

Confiabilidade de Sistemas Isolados Baseados em Energias Renováveis: requisitos, soluções e resultados

D. Q. Oliveira, S. L. Lima, O. R. Saavedra, L. A. S. Ribeiro, N. J. Camelo

Resumo – O atendimento de energia elétrica às comunidades isoladas por meio de sistemas de geração baseados em fontes renováveis é uma alternativa viável. No entanto, a confiabilidade destes sistemas tem se revelado baixa em diversos aspectos. Neste artigo faz-se uma caracterização e análise dos aspectos críticos que impactam a confiabilidade destes sistemas, tomando como estudo de caso o projeto piloto na Ilha de Lençóis. São descritas as soluções propostas e sua implementação, assim como os resultados obtidos, observando-se significativa melhoria da confiabilidade do sistema.

Palavras-chave - Sistemas isolados, Confiabilidade, Sistemas híbridos.

I. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica é bastante desigual no mundo. Grande maioria da população mundial vive em áreas onde o atendimento é precário. Parte dela habita em áreas isoladas onde o atendimento por meio da extensão da rede convencional é impossível por motivos naturais, como distância, dificuldade de acesso, localização dentro de reservas ambientais, áreas insulares ou montanhosas, clima rigoroso [1].

Do ponto de vista econômico estas comunidades se caracterizam pela baixa renda e pouco consumo de energia, se constituindo em mercados pouco atrativos para as concessionárias face aos grandes investimentos necessários para o atendimento sem perspectivas de retorno financeiro.

Para atendimento destas comunidades, a utilização de sistemas isolados que gerem energia a partir de fontes renováveis tem se tornado uma solução viável. Estes podem ser do tipo individual, onde cada unidade consumidora possui um gerador independente; ou centralizado, onde as unidades consumidoras são atendidas por meio de uma mini-rede de distribuição.

Os sistemas centralizados são mais robustos do que os individuais por serem mais facilmente controlados, além de terem custos de operação e manutenção reduzidos. São geralmente compostos de fontes renováveis diferentes, e por isto, chamados de sistemas híbridos. Eles combinam as

características complementares das fontes, aproveitando as peculiaridades de cada uma. [9].

O conceito de mini-rede surgiu a partir da necessidade de integração da geração distribuída aos sistemas de distribuição. São formadas de geradores, dispositivos de armazenamento e cargas controláveis [2] [10]. Nelas as fontes geradoras e cargas podem ser desconectadas e conectadas sem interrupção de fornecimento para o consumidor [11]. As mini-redes podem operar em dois modos: conectadas a um sistema central ou autonomamente [3]. As principais vantagens são: a proximidade entre geração e consumo; diminuição das perdas de transmissão e distribuição; melhoria da qualidade de energia; menos cortes no fornecimento; integração das fontes renováveis; otimização do sistema de armazenamento e maior disponibilidade de energia [12-13]. Sistemas com mini-redes já estão em operação em diversos países [14] e existem diversos estudos e normas que tratam de aspectos técnicos, regulatórios, comerciais e econômicos [15] [26].

Neste artigo faz-se uma caracterização e análise dos aspectos críticos da baixa confiabilidade inerente aos sistemas isolados baseados em fontes renováveis. Apresenta-se o projeto piloto Sistema Híbrido de Geração de Energia da Ilha de Lençóis, Cururupu - MA – com propostas de soluções e os resultados obtidos. São considerados também os índices de continuidade, classificado como, Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC); os harmônicos e o desempenho.

II. ASPECTOS DE CONFIABILIDADE EM SISTEMAS ISOLADOS

A confiabilidade em sistemas híbridos isolados não depende somente de fatores técnicos, mas também da intermitência das fontes de geração, da precariedade da automação, da falta de pessoal especializado *in loco* para manutenção, além das condições severas de operação dos equipamentos como inversores e a rede de distribuição. Neste tópico faz-se uma abordagem sobre: intermitência da geração; mini-rede de distribuição; coordenação da proteção; inversores; regulação da tensão; bem como manutenção e automação.

