



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

GCQ - 20
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA FORNECIDA POR UM SISTEMA HÍBRIDO DE
PEQUENO PORTE**

Claudioiro Fábio de Oliveira Barbosa *
GEDAE/UFPA

João Tavares Pinho
GEDAE/UFPA

Marcos André Barros Galhardo
GEDAE/UFPA

Diego Pereira Cruz
GEDAE/UFPA

Wilson Monteiro de Albuquerque Maranhão
GEDAE/UFPA

Rodrigo Guido Araújo
CENPES/PETROBRAS

RESUMO

Neste trabalho faz-se um estudo da qualidade de energia (QE) fornecida por um sistema de eletrificação do tipo híbrido solar-eólico-diesel de pequeno porte, instalado na vila de São Tomé, situada no município de Maracanã, estado do Pará. A rede de distribuição é alimentada por dois sub-sistemas: inversor estático (geração renovável) e gerador a diesel. Para avaliar a QE fornecida pelo sistema, foram realizadas monitorações da tensão e corrente no barramento de saída e em pontos considerados críticos da mini-rede elétrica de distribuição no período correspondente à demanda máxima (período noturno).

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia, Sistemas Híbridos, Energias Renováveis, Sistemas Isolados.

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eletricidade e a necessidade da produção de energia com mínima degradação ambiental fortalecem a geração de energia elétrica através do emprego das fontes renováveis de energia em todo o mundo. O Brasil destaca-se por possuir uma grande quantidade de recursos e reservas energéticas de caráter renovável, como a hídrica, a solar, a eólica e a biomassa. Atentando-se a isso e ao fato de que o plano nacional de universalização do serviço de energia elétrica está definido para ser implantado até 2015 (1), o emprego de tais recursos como fontes primárias de energia serão imprescindíveis para o caso da geração isolada.

Neste contexto, os sistemas híbridos (SH's, sistemas que utilizam mais de uma fonte primária de energia) de pequeno e médio portes para geração de eletricidade apresentam-se como uma forma importante do uso das energias renováveis disponíveis localmente para o atendimento descentralizado de pequenas demandas através de mini-redes de distribuição.

No estado do Pará, a inserção de SH's já é realizada em pequenos aglomerados populacionais (vilas) dispersos e semi ou totalmente isolados (característica marcante da região Amazônica), sem perspectivas a curto prazo do abastecimento pela rede elétrica convencional (2). Além disso, são escassos os estudos que fazem a exposição dos principais problemas e ações mitigadoras relacionados à QE nesses sistemas, tema que é uma preocupação tanto para as geradoras e distribuidoras de energia quanto para os consumidores.

Daí a concepção deste trabalho, que discorre sobre um estudo de caso da QE fornecida por um sistema híbrido solar-eólico-diesel por meio de monitorações e avaliações da tensão e corrente de fornecimento no barramento de saída e em pontos considerados críticos da mini-rede elétrica de distribuição (final da rede, consumidores com cargas mais elevadas, etc.) no período correspondente à demanda máxima (período noturno).

*Caixa Postal 8605, Agência Núcleo Universitário, CEP 66075-900 - Belém - PA - BRASIL
Tel.: (091) 3183-1299 - Fax: (091) 3183-1299 - e-mail: cfob@ufpa.br

2.0 - O SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-EÓLICO-DIESEL INSTALADO NA VILA DE SÃO TOMÉ

2.1 Configuração do sistema

Em setembro de 2003 iniciou-se o funcionamento do sistema de geração de energia elétrica da vila de São Tomé, sendo do tipo híbrido solar-eólico-diesel e isolado, com o armazenamento da energia elétrica gerada pelas fontes renováveis em um banco de baterias e o complemento da geração (reserva) com um grupo gerador a diesel, o qual é fundamental para garantir a confiabilidade do sistema, principalmente nos períodos de pouca geração solar-eólica (3). A figura 1 mostra o diagrama do sistema.

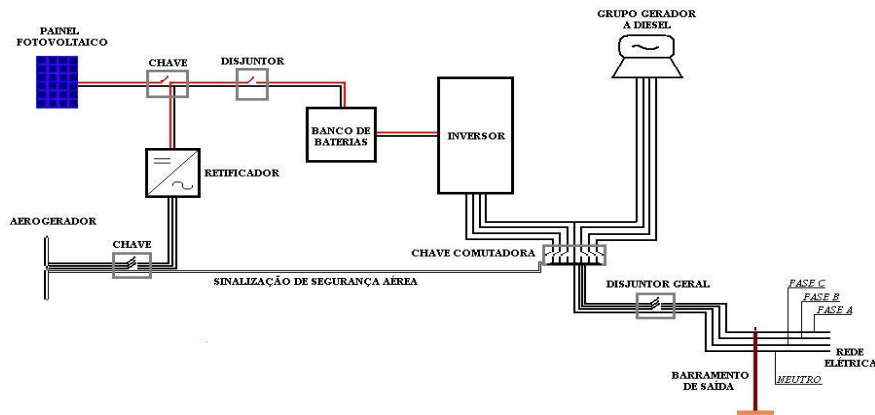


FIGURA 1 – Diagrama do sistema híbrido solar-eólico-diesel da vila de São Tomé. Fonte: (3).

