



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO X**

**GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA DE UM SISTEMA DE ELETRIFICAÇÃO HÍBRIDO (FOTOVOLTAICO-EÓLICO-DIESEL) SUPRINDO MINIRREDE DE DISTRIBUIÇÃO**

**Marcos André Barros Galhardo (\*)  
GEDAE/UFPA**

**Natália dos Santos Modesto  
GEDAE/UFPA**

**João Tavares Pinho  
GEDAE/UFPA**

**RESUMO**

Este trabalho avalia a qualidade da energia elétrica de um sistema de geração de pequeno porte, do tipo híbrido fotovoltaico-eólico-diesel, instalado na comunidade de Tamaruteua, município de Marapanim, estado do Pará, apresentando como resultados o desempenho dos componentes do sistema de geração (aerogeradores, módulos fotovoltaicos e gerador a diesel), da minirrede de distribuição (operando com o inversor e o grupo gerador), das cargas instaladas na comunidade e os tipos de distúrbios relacionados a problemas de qualidade da energia, ao qual o sistema híbrido está mais susceptível.

**PALAVRAS-CHAVE**

Qualidade de Energia, Sistemas Híbridos, Energias Renováveis, Sistemas Autônomos, Minirrede

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Uma alternativa para o atendimento das necessidades energéticas em comunidades isoladas é a implantação de sistemas híbridos que utilizam fontes renováveis disponíveis localmente para produção de energia elétrica. Essas localidades geralmente possuem baixa demanda e são de difícil acesso, o que ocasiona um elevado custo para a eletrificação das mesmas, ou mesmo a sua inviabilidade por meio dos sistemas convencionais de energia elétrica.

Dentro deste contexto, está inserido o programa "Luz para Todos" do Governo Federal, que objetiva levar energia elétrica para populações residentes no meio rural. No entanto, diante das dificuldades para eletrificação das localidades isoladas na Amazônia, seja pela implantação de sistemas de geração individuais ou suprindo minirredes de distribuição de energia elétrica, tornam-se importante as experiências adquiridas (de gestão, tecnológicas, etc.) com modelos de projetos implantados com esses fins, cujas premissas básicas são a sustentabilidade do projeto e a replicabilidade para localidades com características similares.

Com a oferta da energia elétrica e à medida que seus benefícios passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas dessas localidades, é natural que se inicie um processo de discussão quanto à qualidade do produto (energia elétrica) entregue e, principalmente, quanto à continuidade do serviço, para que a interrupção do fornecimento não implique em transtornos ao consumidor.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através do módulo 8 do PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (1) estabelece, para sistemas convencionais, os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade dos serviços prestados e do produto entregue (energia elétrica) pelas distribuidoras.

(\*) Av. Augusto Correa, n° 1 – Ag. Núcleo Universitário – Caixa Postal 8605 – CEP 66.075-970 Belém, PA – Brasil  
Tel: (+55 91) 3201-7977 – Fax: (+55 91) 3201-7299 – Email: galhardo@ufpa.br

De acordo com essa resolução normativa, a tensão de suprimento entregue para as instalações consumidoras deve estar de acordo com os padrões fixados para atendimento, para que não cause danos e/ou mau funcionamento dos equipamentos e das instalações elétricas que compõem o sistema. Os sistemas isolados de pequeno porte suprindo minirredes ainda não estão regulamentados; porém, os parâmetros estabelecidos pela ANEEL para as concessionárias/permissionárias de serviço público de distribuição de energia, referentes à qualidade do produto, servem como referência para que seja realizado um fornecimento de energia de boa qualidade nesse tipo de sistema.

No entanto, as condições de fornecimento exigidas para os agentes distribuidores, referentes aos indicadores de continuidade (2) e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, são dificilmente aplicados para sistemas de pequeno porte como, por exemplo, os sistemas autônomos baseados em fontes renováveis descritos anteriormente, devido às grandes distâncias envolvidas e custos operacionais para deslocamento, além de no caso do aproveitamento dos recursos naturais (sol, vento, etc.) presentes no sistema, afetar a disponibilidade de energia ofertada, pois os recursos são intermitentes e apresentam variação sazonal.

Neste trabalho faz-se uma análise de cada componente do sistema híbrido de eletrificação implantado na comunidade de Tamaruteua e da qualidade da energia fornecida à minirrede de distribuição. Sistemas desse tipo necessitam ser monitorados para que se possa avaliar o seu desempenho, destacando suas características relacionadas à qualidade de energia, seja na rede elétrica, nos equipamentos que compõem o sistema de geração, e das cargas utilizadas, para que assim se possam minimizar esses problemas.