A. Intermitência das Fontes de Geração

A geração de energia a partir de fontes renováveis possui característica intermitente, pois os recursos naturais necessários não são disponíveis continuamente. Esses, no entanto podem ser previsíveis. No caso da energia fotovoltaica e eólica, a irradiação solar e velocidade dos ventos podem ser

Denisson Q. Oliveira (e-mail: denissonq@gmail.com).

Shigeaki L. Lima (e-mail: shigeaki@dee.ufma.br).

Oswaldo R. Saavedra (e-mail: o.saavedra@ieee.org).

Luiz A. Ribeiro (e-mail: luiz_ribeiro@dee.ufma.br).

Nelson J. Camelo (e-mail: ncamel@dee.ufma.br).

Instituto de Energia Elétrica, DEE-UFMA, Av. dos Portugueses s/n, Campús do Bacanga, CEP 65040-080, Brasil

previstas a partir de métodos probabilísticos, como as cadeias de Markov e a distribuição de Weibull, respectivamente [5] [20]. Já a previsão de recursos hídricos por meios meteorológicos e estatísticos, para aplicação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), também é conhecida. Da mesma forma acontece com a fonte maré-motriz e energia das ondas.

A intermitência das fontes de geração contrasta com a necessidade de atendimento contínuo e de qualidade aos consumidores. Em alguns casos, isto implica um fator de capacidade baixo, resultando em geração insuficiente para atender a demanda.

B. Rede de Distribuição

A geografia da região pode ser um elemento que dificulta a instalação da rede de distribuição: estruturas e acessórios (posteamo, cabos, isoladores, etc.). Algumas áreas geográficas demandam projetos específicos de implantação de mini-redes, como por exemplo, regiões montanhosas com solos rochosos, ilhas arenosas com presença de dunas, localidades pantanosas com solos encharcados, e regiões de florestas tropicais com presença de árvores e rios.

A grande pluviosidade, a velocidade de vento, a salinidade e grandes amplitudes de temperatura são fatores climáticos que atingem os materiais das estruturas, podendo ocasionar corrosão e falhas mecânicas (fadiga, cisalhamento).

C. Faltas e Proteção

As faltas podem estar relacionadas a curtos-circuitos nas unidades consumidoras, causadas por acidentes ou mesmo pelo desgaste das instalações (corrosão nos cabos e conexões) devido às condições ambientais agressivas. As faltas relacionadas à mini-rede de distribuição são causadas por descargas atmosféricas e problemas nas fontes de geração, por exemplo, nos controladores de carga (sistemas fotovoltaicos) e retificadores (turbinas). Em regiões com vegetação alta pode haver quedas de árvores e galhos sobre a mini-rede, causando curtos-circuitos ou rompimentos. Já no caso de proteção, erros na coordenação causam desligamentos que podem atingir áreas adjacentes não relacionadas à falta e conseqüente decréscimo dos índices de continuidade.

D. Inversores de tensão

Em sistemas de geração baseados em fontes renováveis conectados à rede ou isolados o inversor é responsável por converter a energia das fontes fotovoltaica e eólica e/ou armazenada no banco de baterias, para os níveis de tensão e frequência adequados à mini-rede de distribuição. Devido aos aspectos críticos para a confiabilidade em sistemas isolados, é primordial que ele seja robusto, com baixas perdas de conversão e desempenho dentro de parâmetros aceitáveis.

Equipamentos com estas características não são comumente disponíveis no mercado, principalmente quando se trata de níveis altos de tensão e potência. É mais freqüente encontrá-los para baixas potências e com custos da ordem de quatro a seis vezes o valor da potência nominal.