2.2 Características gerais do sistema

A tabela 1 apresenta as características gerais do sistema híbrido instalado.

TABELA 1 – Características do sistema híbrido da vila de São Tomé. Fonte: (2).

Componentes	<p>Sistema eólico 1 Aerogerador de 10 kW (7,5 kW referência) a 30 m de altura. 1 Controlador de carga e retificador.</p> <p>Sistema solar fotovoltaico 1 arranjo fotovoltaico de 3,2 kWp (módulos de 80 Wp).</p> <p>Comuns às fontes de energia 1 Banco de baterias – 40 un. automotivas chumbo-ácido 12 V_{CC}/150 Ah (série/paralelo 120 V_{CC}). 1 Inversor estático 3Φ de 15 kW – 127/220 V_{CA}, 60 Hz e Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_V) < 5 %.</p> <p>Sistema diesel-elétrico 1 Grupo gerador a diesel de 20 kVA.</p>
Operação	De acordo com as condições do banco de baterias, o sistema renovável supre a carga. Se a geração renovável não for suficiente para atender à demanda solicitada, este sistema é desconectado e o grupo gerador a diesel é então acionado para suprir as necessidades da comunidade (figura 1). Ressalta-se que a operação do sistema ainda não está sendo feita de forma automática.

O sistema abastece hoje 51 unidades consumidoras (79 % UC's) através de uma mini-rede de distribuição de baixa tensão (127 V_{CA} fase-neutro e 220 V_{CA} fase-fase), com o ramo principal trifásico e o restante bifásico, sendo a área de abrangência cerca de 15 ha. O fornecimento de energia elétrica às UC's é monofásico, sendo a medição e o gerenciamento de energia, em cada UC, feito por um sistema piloto de pré-pagamento de energia elétrica (3).

3.0 - CARACTERÍSTICAS DA CARGA DA VILA DE SÃO TOMÉ

Conhecer as características da carga (tipo, distribuição e seu perfil) do sistema elétrico em estudo é um fator importante na análise da QE fornecida pelo mesmo. Portanto, nesta seção são apresentadas as principais características da carga da vila de São Tomé (4).

3.1 Tipo da carga alimentada e distribuição

A carga instalada (CI) nas UC's da vila é predominantemente residencial, como cargas de iluminação (lâmpadas PL, fluorescentes e incandescentes), eletrodomésticos (refrigeradores, liquidificadores, ferro de passar, etc.), comunicação/lazer (rádios, televisores, etc.) e motores elétricos (bombas d'água).

A soma das cargas de cada uma das UC's da vila equivale hoje a uma potência instalada total de cerca de 15,5 kW. Valor este bem próximo à potência nominal do grupo gerador a diesel (16 kW), e já é superior à potência nominal do inversor (15 kW). Entretanto, dificilmente todas as cargas estarão em operação ao mesmo tempo. A figura 2 mostra a CI da vila, em termos de percentual, por tipo, e distribuídas por fase.

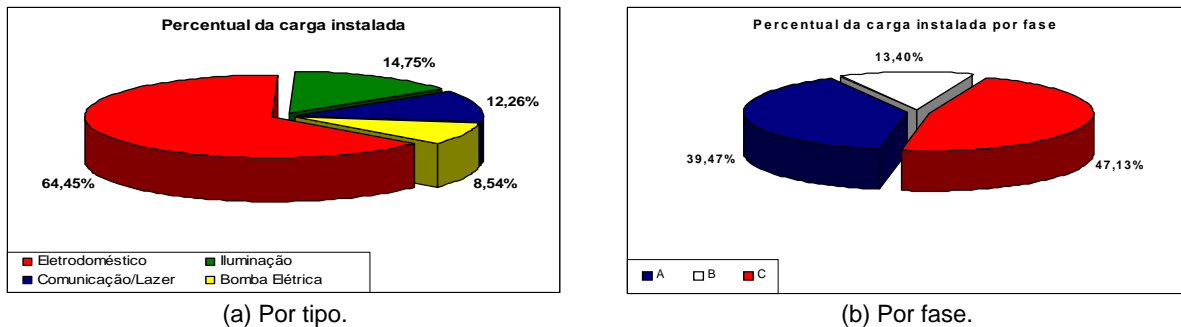


FIGURA 2 – Percentual da carga instalada.

Pode-se observar que o maior percentual (64,45 %) de CI hoje na vila de São Tomé corresponde a eletrodomésticos. As cargas eventuais (ferro de passar, liquidificadores, bombas d'água, lavadoras) totalizam uma grande potência instalada (aproximadamente, 9,2 kW); todavia, são utilizadas somente por um período curto de tempo, enquanto as cargas comumente usadas quando o sistema está em operação no período noturno (lâmpadas, televisores e refrigeradores), totalizam uma potência de cerca de 5,6 kW. Desse total, cerca de 2 kW correspondem às cargas com características fortemente não-lineares, que injetam na rede elétrica correntes com alto conteúdo harmônico.