## 2.0 - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

### 2.1 Descrição da comunidade

A vila de Tamaruteua situa-se no litoral do município de Marapanim/Pará, na embocadura do rio Cajutuba sobre o oceano Atlântico, tendo como coordenadas geográficas 0°34'57" S e 47°45'28" W. A comunidade de Tamaruteua encontra-se em condições de semi-isolamento geográfico da sede do município, da qual dista aproximadamente 16 km em linha reta, sendo o acesso à comunidade realizado em embarcações motorizadas, com tempos de viagem variando entre 1 hora e 40 minutos e 2 horas.

De acordo com o último levantamento socioeconômico realizado em janeiro de 2008, a comunidade é composta por aproximadamente 207 pessoas distribuídas em 51 famílias e 70 prédios, dentre os quais destacam-se: 56 residências ocupadas, 2 igrejas (sendo uma evangélica e uma católica), 1 escola de ensino fundamental e 5 pequenos comércios. As construções são predominantemente de madeira (cerca de 93,18%), com apenas 6,92% em alvenaria. A estrutura urbanística da vila ocupa uma área de aproximadamente 500 m de raio, desenvolvida em terreno arenoso, apresentando uma visão paisagística do ecossistema praiano, configuração retangular, onde se assentam as construções prediais, inexistindo denominação de ruas e numeração de casas.

### 2.2 Descrição do sistema híbrido

O sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel implantado na vila de Tamaruteua é composto por dois aerogeradores de 7,5 kW cada, um arranjo fotovoltaico de 3,84 kWp, um grupo gerador a diesel de 40 kVA com Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (USCA), um sistema de armazenamento com 64 baterias de 12 V/150 Ah, um inversor de 23 kVA, (com retificador), controladores de carga para os aerogeradores e para o arranjo fotovoltaico, um subsistema de controle automático da operação (permuta entre os sistemas de geração renovável e não renovável, baseado no estado de carga do banco de baterias) e uma minirrede trifásica de distribuição suprindo 68 unidades consumidoras (UC) com medidores eletrônicos possuindo tarifação do tipo pré-paga. O diagrama desse sistema híbrido é apresentado na Figura 1.

O sistema híbrido implantado é do tipo autônomo e não conectado diretamente à rede elétrica, devido à ausência de uma fonte firme de geração e de situar-se em uma área de difícil acesso, onde não há viabilidade econômica tanto para a instalação de um sistema interligado a rede convencional, quanto para a manutenção de uma rede de geração de energia que atenda 24 horas a demanda da localidade. Para que sejam compensados os momentos de insuficiência ou indisponibilidade dos recursos eólico e solar é necessário um sistema de armazenamento de energia e um sistema de *backup* (grupo gerador a diesel).

Pela proximidade das UCs em relação à casa de força (local onde está instalado o inversor e o grupo gerador), a entrada da minirrede trifásica de distribuição é energizada em baixa tensão (127/220 V). A minirrede possui aproximadamente 1.600 m de extensão, em configuração radial conforme a configuração das residências da vila, e consta de 31 postes de madeira. A minirrede trifásica é constituída de cabos isolados multiplexados, por serem menos susceptíveis a situações de curto-circuito na rede, causados, por exemplo, pela queda de galhos de

árvores, e ocasionando interrupções no sistema. Os cabos multiplexados utilizados são de 50 mm<sup>2</sup> no tronco principal, 35 mm<sup>2</sup> nos ramos bifásicos e 4 mm<sup>2</sup> nos ramais de ligação com os consumidores. A rede trifásica do tronco principal foi instalada com cabos de cores diferentes por fase, para facilitar a identificação dos consumidores que se encontram conectados a cada fase e, conseqüentemente, facilitar o balanceamento da rede de distribuição.