E. Regulação de Tensão

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estipula através da Resolução Normativa nº 505, de 26 de novembro de 2001, que os níveis de tensão de fornecimento em sistemas urbanos monofásicos devem situar-se entre 201 e 231 Vca

[27]. O fornecimento em tensões e frequências inadequadas pode causar danos aos equipamentos e acidentes com riscos para os usuários. Logo, sistemas com fontes de geração intermitentes devem ter a regulação de tensão em níveis semelhantes aos sistemas urbanos.

F. Manutenção e Automação

Os sistemas isolados desenvolvidos para atender pequenas comunidades são empreendimentos de investimento alto, taxa de retorno (*pay-back*) longa e não atrativos do ponto-de-vista comercial, pois os grandes custos iniciais dificilmente serão amortizados. Conseqüentemente, a manutenção destes sistemas não é prioritária para a concessionária já que não representa lucros. Possíveis falhas que causem cortes no fornecimento podem levar dias até serem sanadas.

Por outro lado, quando estes sistemas estão sob a responsabilidade de outra entidade, como uma associação de moradores locais, existe um grande interesse em mantê-los operando, porém não existe mão-de-obra qualificada para realizar as ações necessárias. Logo, a médio e longo prazo a probabilidade de falha e colapso por manutenção inadequada, ou por falta dela, torna-se alta.

Para minimizar este quadro, é necessário conferir a estes sistemas um grau de confiabilidade, robustez e automação, reduzindo sua vulnerabilidade a falhas com significativa probabilidade de ocorrência, principalmente aquelas decorrentes de intervenção humana.

III. O SISTEMA HÍBRIDO ILHA DE LENÇÓIS

Na Figura 1 é apresentado o diagrama de blocos do Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica da Ilha de Lençóis [6].

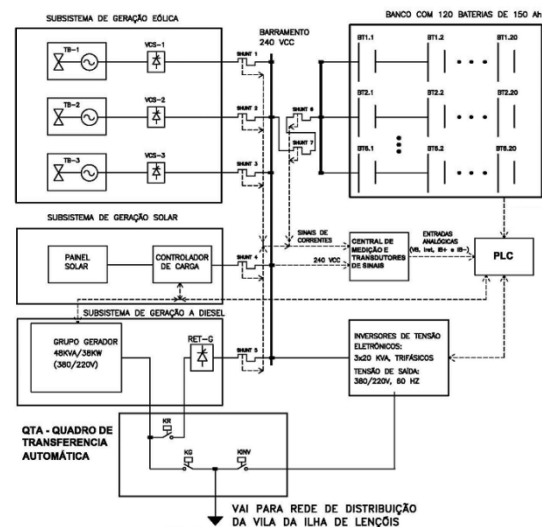


Fig. 1. Diagrama de blocos do sistema híbrido de Lençóis.

O sistema de geração é composto de: três turbinas eólicas de 7,5 kW (tensão retificada em 240 Vcc); um arranjo fotovoltaico com 162 painéis de 130 Wp; e um Grupo-Motor-Generador (GMG) de 48 kVA (37 kW) de *backup*.

O sistema de armazenamento de energia é formado por 120 baterias estacionárias de 12 V e 150 Ah, dividido em 6 conjuntos de 20 baterias em série (tensão de flutuação em 296 Vcc), com autonomia de 9 horas (descarga de 30 % da capacidade nominal, correspondendo a 64,8 kWh).

Existem ainda outros equipamentos que permitem o controle e a automação da planta: dois inversores de tensão de 20 kVA operando em paralelo (redundância) - assim, em caso de falha de um inversor o outro assume instantaneamente a carga; um controlador lógico programável (CLP), cuja função básica é coordenar a operação das fontes em paralelo, de tal forma a fazer com que o sistema de geração (solar-eólico) opere no ponto de maior eficiência [17].

A energia das fontes renováveis atende a carga e o excedente carrega o banco de baterias. Em caso de insuficiência delas, a energia armazenada supre a demanda. Se necessário, o GMG entra em operação automaticamente carregando as baterias através de um retificador e atendendo a carga; em caso de falha do sistema renovável como um todo, ele entra alimentando diretamente a carga.