A fase mais carregada do sistema é a fase C (47,13 %), apesar de não ser a que possui o maior percentual de UC's conectadas (fase A – 40,38 %; fase B – 23,08 % e fase C – 36,54 %).

3.2 Perfil da carga

O perfil da carga, isto é, da potência demandada pela vila é típico de uma comunidade isolada com baixa demanda, tendo um aumento significativo ao anoitecer (figura 3), verificando-se a demanda máxima no período entre 18:00 e 20:00 horas.

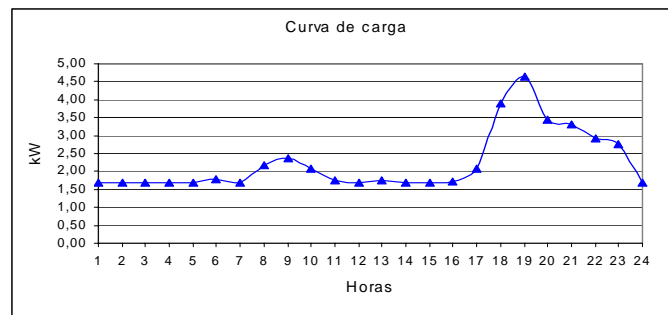


FIGURA 3 – Curva de carga típica da vila de São Tomé.

4.0 - ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

Para avaliar a QE do sistema elétrico da vila de São Tomé, foram feitas medições das formas de onda de tensão e corrente, bem como de seus espectros harmônicos e monitorações dos valores RMS ao longo do tempo. Essas medições foram realizadas com auxílio de um osciloscópio digital no barramento de saída (figura 1) e em pontos considerados críticos da mini-rede elétrica de distribuição (final da rede, consumidores com cargas mais elevadas, etc.) no período correspondente à demanda máxima.

4.1 Monitoração das fases no barramento de saída (inversor operando)

Das monitorações realizadas verifica-se que a forma de onda de tensão fornecida pelo inversor sofre influência das características não-lineares da carga da vila, embora não se tenha registrado valores de THD_V maiores que 7,5 %. A fase denominada de B apresenta, em média, menor THD_V (6,55 %) e a fase C a maior (7,22 %). As figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, exemplos das formas de onda e os espectros harmônicos de amplitude de tensão das fases consideradas críticas no sistema (fase B – menor CI, porém a que utiliza maior quantidade de cargas não-lineares; e fase C – fase de maior demanda do sistema).

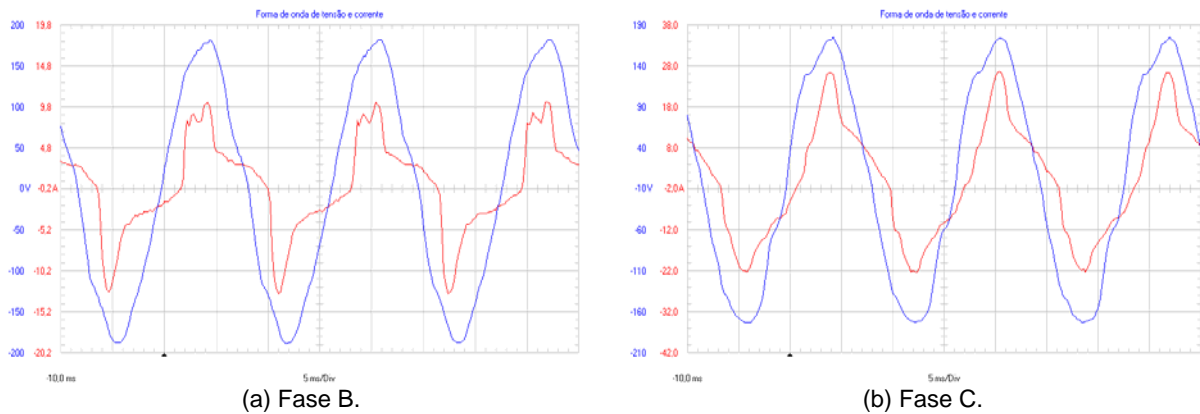


FIGURA 4 – Formas de onda de tensão e corrente.