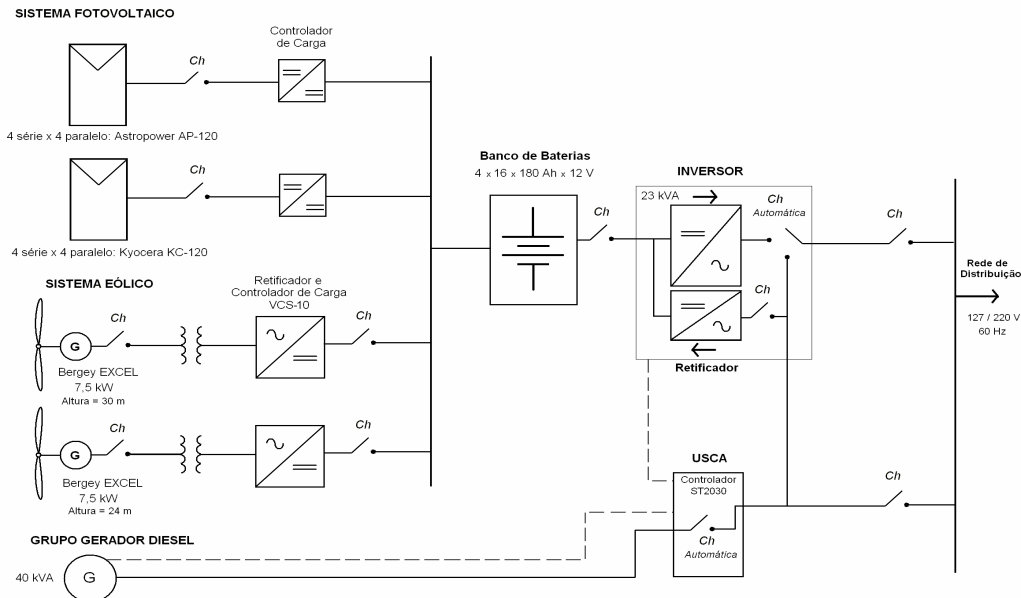


FIGURA 1 – Diagrama do sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel da vila de Tamaruteua.

Para o sistema de medição e gerenciamento da energia elétrica consumida pelos moradores da comunidade, foram instalados em cada UC medidores monofásicos eletrônicos do tipo pré-pago, os quais foram configurados para o sistema de energia de Tamaruteua, permitindo a transferência de créditos pré-estabelecidos para os medidores através de cartões do tipo *smart-card*. Este sistema de medição proporciona aos consumidores maior comodidade e praticidade, facilitando a administração de seus consumos de energia.

A instalação do sistema de pré-pagamento de energia permitindo a visualização a cada instante dos créditos consumidos, de certa forma contribui para o uso racional da energia nas UCs e, assim, para disponibilidade de um período maior de atendimento do sistema de geração. Além disso, tal sistema (compra antecipada) de certa forma já era utilizado pelos moradores, uma vez que a aquisição de seus energéticos, como pilhas, querosene, óleo diesel, recarga de baterias, etc., dá-se com o pagamento antecipado.

### 3.0 - AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Neste tópico é feita uma análise da qualidade da energia de cada componente do sistema de geração (renovável e não renovável), do sistema de suprimento à minirrede de distribuição (inversor e grupo gerador a diesel), e de como as principais cargas instaladas na comunidade podem influenciar na qualidade de energia suprida pelo sistema.

#### 3.1 Geração eólica

Os geradores do sistema eólico possuem excitação com ímãs permanentes apropriados para baixas velocidades de rotação, produzindo eletricidade em corrente alternada e fornecendo tensões e correntes com amplitude e frequência que variam com a velocidade de giro do rotor eólico (dependente da velocidade do vento). Então, devido à intermitência do vento, há a necessidade de primeiramente retificar a tensão, fazendo o armazenamento de energia em um banco de baterias, e reconverter a tensão para forma alternada, por meio de um inversor, para as condições normais de suprimento das cargas (127/220V - 60 Hz). O retificador utilizado é do tipo semi-controlado de 6 pulsos, o qual produz componentes harmônicas de corrente de ordem  $6k \pm 1$  (onde  $k$  é um número inteiro). Antes do estágio de retificação (Figura 1) há um transformador trifásico abaixador (relação 2:1) com ligação delta-delta. Em funcionamento a vazio, o aerogerador produz tensões senoidais, mas com a conexão com o retificador trifásico há a circulação de componentes harmônicas que contribuem para a distorção da tensão, e

para um maior aquecimento do transformador nos enrolamentos e núcleo (perdas por histerese e por correntes parasitas). No entanto, no sistema em estudo, até o momento não foi feita uma estimativa de vida útil dos transformadores instalados, baseada na análise do regime de operação e a presença de componentes harmônicas.