A mini-rede que forma o sistema de distribuição é trifásica, aérea, com cabo multiplexado e tensão de operação em 380/220 Vca. Foi projetada para uma queda de tensão de 5% nos pontos mais afastados da casa de controle e operação (324 m). Associada à mini-rede de distribuição está a iluminação pública (IP) com potência instalada de 1,16 kW e acionada via programador horário ou, caso necessário, manualmente.

Um sistema supervisorio (SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*) registra dados sobre geração, demanda e armazenamento, possibilitando uma análise detalhada do comportamento da planta, fornecendo subsídios para melhoramento da mesma e elaboração de projetos futuros.

Com relação ao consumo e demanda de energia do sistema, considerando uma taxa de crescimento de 1,5 %/ano, a projeção em 10 anos é de 4.800 kWh/mês e 15,2 kW, respectivamente. Portanto, se comprovada, o sistema será capaz de gerar a demanda por pelo menos 10 anos sem adição de unidades geradoras [18].

IV. MELHORANDO A CONFIABILIDADE

Nos tópicos anteriores, são apresentados vários aspectos críticos com impacto na confiabilidade de uma planta híbrida de geração de energia elétrica. Para o modelo da Ilha de Lençóis foram propostas e implementadas algumas soluções, descritas a seguir, para a melhoria da confiabilidade. Estas foram adotadas a partir do estudo da intermitência entre as fontes, das possíveis falhas da rede de distribuição, da proteção adotada, dos inversores, da regulação de tensão e dos processos de manutenção, de automação e controle.

A. Intermitência das Fontes

Para reduzir os impactos relacionados com a intermitência das fontes renováveis foram adotados: o uso de um sistema de armazenamento, para suprimento de energia elétrica em períodos de baixa geração; e a adoção de mais de uma fonte de geração (hibridismo), incluindo a utilização de um gerador diesel de *backup*.

No caso de sistemas de armazenamento, alguns problemas foram analisados e superados. O primeiro foi determinar qual a profundidade de descarga, ou seja, quanto retirar de energia sem comprometer a vida útil do banco de baterias. O segundo foi definir a dimensão do banco em função da capacidade de descarga admissível, de forma que a energia útil seja suficiente para atender à carga durante determinado período de tempo em que não haja disponibilidade de geração renovável,

de forma a garantir a menor utilização possível do sistema de *backup*.

A utilização de somente energia fotovoltaica ou eólica apresentaria uma irregularidade temporal e de amplitude que exigiria um sobredimensionamento dos componentes, como por exemplo, um banco de baterias maior, o que implicaria elevados custos iniciais. A complementaridade entre as fontes é obtida da diferença entre os períodos de disponibilidade de energia, de modo a satisfazer a demanda, obtendo-se dessa forma um aumento da confiabilidade e economia do sistema de modo global [25] e melhoria do fator de carga. O uso do gerador diesel garante o fornecimento de energia em momentos de indisponibilidade de recursos naturais e quando a descarga do banco de baterias ultrapassa o valor admissível (30 %), sendo um elemento importante para a continuidade do fornecimento de energia.

Quanto ao sistema de armazenamento, as estratégias mais eficientes são aquelas que levam em consideração o estado de carga das baterias (*State of charge - SoC*) [8] [19] aliado ao uso racional do grupo gerador, que pode ser acionado apenas para atender a carga ou além disso, também carregar as baterias. A estratégia de operação adotada realiza o despacho da unidade diesel, somente quando o sistema de armazenamento atingir 70 % do *SoC*.

B. Rede de distribuição

A Ilha de Lençóis apresenta um ambiente agressivo para componentes de sistemas elétricos. A alta salinidade e os ventos fortes aumentam a corrosão, fadigas, falhas mecânicas e pontos quentes nas conexões. Além disso, a Ilha possui uma extensa área de dunas, que se movimentam durante o ano.