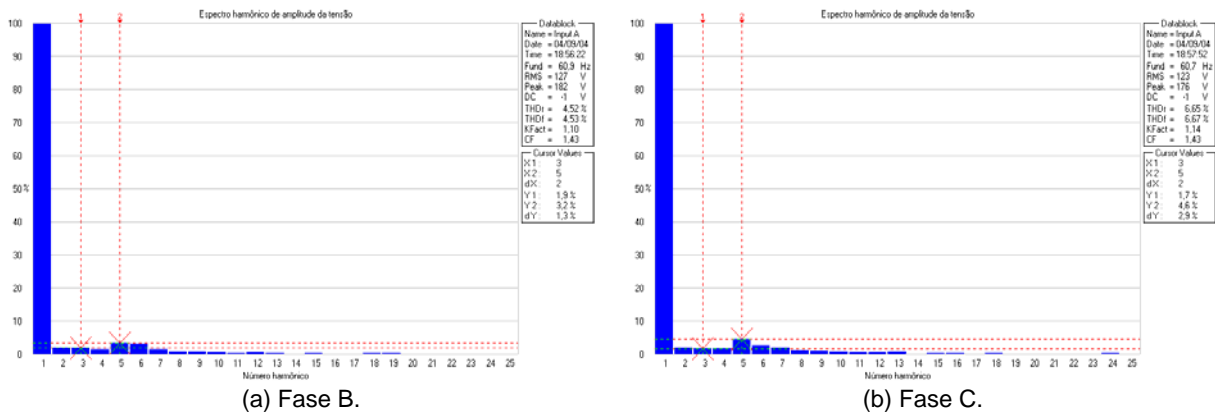


FIGURA 5 – Espectros harmônicos de amplitude da tensão.

Verifica-se que, ao contrário da tensão, a corrente possui distorções consideráveis em sua forma de onda (THD_i elevadas). A figura 6 mostra exemplos dos espectros harmônicos de amplitude de corrente das fases B (maior THD_i , média de 42,65 %) e C (menor THD_i , média de 24,36 %).

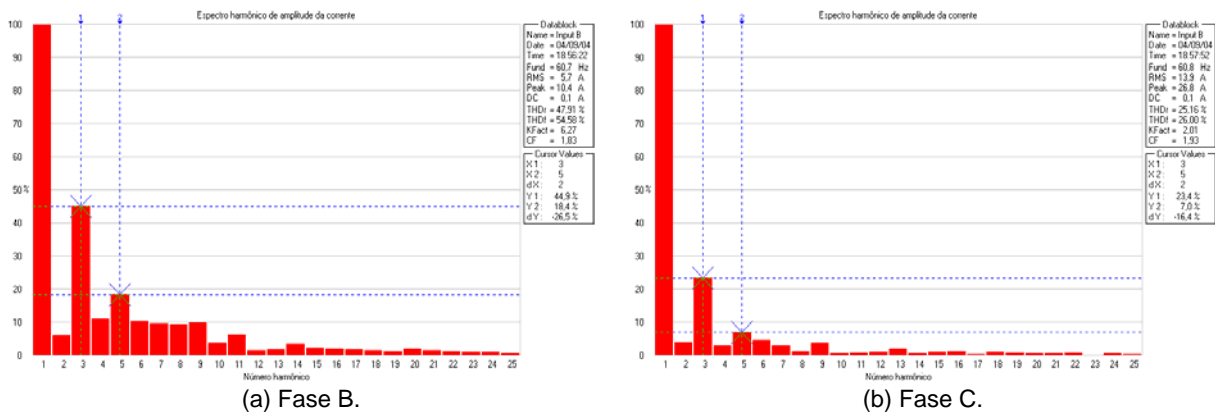


FIGURA 6 – Espectros harmônicos de amplitude da corrente.

A componente harmônica de ordem três da corrente é a que apresenta maior amplitude em todas as fases, pois esta característica é típica dos equipamentos monofásicos não-lineares utilizados. Verifica-se também a presença de componentes harmônicas de ordem par na corrente, as quais surgiram devido à forma de onda de corrente não ser idêntica nos semiciclos positivo e negativo.

Com relação aos valores de tensão e corrente RMS, a fase C, conforme esperado, apresenta a maior corrente RMS (13,9 A). Esse valor alto de corrente, aliado com a sua THD_i , faz com que a mesma tenha o maior afundamento de tensão (123 V_{RMS}).

A figura 7 mostra o espectro dos valores RMS das componentes harmônicas no condutor neutro obtido pela composição das correntes nas fases. Nela observa-se a presença de uma corrente na frequência fundamental de

valor elevado (7,8 A), devido principalmente ao desbalanço de cerca de 1,3 % do sistema. Conforme esperado, a componente de terceira ordem harmônica é a que apresenta maior valor RMS (aproximadamente 9 A). Verifica-se também um nível CC significativo no condutor (1 Arms). A THD_i calculada foi de 119,93 % e o valor da corrente em RMS foi de 12,31 A.

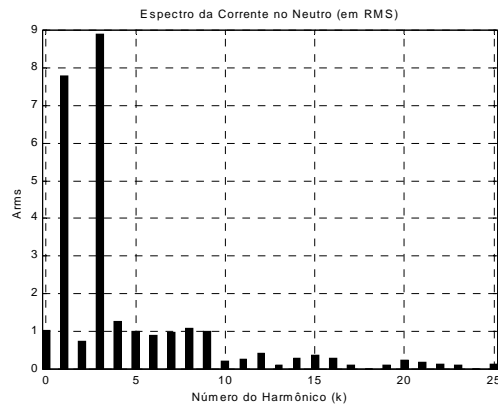


FIGURA 7 – Espectro da corrente no neutro (em RMS).