### 3.2 Geração fotovoltaica

Devido à produção de energia do sistema fotovoltaico ser em corrente contínua e o recurso solar ser intermitente, sendo as cargas do sistema de Tamaruteua alimentadas em corrente alternada, torna-se necessário um sistema de armazenamento e a utilização de conversores de energia CC em CA para suprimento das cargas. Os dois sistemas, eólico e fotovoltaico, são integrados em um banco de baterias, no qual está conectado o inversor de suprimento à minirrede. Também na saída dos módulos fotovoltaicos são conectados dois controladores de carga, um em cada conjunto, para que seja realizada a regulação de carga entregue às baterias. Em sistemas autônomos como o de Tamaruteua, na maioria das vezes são utilizados diferentes controladores de carga para cada sistema de geração, eólica e fotovoltaica, quando o ideal para otimização do aproveitamento da energia seria a utilização de apenas um. Entretanto, devido ao elevado nível de corrente que este teria que suportar, haveria a necessidade da coordenação entre os diversos controladores para que o nível de tensão de referência regulada fosse o mesmo. Quanto aos valores de tensão e corrente na saída do sistema fotovoltaico, observa-se que não ocorrem alterações muito bruscas no sistema, devido à incidência de energia solar geralmente não variar abruptamente com o tempo, diferentemente do sistema eólico em que a variação pode ser elevada em um curto intervalo de tempo.

### 3.3 Inversor

Neste sistema, o inversor converte a tensão de saída do barramento CC em tensão CA adequada para alimentação da minirrede de distribuição. Em condição normal de suprimento pelo sistema renovável a chave automática ativará a tensão CA de saída do estágio de inversão ao barramento do sistema distribuição. Também é realizada a monitoração do nível de carga nas baterias, e, se este chegar a um determinado nível inferior, o inversor transfere automaticamente o fornecimento para a geração a diesel através da chave eletromecânica associada à sua saída.

O inversor utilizado na comunidade de Tamaruteua produz tensão de saída CA trifásica do tipo senoidal, e dispõe de controles para evitar danos devido à sobretensão, sobrecorrente ou outras causas, tendo ainda a vantagem de oferecer um melhor controle da frequência e amplitude da tensão e baixa Distorção Harmônica Total (*THD*) da tensão (1 a 5 %).

### 3.4 Grupo gerador a diesel

O grupo gerador instalado em Tamaruteua é dotado de USCA, necessária para seu funcionamento automático, e possui também um regulador eletrônico de tensão/frequência. Cabe ressaltar que em muitas pequenas comunidades na Região Amazônica há sistemas próprios de eletrificação baseados na geração dieselétrica, a maioria não possuindo controle de tensão/frequência, devido ao seu pequeno porte, ocasionando assim problemas de variações na frequência e na tensão de suprimento, sendo o ajuste geralmente realizado de forma manual e rústica pelo operador do sistema.

Os grupos geradores são amplamente utilizados em comunidades isoladas devido ao seu baixo custo de aquisição e pelo fato de motores a diesel serem muito utilizados pelos moradores em suas embarcações. Contudo, objetiva-se em sistemas híbridos que a participação do grupo gerador seja a mínima possível, por se tratar de um sistema de geração com combustível fóssil e que representa maiores custos operacionais, devido aos gastos com óleo diesel para seu funcionamento e gastos frequentes com a sua manutenção.

### 3.5 As cargas do sistema

De acordo com pesquisas realizadas para levantamento de demanda, a maior parte da potência instalada na comunidade é de eletrodomésticos do tipo motriz (como ventiladores, liquidificadores, geladeiras e freezers) totalizando 17,38 kW. A maioria das cargas no sistema é do tipo não-linear, que empregam eletrônica de potência, consistindo de estágio de entrada de retificador monofásico com filtro capacitivo, para iluminação e comunicação/lazer (como lâmpadas PL, aparelhos de TV e som). Essas cargas totalizam aproximadamente 10 kW, e injetam no sistema de distribuição correntes não senoidais que podem levar a distorção da tensão de suprimento, dependendo da demanda e da interação com a impedância equivalente (ou Thévenin) do mesmo. Vale ressaltar que esse efeito é maior em sistemas de pequeno porte, devido a sua baixa potência de curto-circuito. A demanda média da vila está em torno de 4,7 kW, e a média dos picos de demanda é de 6,5 kW, sendo o maior já registrado, no período noturno, de 16,1 kW.

#### 4.0 - AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SUPRIMENTO

Neste tópico são apresentados alguns distúrbios e os possíveis problemas relacionados à qualidade de energia, que podem ocorrer nesses sistemas de eletrificação. Também é apresentado um estudo de caso baseado em medições que demonstram a operação e desempenho do sistema híbrido. Essas informações foram obtidas através de um medidor eletrônico com memória de massa, o qual faz a monitoração de grandezas elétricas na entrada da minirrede de distribuição, e por meio de medições pontuais feitas com um osciloscópio digital.

