores.

Quanto à variação de tensão de curta duração, foram apresentadas formas de onda oriundas de chaveamentos (transferências entre fontes de alimentação do prédio do GEDAE na chave estática) e acionamento de blocos de carga de iluminação, que mostraram transientes oscilatórios comuns para este tipo de situação e cargas energizadas.

De acordo com os estudos realizados, pode-se concluir que o sistema elétrico implementado no Laboratório, emulando microrredes interconectadas, tem capacidade de operar sem prejuízos decorrentes de distúrbios causados pela

má qualidade da energia, visto que os fenômenos que ultrapassaram os limites são inerentes a configurações operacionais do sistema.

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

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2012. Resolução Normativa Nº 493, de 05 de junho de 2012, Brasília, 2012.
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2018. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica.
- Albuquerque, L. O., 2019. Avaliação da Qualidade do Suprimento de Energia no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do GEDAE/UFPA, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, Belém.
- Baggini, A., 2008. Handbook of Power Quality, First Edition, Wiley.
- Barbosa, C. F. O.; Pinho, J. T.; Galhardo, M. A. B.; Pereira, E. J. S., 2016. Sistemas Híbridos de Energia: Aplicações e Estudos no Brasil, VI CBENS, VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte.
- Bastos, C. B. S., 2015. Estudo de Impactos de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica Utilizando Análises QSTS, Dissertação de Mestrado, Mestrado Acadêmico Em Engenharia Elétrica, UDESC, Joinville.
- Brandão, D. I.; Pomilio, J. A.; Marafão, F. P.; Alonso, 2018. Validação Experimental de uma Microrrede com Controle Centralizado e Despachável, Revista Eletrônica de Potência, vol. 23, n. 3, pp. 281-291.
- Corrêa, 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, UFPA, Belém.
- Deckmann, S. M.; Pomilio, J. A., 2018. Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica. UNICAMP/FEEC/DSCE, Campinas.
- Dugan, R. C.; Mcgranaghan, M. F.; Santoso, S.; Beaty, H. W., 2003. Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill.
- Lucchese, F. C.; Anselmini, F.; Martins, C. C.; Sperandio, M., 2018. Análise do Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica na Rede Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, VII CBENS, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Martins, M. S., 2018. Gerenciamento do Fluxo de Energia em Microrredes de Corrente Contínua e Análise em Ambiente Simulado, Trabalho de Conclusão de Curso, UFOP, João Monlevade.
- Paixão Júnior, U. C.; Albuquerque, L. O.; Barbosa, C. F. O.; Veríssimo, J. P. A.; Pinho, J. T.; Galhardo, M. A. B., 2018. Qualidade do Suprimento de Energia Elétrica no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do GEDAE/UFPA, VII CBENS, VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.
- Vedam, R. S.; Sarma, M. S., 2008. Power Quality, VAR Compensation in Power Systems, First Edition, CRC Press.
- Veríssimo, J. P. A., 2019. Expansão e Ensaio Laboratoriais para Integração de Microrredes, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, Belém.

EVALUATION OF THE ENERGY QUALITY SUPPLY IN THE INTECONNECTION OF EXPERIMENTAL ISOLATED MICROGRIDS

Abstract. *This paper presents the evaluation of the energy quality supply in the interconnection of two experimental isolated microgrids belonging to the infrastructure of the Hybrid Systems and Microgrids of the Laboratory of the Group of Studies and Development of Energy Alternatives (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas - GEDAE) of the Federal University of Pará. The evaluation of the monitored phenomena related to product quality (supply voltage), according to PRODIST Module 8 guidelines was based on an electrical system whose configuration gathers photovoltaic generators on the d.c. side and a diesel-electric generation on the a.c. side, a battery energy storage system, power conditioning d.c./d.c. and d.c./a.c. (unidirectional and bidirectional), distribution microgrids and miscellaneous loads. According to the results obtained in study, the implemented electrical system has the capacity to meet several loads, respecting its power production capacity, without deterioration of the quality of the electric power, as can be seen from the effective voltage values and in the voltage balance among phases. In turn, the disturbances in which the disparities in the limits determined by PRODIST Module 8 were found come from intrinsic configurations of the system under analysis (implying variation of power supply frequency and power factor at different points of the system, for example).*

Keywords: *Microgrids, Energy Quality, Hybrid Systems.*