4.2 Monitoração das fases no barramento de saída (grupo gerador diesel operando)

O grupo gerador a diesel, por ser de baixa potência e mesmo operando a vazio ($THD_V = 6,65\%$) (5), apresenta forma de onda de tensão de maior conteúdo harmônico que o inversor. A figura 8 apresenta medições de tensão e corrente nas fases B e C.

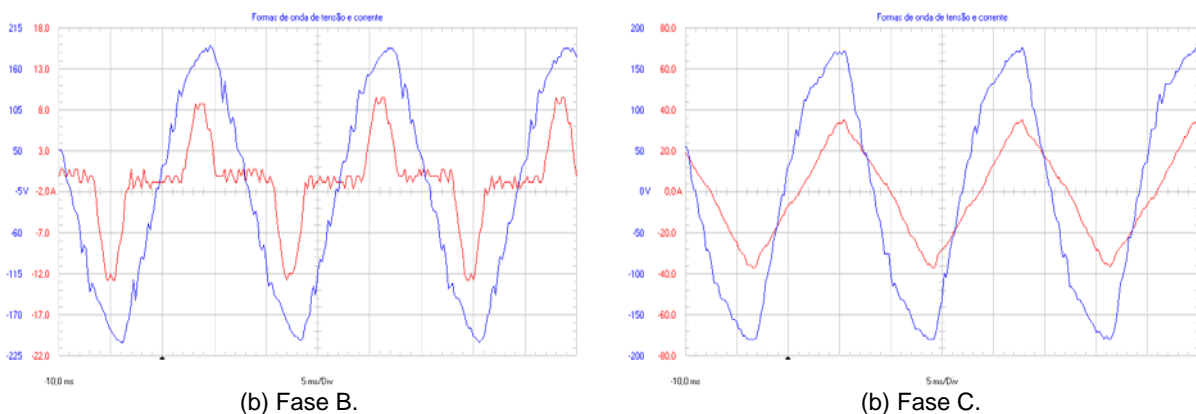


FIGURA 8 – Formas de onda de tensão e corrente.

As ondulações apresentadas na forma de onda de tensão devem-se à presença de componentes harmônicas em frequências mais elevadas. As figuras 9 e 10 mostram exemplos dos espectros harmônicos de amplitude de tensão e corrente das fases B e C.

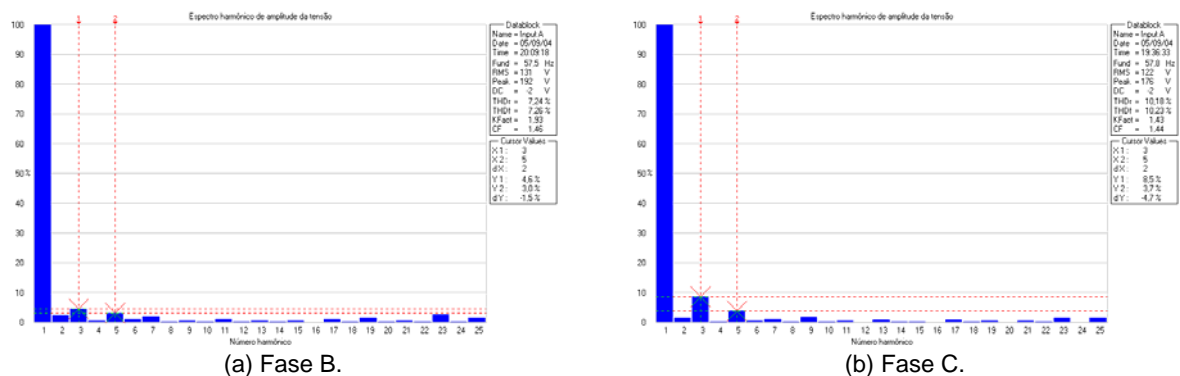


FIGURA 9 – Espectros harmônicos de amplitude da tensão.

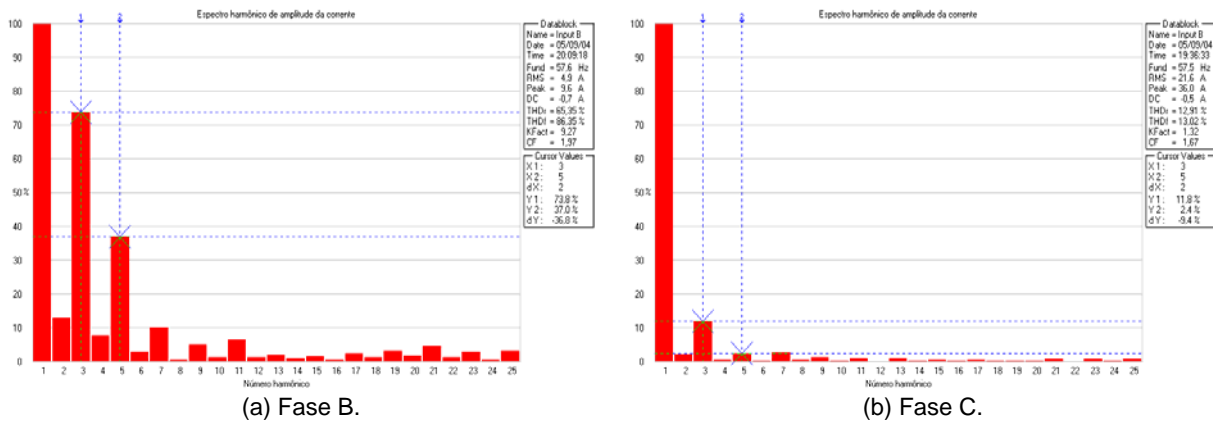


FIGURA 10 – Espectros harmônicos de amplitude da corrente.