Na comunidade de Tamaruteua, o sistema elétrico está suscetível praticamente a todos os fenômenos que afetam a qualidade de energia e que são verificados em um sistema convencional. No entanto, caso se faça a comparação com um sistema convencional, alguns fenômenos são considerados mais críticos como, por exemplo, as interrupções de energia, pois um sistema de geração com fontes intermitentes está constantemente sujeito a esse evento (3).

##### 4.1 Interrupção Sustentada

Os sistemas autônomos de geração de energia elétrica atendendo minirredes, baseados em fontes renováveis, estão sujeitos às interrupções sustentadas, isto se considerado um período de atendimento de 24 horas por dia. Porém, na maioria das vezes esses sistemas não são projetados para esta finalidade, devidos aos altos custos envolvidos para manter seu funcionamento contínuo. Além disso, nem sempre há disponibilidade de óleo diesel para o grupo gerador operar em períodos de baixa produção ou indisponibilidade do sistema renovável, ou ainda de longos períodos de autonomia da energia armazenada no banco de baterias, uma vez que o aumento do período de autonomia do banco de baterias encarece significativamente o sistema.

Alguns casos em que a geração renovável é insuficiente para repor no banco de baterias a energia diária demandada pela carga são devidos, por exemplo, às sazonalidades (meses de chuvas, meses com velocidade de vento baixa, etc.) ou dias atípicos (festas, férias, etc.). Por esses motivos, os sistemas renováveis de pequeno porte são suscetíveis a interrupção do fornecimento de energia elétrica às cargas.

Para um sistema de geração de energia elétrica, o ideal seria que o fornecimento fosse ininterrupto. Porém, no sistema estudado isto requer altos custos de operação e manutenção, visto que o sistema funcionaria na maior parte do tempo com a geração a diesel, a não ser que o sistema renovável fosse expandido, aumentando assim, a capacidade e o período de atendimento.

O período de fornecimento de energia com base nas fontes renováveis varia de acordo com as épocas do ano, devido à sazonalidades dessas fontes, podendo chegar a 12 horas de operação contínua em épocas de bom potencial solar e eólico (meses do segundo semestre), e ser reduzido para 6 horas na época das chuvas (primeiro semestre). Independentemente da época, o sistema é desligado manualmente por volta das 23 horas.

##### 4.2 Variações de tensão de curta duração (VTCD)

No sistema de Tamaruteua as VTCD podem ser percebidas na iluminação quando ocorre a comutação do sistema renovável para o grupo gerador a diesel ou vice-versa, pois, apesar do chaveamento ser feito de forma automática, existe um pequeno atraso no momento da transferência da chave, que é percebido como um rápido piscar nas lâmpadas.

Caso haja entrada de cargas elevadas no sistema, o que ocorre na maioria das vezes no período noturno, e o grupo gerador a diesel estiver operando, a tensão suprida será afetada com um afundamento, pois, apesar do gerador possuir regulador de tensão, ele leva certo tempo para regular e estabilizar a tensão. O mesmo ocorre com a retirada de um bloco de cargas, havendo nesse caso uma elevação da tensão. Apesar disso, até o momento não foi registrado na localidade nenhum caso referente à avaria de equipamentos devido a VTCD.

##### 4.3 Variações de tensão de longa duração (VTLD) ou tensão em regime permanente

Para determinação da VTLD no sistema de Tamaruteua foram analisados na entrada da rede de distribuição os níveis de tensão entregues ao sistema de distribuição. Através dessa análise, as VTLD são estabelecidas por (1) e (4) em níveis de tensão classificados como adequados, precários e críticos. Os valores de tensão obtidos por medições no sistema (tensão de leitura) devem estar situados dentro de uma faixa em torno da tensão nominal ou de referência (no caso de Tamaruteua 127/220 V).

Como exemplo de análise, foram tomadas 1.008 leituras da tensão em cada fase da alimentação na entrada da rede de distribuição. De acordo com a recomendação (1), os dados são integralizados de 10 em 10 minutos e foram excluídas as leituras durante a interrupção do sistema (período de não atendimento), completando então as

leituras por 26 dias. Durante as monitorações, verificou-se que o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) possui valor não nulo para a fase B, sendo igual a 0,09%, referente a uma amostragem lida em um determinado dia às 18h40, nesse caso, no intervalo em que o gerador a diesel está entrando em operação. Para as fases A e C, de acordo com as leituras analisadas, não houve nenhuma tensão de atendimento classificada como precária, sendo a tensão totalmente adequada para atendimento. Para efeito de comparação, o índice de transgressão para tensão precária é estabelecido em até 3%, ou seja, a tensão de fornecimento na comunidade atende as especificações determinadas pelo PRODIST. Quanto ao índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC), estabelecida em no máximo 0,5%, não houve nenhuma leitura classificada como crítica para as fases do sistema. Para os demais períodos de monitoração, tem-se observado que a tensão fornecida para o sistema de distribuição de Tamaruteua é adequada, atendendo as especificações, sendo nesse aspecto de boa qualidade em regime permanente.