Para reduzir esses problemas e as perdas elétricas optou-se pela utilização de cabeamento diretamente enterrado, em alumínio, com dupla proteção de PVC e XLPE (polietileno) para a transmissão da energia das turbinas eólicas e da unidade diesel até a casa de controle e operação. Esta solução evita o problema da movimentação das dunas sobre a rede e mantém as turbinas eólicas localizadas a 500 m da comunidade em local mais propício à captação de vento.

C. Faltas e Proteção

A coordenação da proteção em sistemas de energia é importante para que as faltas sejam extintas rapidamente. As faltas mais comuns no sistema híbrido da Ilha de Lençóis se relacionam às condições ambientais. Por exemplo, a salinidade do ar causa a corrosão nas conexões das lâmpadas, interruptores e tomadas, provocando curtos-circuitos nas residências e implicando o desligamento da planta. Como solução, junto às unidades consumidoras a proteção foi coordenada utilizando disjuntores mais rápidos, evitando que o curto se propague para a mini-rede.

Outra falta comum acontecia na iluminação pública (IP). A corrosão das hastes e dos contatos das lâmpadas provocava freqüentes curtos-circuitos. Este problema foi solucionado através da substituição do conjunto luminárias/lâmpada por modelos hermeticamente fechados.

Visando a confiabilidade, a mini-rede foi seccionada em quatro áreas diferentes, sendo que cada uma destas áreas também possui um disjuntor de proteção, garantindo que somente a área sob condições de falta seja desconectada.

No lado da geração, todas as fontes e o banco de baterias são conectadas também por meio de disjuntores aos quadros de controle de carga, o que permite a flexibilidade de manobra e facilidade na identificação de possíveis falhas.

D. Inversores de Tensão

Para o sistema da Ilha de Lençóis foi desenvolvido um inversor específico para aplicação em sistemas isolados. Pelo fato de serem componentes críticos, eles foram desenvolvidos buscando atender as principais carências relacionadas à confiabilidade, capacidade de expansão, robustez e eficiência [18][22]. A adoção da configuração com dois inversores operando em paralelo (redundantes) diminui a probabilidade de cortes no fornecimento de energia devido a falhas no equipamento. Para a configuração de paralelismo N+1, o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF) é de 410.000 horas; e probabilidade de falha durante o primeiro ano de operação é de 2,1 % [17].

A operação individual dos inversores foi testada com carga nominal, linear, para medição de rendimento. Na Tabela I são mostrados os resultados para cada um dos inversores. Observa-se que o rendimento apresentado é cerca de 3 % a 5 % maior que o rendimento de equipamentos padrão de mesma potência [23]. Além disso, o inversor garante que o desvio máximo de frequência seja de 1%.

TABELA I
RENDIMENTO GLOBAL DOS INVERSORES

Equipamento	Pot. Entrada (kW)	Pot. saída (kW)	Eficiência (%)
Inversor 1	20,5	19,1	93,17
Inversor 2	19,1	17,4	91,09

E. Regulação de Tensão

A regulação de tensão obtida no sistema da Ilha de Lençóis apresenta níveis melhores do que os encontrados em redes urbanas. Quando a planta foi posta em operação a tensão de 380/220 Vca apresentava uma variação de tensão inferior a 1%. Com o crescimento da demanda e um desequilíbrio de carga entre fases, a variação máxima observada foi menor do que 2,5 % na fase mais sobrecarregada. Esses valores obtidos são melhores do que os limites impostos pela Resolução Normativa nº 505 [27] da ANEEL para redes urbanas. Além dos inversores, o sistema de armazenamento contribui para esses índices de regulação da rede, pois além de fornecer energia em momentos de indisponibilidade de geração, também atua como um regulador da tensão e da frequência do sistema [7-8] [24].