Entre as fases monitoradas, a fase B é que apresenta, em média, menor THD_V (8,23 %) e a fase C ($THD_V = 9,49$ %) a maior. Em relação à distorção harmônica total na corrente, a fase B apresenta maior média (48,6 %), verificando-se elevadas percentagens das amplitudes do 3º e 5º harmônicos em relação à componente fundamental.

A fase C possui o maior valor RMS de corrente registrado (28,3 A) e a redução da THD_I deve-se à utilização de uma moto-bomba elétrica (corrente de regime de 12 A_{RMS}) com características praticamente lineares. A figura 11.a mostra uma monitoração do valor RMS de tensão e corrente da fase C no período noturno.

Na figura 11.b, única monitoração realizada durante o período diurno, verifica-se um afundamento de tensão de 126,3 V_{RMS} para 86,1 V_{RMS} no momento da partida da bomba elétrica (corrente de surto superior a 26 A). Esse afundamento, de cerca de 40 V_{RMS} , prejudica a QE, pois o gerador a diesel é desacelerado, ocasionando a diminuição na tensão e frequência, e, conseqüentemente, o funcionamento dos equipamentos das unidades consumidoras conectadas na fase, contribuindo para o desbalanceamento de potência do sistema (cerca de 3 %). Quando a mesma bomba elétrica é acionada no período noturno, a QE do sistema é ainda mais afetada, proporcionando a diminuição na iluminância das lâmpadas (devido à queda de tensão na fase), os desligamentos de alguns televisores (na partida da bomba), prejudicando a vida útil desses aparelhos.

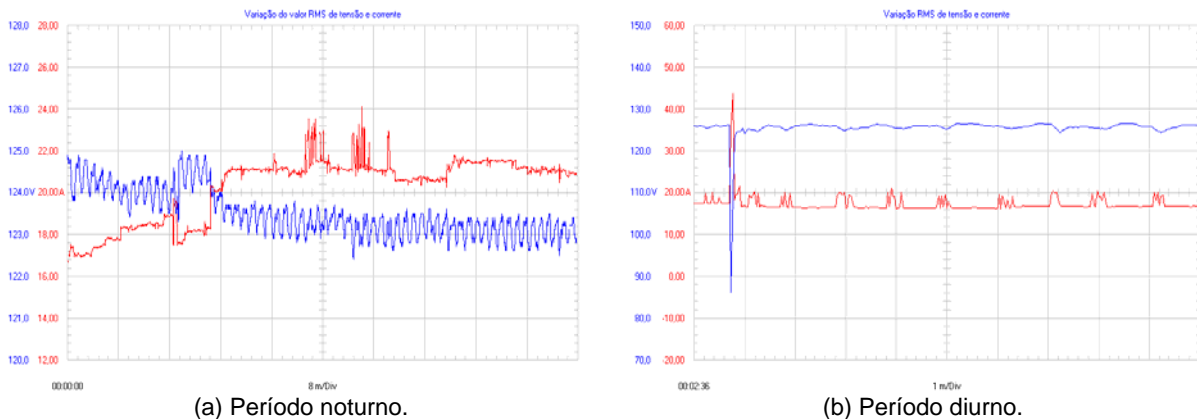


FIGURA 11 – Variação do valor RMS de tensão e corrente da fase C.

A figura 12 mostra o espectro dos valores RMS das componentes harmônicas no condutor neutro sem (12.a) e com (12.b) a bomba elétrica em operação. Comparando ambas as figuras, observa-se a significativa redução de aproximadamente 45,7 % da THD_I ($THD_I = 105,95$ % – bomba não operando e $THD_I = 48,41$ % – bomba operando), dada a característica supracitada da bomba elétrica, que de certa forma compensa a forte característica não linear das cargas do sistema. Porém, valores RMS da corrente calculadas para as referidas situações de operação da bomba elétrica foram de 12,78 A e 19,35 A.