#### 4.4 Desequilíbrio de tensão

As cargas alimentadas pela minirrede são monofásicas e, por não estarem convenientemente distribuídas entre as fases da rede, contribuem para o desequilíbrio da tensão de suprimento. Para melhor demonstrar esse desequilíbrio, foi realizado o monitoramento do sistema durante duas semanas, onde foram observadas as tensões e a *THD* nas fases do sistema. Primeiramente, observou-se o sistema com o inversor operando na maior parte do tempo, com o sistema em período inicial de funcionamento, estando assim o banco de baterias totalmente carregado. Portanto, para este período de operação, os fatores de desequilíbrio de tensão (*FD*) médio e máximo possuem valores iguais a 0,92% e 1,73%, respectivamente.

Na segunda semana de monitoramento tem-se em operação o inversor (operando em média 3 horas e 30 minutos) e o gerador a diesel (operando em média 4 horas). Para esse período o sistema chega a operar, durante todo o intervalo de monitoração, com *FD* médio e máximo de 1,23% e 3,44%, respectivamente, ou seja, um desequilíbrio bem acima do que o apresentado no primeiro caso. Também são analisados os dados referentes à segunda semana, com apenas o inversor em operação. Nesse caso o sistema apresentou *FD* médio e máximo iguais a 0,95% e 1,96%, um resultado aproximado ao da primeira semana de monitoramento (somente o inversor operando na maior parte do tempo). Para apenas o gerador a diesel em operação o *FD* médio foi de 1,42%, registrando-se um *FD* máximo de 3,44%. Percebe-se, assim, que o desequilíbrio de tensão no sistema elétrico de Tamaruteua é maior durante o suprimento pelo gerador a diesel, haja vista que ele geralmente opera no período de maior demanda na comunidade.

Mesmo que o sistema fosse rigorosamente balanceado entre as fases, haveria a circulação de correntes com conteúdo harmônico no condutor neutro, devida à presença das cargas não-lineares.

#### 4.5 Harmônicos

A corrente com conteúdo harmônico produzida por cargas não-lineares influencia a tensão de alimentação, introduzindo componentes harmônicas na tensão, mesmo que o inversor ou grupo gerador não produza essas componentes. Essa influência é maior nos sistemas de geração de energia elétrica de pequeno porte, pois possuem baixa capacidade de curto-circuito, onde a demanda é próxima à potência de suprimento do sistema (5).

Quanto à qualidade de energia elétrica fornecida pelo inversor e o gerador a diesel do sistema de Tamaruteua, verifica-se, em geral, que com a presença do inversor a *THD* de tensão média nas fases é menor do que 5%, enquanto que com o gerador a diesel em operação a *THD* chega em média a 9%.

### 5.0 - AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO (INVERSOR E DIESEL)

Em Tamaruteua são analisadas as medições de grandezas realizadas nas três fases do sistema pelo medidor eletrônico no ponto de entrega à minirrede de distribuição, em períodos com o inversor e o grupo gerador a diesel em operação. Tomando um exemplo de medição, no momento em que o inversor está em operação no período noturno (Figura 2), as formas de onda das tensões nas fases apresentam-se distorcidas em sua crista, devido às características das cargas não-lineares ligadas ao sistema, produzindo correntes com elevado valor de pico durante o mesmo intervalo. Para o caso da Figura 2, as tensões fase-neutro apresentam um valor *rms* de 125,81 V para a fase A, 127,02 V para a fase B, e 127,69 V para a fase C, apresentando ainda, um *FD* de tensão entre fases igual a 0,71%. Com relação à corrente, a fase A encontra-se mais carregada que as demais, apresentando um valor *rms* de 10,57 A e fator de crista igual a 2,41. A corrente no neutro, com 9,88 A e fator de crista igual a 2,47, é superior às das fases B e C, que apresentaram valores *rms* de 6,18 A e 5,99 A, respectivamente, e fatores de crista iguais a 2,86 para a fase B, e 3,15 para a fase C. As *THDs* de tensão fase-neutro para as fases A, B e C são iguais a 3,7%, 3,9% e 2,9%, respectivamente, e as *THDs* de corrente nas fases A, B, C e condutor neutro são iguais a 41,3%, 57,4%, 72,2% e 159,2%, respectivamente. Apesar da fase C apresentar maior *THD* de corrente, a

corrente demandada naquele instante não tem grande influência na respectiva forma de onda da tensão de fase. Quanto ao condutor neutro, a presença da componente de terceira harmônica (180 Hz) é significativa, apresentando um valor RMS de 7,02 A, quanto na frequência fundamental (60 Hz) é de 4,9 A.