F. Manutenção e Automação

No sistema de Lençóis, manutenções preventivas são realizadas nos inversores, banco de baterias, gerador e outros equipamentos. Nos painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas são realizadas apenas revisões periódicas conforme instruções dos fabricantes.

O sistema de controle coordenado pelo CLP é responsável por todas as ações necessárias para o funcionamento da planta, como: conexão/desconexão de fontes; partida/desligamento da unidade diesel; e outras.

V. RESULTADOS E DESEMPENHO

A adoção das medidas descritas na seção anterior teve impacto positivo na confiabilidade do sistema híbrido da Ilha de Lençóis, diminuindo as ocorrências de interrupção no atendimento por qualquer um dos motivos citados. Índices de atendimento foram monitorados durante os 13 meses de operação do sistema demonstrando a eficácia das soluções aplicadas. De julho a de dezembro de 2008 o sistema esteve em fase de testes e acompanhamento intensivos. O resultado dos índices de continuidade trimestrais avaliados para este período está disponível na Tabela II.

TABELA II
DEC E FEC TRIMESTRAL PARA O ANO 2008

ÍNDICES DE CONTINUIDADE		
	1º Trimestre	2º Trimestre
DEC (h)	28	44
FEC	1	2

Observa-se que embora o número de ocorrências tenha sido pequeno (apenas três), a duração das mesmas é considerável - 28 horas e 44 horas, respectivamente. A distância da cidade de São Luís até a Ilha de Lençóis, um percurso de cerca de 260 km por via terrestre e mais cerca de 6 horas de percurso marítimo contribuiu para este resultado.

De janeiro a setembro de 2009 não há registro de faltas. Este resultado é reflexo das medidas propostas e adotadas, reportando-se índices de continuidade de serviço excelentes (DEC e FEC nulos). Deve-se lembrar que na Resolução Normativa nº 024, de 27 de janeiro de 2000, as metas de continuidade são de 90 h e 72 interrupções [28].

Conforme a Figura 2, através dos dados obtidos a partir do monitoramento observa-se a existência de desequilíbrios pontuais de tensão de aproximadamente 2,5%, e desvios de frequência de até 0,12 Hz. Este resultado atende as normas estipuladas pela ANEEL no PRODIST – Módulo 8, [29].

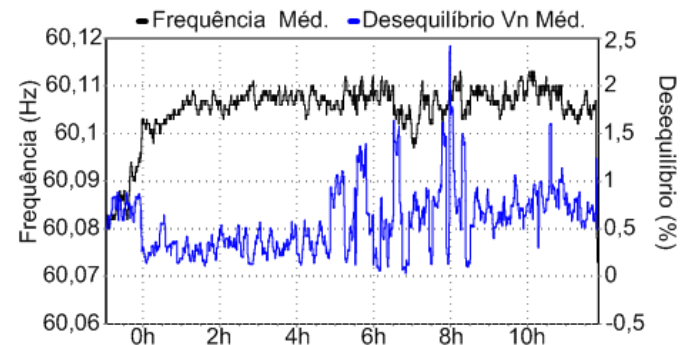


Fig. 2. Frequência (Hz) e desequilíbrio de tensão (%).

Nas Figuras 3 e 4 observam-se as taxas de distorção harmônica de tensão e corrente para a fase A que correspondem aos períodos de carga leve, média e alta durante as primeiras 12 h do dia 14/11/2009. As componentes harmônicas encontradas (3ª e 5ª) se devem ao grande número de cargas não-lineares (reatores eletrônicos e lâmpadas compactas) e máquinas elétricas de baixa potência (geladeiras, refrigeradores, bombas d'água) conectadas ao sistema. Os valores medidos estão dentro das normas estipuladas pela ANEEL [29].