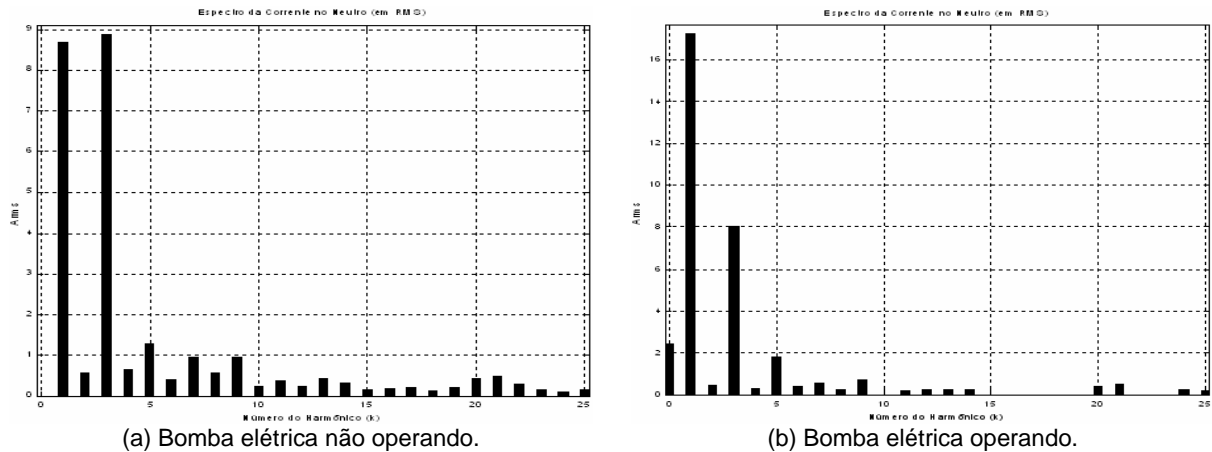


FIGURA 12 – Espectro da corrente no neutro (em RMS).

4.3 Pontos críticos da mini-rede elétrica de distribuição da vila

Na figura 13 e na tabela 2 são mostrados, respectivamente, os pontos verificados críticos ao longo da mini-rede elétrica de distribuição e os valores monitorados de tensão, corrente (RMS) e frequência de algumas UC's.

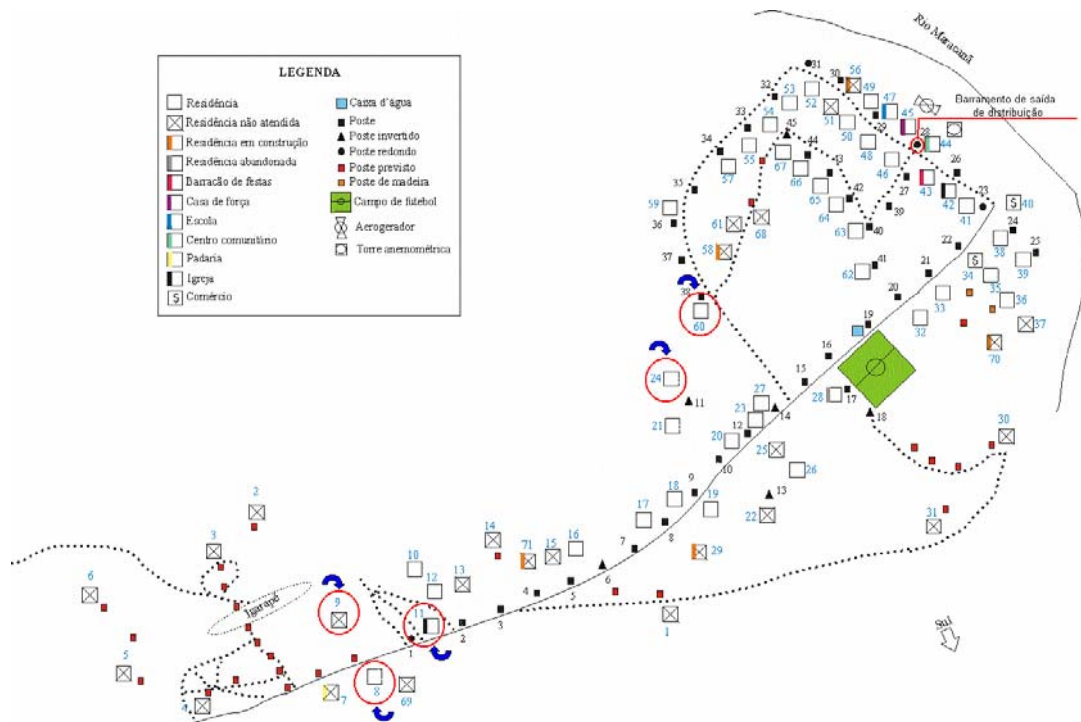


FIGURA 13 – Croqui da vila de São Tomé (em destaque os pontos críticos monitorados).

TABELA 2 – Valores monitorados de tensão, corrente e frequência.