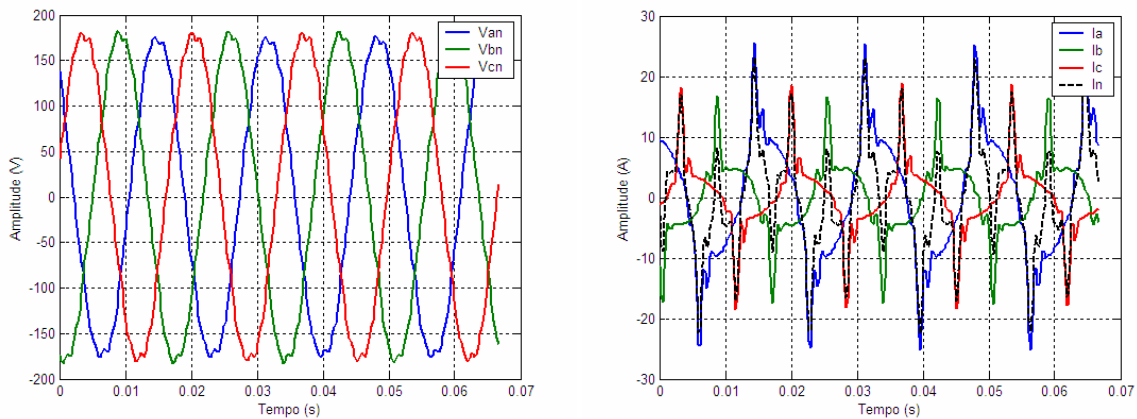


FIGURA 2 - Tensões fase-neutro e correntes de fase e de neutro para o inversor atendendo a minirrede.

Durante o momento de operação com o gerador a diesel no período noturno (Figura 3), observa-se que a forma de onda da tensão sofre um recorte, devido ao gerador a diesel alimentar a minirrede através da saída do inversor e, ao mesmo tempo, carregar o banco de baterias por meio de um retificador trifásico controlado. Para o caso da Figura 3, as tensões entre fase e neutro encontram-se com valores *rms* de 125,08 V para a fase A, 126,30 V para a fase B, e 126,42 V para a fase C, apresentando um *FD*, considerando a tensão entre fases, igual a 0,65 %. As fases A e B encontram-se mais carregadas, apresentando correntes com valores *rms* de 16,17 A e 16,56 A, respectivamente, enquanto as correntes na fase C e no neutro são iguais a 15,10 A e 10,70 A, respectivamente. Os fatores de crista em cada fase encontram-se elevados, com 2,16 para a fase A, 2,11 para a fase B, 2,32 para a fase C, e 2,19 no condutor neutro.

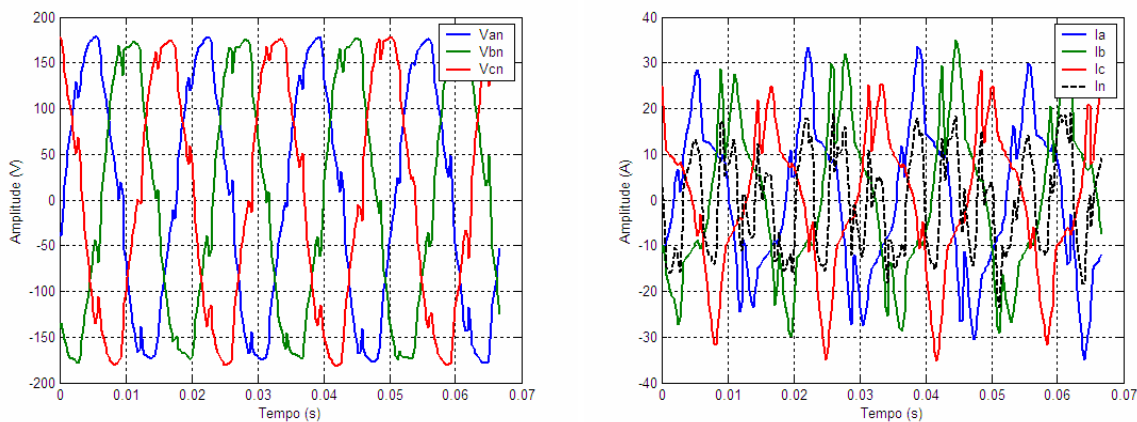


FIGURA 3 - Tensões fase-neutro e correntes de fase e de neutro para o gerador a diesel atendendo a minirrede.