UC	Fase	CI (W)	Barramento de saída V_{RMS}		Diesel operando			Inversor operando			Observação
			Diesel	Inversor	V_{RMS}	A_{RMS}	Hz	V_{RMS}	A_{RMS}	Hz	
24	A	1.645	131,6	-	127	2,26	59,4	-	-	-	Maior CI do sistema
08	A	888	131,6	126,4	124	1,76	58,8	117,9	2,25	60,6	Final de rede
11	B	185	134,8	-	134	1,44	58	-	-	-	Final de rede
09	C	1.175	127,1	122,1	112	1,14	58,1	117	1,19	60,2	Final de rede
60	C	381	128,7	122,2	126	1,12	58,4	122	1,04	60,6	Final de rede

Da tabela 2, verifica-se que há quedas de tensão nos finais da rede que, dependendo do valor (RMS) da tensão no barramento de saída, da distância geração-consumo e do carregamento das fases as quais as UC's estão

ligadas, podem ser bastante elevadas como, por exemplo, a queda de 15,1 V_{RMS} registrada na monitoração feita na UC 09 (fase C – mais carregada), e cujo valor da tensão (112 V_{RMS}) no ponto de entrega caracteriza um atendimento precário ($109 \leq V_{medido} < 116 V_{RMS}$ ou $132 < V_{medido} \leq 140 V_{RMS}$ (6)) à mesma. Outro ponto de atendimento precário registrado, porém com baixa queda de tensão, devido à fase B ser a menos carregada, foi na UC 11 (134 V_{RMS}). Tais variações de tensão contribuem para reduzir a QE, afetando os aparelhos eletro-eletrônicos instalados. A redistribuição das unidades consumidoras de forma simétrica ao longo da mini-rede é uma possível solução para amenizar esse problema de qualidade.

Com relação à frequência de operação padrão de atendimento (60 Hz), observa-se uma maior variação no seu valor quando o sistema diesel opera (geralmente 60 Hz \pm 3 %), pois o sistema não possui dispositivos de controle tensão/frequência. Enquanto o inversor apresenta pequenas variações na frequência (60 Hz \pm 1 %).

5.0 - CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se destacar que os principais problemas de QE enfrentados pelo sistema híbrido em estudo são:

- As elevadas distorções harmônicas, principalmente de corrente, devido ao grande uso de cargas não-lineares (exemplo, utilização de lâmpadas PL) para a conservação de energia, que para os sistemas híbridos é um fator muito importante (limitação de geração e intermitência das fontes primárias).
- Desbalanceamento de potência nas fases.
- Os afundamentos de tensão (*sag*) decorrentes da elevada corrente de surto devida ao acionamento de motores (bombas) elétricos. Caso a soma da corrente de surto com o valor da corrente de regime da fase seja superior ao limite de corrente de surto do inversor (49,2 A), quando este está operando, poderá acarretar na interrupção do fornecimento de energia.
- As quedas de tensão, principalmente nos finais da rede.
- A grande variação da frequência padrão de operação, quando o sistema diesel-elétrico supre a vila, decorrente da falta de controle apropriado.

Esses problemas alertam para a necessidade de adoção de ações mitigadoras, como o controle do aumento da CI e dos tipos de aparelhos que apresentam altas correntes de surto e sua adequada instalação; a redistribuição das UC's de forma mais simétrica possível nas fases; e a aplicação de um dispositivo de controle de tensão/frequência no sistema diesel-elétrico.

Da análise realizada, percebe-se que a QE fornecida pela geração da parte do sistema híbrido considerada renovável (sistema solar-eólico) através do inversor é bem melhor que a qualidade de energia fornecida pelo sistema diesel-elétrico. Observando que, de acordo com os padrões de QE exigidos, o sistema solar-eólico demonstra condições favoráveis de ser conectado à rede da concessionária, desde que instalados os equipamentos de controle e proteção para esse fim.

Ademais, verifica-se que o sistema pré-pago de energia contribui para o aumento da autonomia do sistema (maior tempo de utilização e menor frequência de interrupções), pois o mesmo combate diretamente o consumo excessivo, pois facilita a administração da energia por parte do usuário, característica importantíssima para um sistema de eletrificação alternativo do tipo híbrido, como é o caso do implantado na vila de São Tomé, que necessita de condições climáticas favoráveis.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Universalização – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, <http://aneel.gov.br>, acesso em 01/11/2004.
- (2) BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., PEREIRA, E. J. S., GALHARDO, M. A. B., VALE, S. B., MARANHÃO, W. M. DE A. Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica. AGRENER GD 2004 - 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída, Unicamp – Campinas, outubro, 2004.
- (3) BARBOSA, C. F. O. Montagem, comissionamento e telesupervisão de um sistema híbrido solar-eólico-diesel para geração de eletricidade. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA – Belém-Pará, março, 2004.
- (4) BARBOSA, C. F. O., CRUZ, D. P., GALHARDO, M. A. B., MARANHÃO, W. M. A. Relatório Técnico – Levantamento da carga da vila de São Tomé. GEDAE/UFPA – Belém-Pa, outubro, 2004.
- (5) BRITO, A. U., GALHARDO, M. A. B., MACÊDO, W. N., PINHO, J. T. Power quality analysis of a small pv-wind-diesel hybrid system in the countryside of the state of Pará-Brazil. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, juny. 2004.
- (6) Resolução Nº 676, de 16 de dezembro de 2003 – Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.