As *THDs* de tensão fase-neutro para as fases A, B e C são iguais a 8%, 10,4% e 10,7%, respectivamente, e as *THDs* de corrente nas fases A, B, C e no condutor neutro são iguais a 27,7%, 29,2%, 36,3% e 280,1%, respectivamente. As menores distorções nas correntes, em relação ao caso anterior, devem-se à entrada em operação, neste momento, de algumas cargas motrizes (apresentam baixa *THD* de corrente). Contudo, verifica-se a assimetria de meia-onda no formato da corrente, levando ao surgimento de componentes harmônicas pares, e a tensão entregue à minirrede pelo gerador a diesel apresenta um alto valor de *THD*. No condutor neutro, a componente de terceira harmônica apresenta um valor *rms* de 8,43 A, enquanto a componente na frequência fundamental é igual a 3,35 A.

## 6.0 - CONCLUSÃO

No presente trabalho fez-se a avaliação da qualidade da energia elétrica de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel, instalado na comunidade de Tamaruteua, descrevendo as características elétricas dos componentes do sistema, bem como a análise dos mesmos em determinados períodos de operação. O sistema de Tamaruteua tem por finalidade o atendimento das necessidades básicas de energia elétrica da localidade,

utilizando a conversão de recursos renováveis (solar e eólico) e não renováveis (geração a diesel) para produção de energia elétrica.

Principalmente em sistemas de pequeno porte, cuja potência de curto-circuito é baixa, a qualidade de energia depende da influência mútua entre geração e carga, ou seja, depende tanto do fornecimento de energia quanto dos consumidores conectados à rede de distribuição, através das características das instalações e dos equipamentos utilizados na geração, distribuição e consumo de energia elétrica.

Comparando o suprimento pelo sistema renovável (inversor) com aquele pelo sistema não renovável (gerador a diesel), a qualidade de energia fornecida à minirrede, em geral, é melhor quando o inversor está em operação, avaliando-se os parâmetros de *THD* e *FD* médios de tensão, e quanto a eventos de VTCD e VTLD.

De uma forma geral, tem-se que o sistema de Tamaruteua fornece uma energia elétrica de boa qualidade, atendendo em níveis de tensão classificados como adequados de acordo com os padrões normativos considerados para redes de distribuição de sistemas de grande porte, tido como referência para análise do sistema de Tamaruteua, haja vista que este tipo de sistema ainda não possui regulamentação. Porém, há de se observar que não foi realizada uma análise quanto à qualidade de energia em pontos críticos localizados ao longo da minirrede de distribuição, onde se encontram os consumidores mais afastados do sistema de geração, embora não se tenha percebido nenhuma anomalia e registrado reclamações quanto ao nível de tensão entregue no final de rede.

Outro fator positivo implantado no sistema em estudo é a automação do sistema Inversor-USCA-diesel, que oferece maior confiabilidade no funcionamento do sistema (menor intervenção do operador), eliminando o chaveamento manual entre uma fonte e outra, evitando nesse caso uma interrupção no suprimento.

Finalmente, pode-se concluir que a análise aqui exposta do sistema híbrido de Tamaruteua serve de base para outros projetos similares que visem aos mesmos fins e/ou possuam características similares. Porém, enfatiza-se a necessidade de se criar uma regulamentação própria para esses sistemas, para que a qualidade da energia suprida seja assegurada.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2008.
- (2) ANEEL, Resolução No 024, Disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras, 2000.
- (3) MODESTO, N. S. e SANTOS, D. S. Análise da Operação e da Qualidade de Energia de um Sistema de Eletrificação Híbrido (Solar-Eólico-Diesel) Suprindo Minirrede de Distribuição, Trabalho de Conclusão de Curso, FEE/ITEC/UFPA, 2008.
- (4) ANEEL, Resolução N° 676, Disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, 2003.
- (5) GALHARDO, M. A. B. e PINHO, J. T. Avaliação da Qualidade da Energia Fornecida por Sistemas Renováveis Isolados de Pequeno Porte, AGRENER GD, 2004.