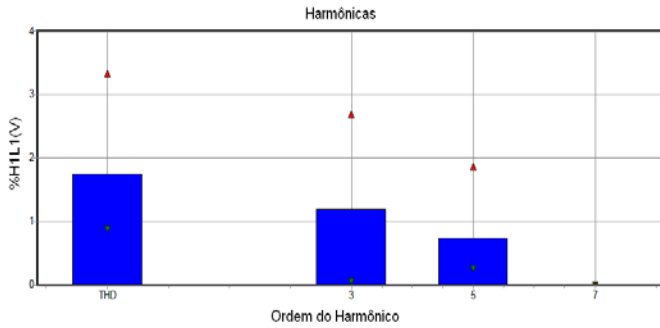


Fig. 3. THDV e componentes harmônicas (14.11.2009)

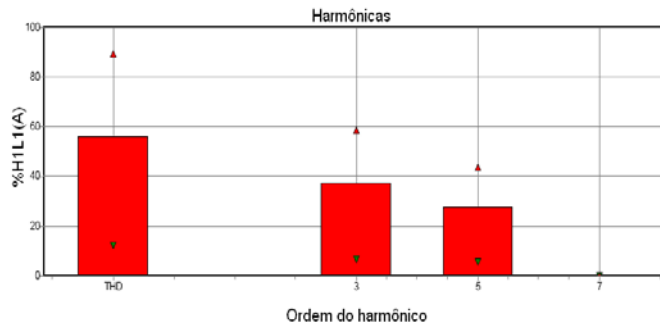


Fig. 4. THDI e componentes harmônicas (14.11.2009)

Medições e supervisão feitas pelo SCADA possibilitam analisar as características de geração e demanda da planta, além do desempenho dos equipamentos e, com isso, acumular experiência para o desenvolvimento e aplicações futuras. Nas Figuras 5 e 6 apresentam-se as curvas de geração e demanda para os dias 09/08/2009 e 18/09/2009, respectivamente.

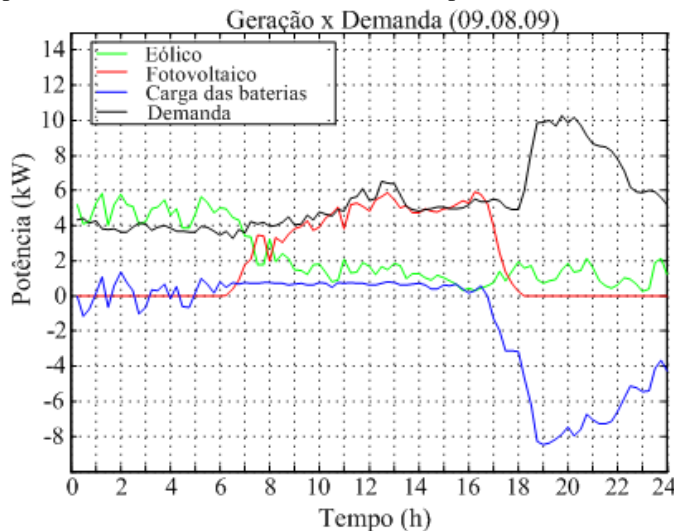


Fig. 5. Geração x Demanda dia 09.08.2009

No dia 09/08/2009 observa-se que o banco de baterias é carregado inicialmente através da geração eólica no período de 0 às 6 horas da manhã. Durante o período diurno (das 6 às 18 horas) a geração fotovoltaica é superior à eólica, indicando um dia de ventos calmos. Conclui-se que a fonte fotovoltaica é suficiente para atender a demanda e continuar o carregamento do banco de baterias. No período noturno houve pouca disponibilidade da geração eólica, de forma que a demanda é atendida pelo sistema de armazenamento.

No dia 18/09/2009 a geração eólica torna-se bastante significativa, com um excedente de energia sendo armazenado

no banco de baterias. No período diurno observa-se uma equivalência de geração entre as fontes renováveis, garantindo o atendimento à demanda e carregamento do banco de baterias. No período noturno, há descarga do banco, em função da geração ser insuficiente para atender a carga. Contudo há uma complementação da geração eólica.

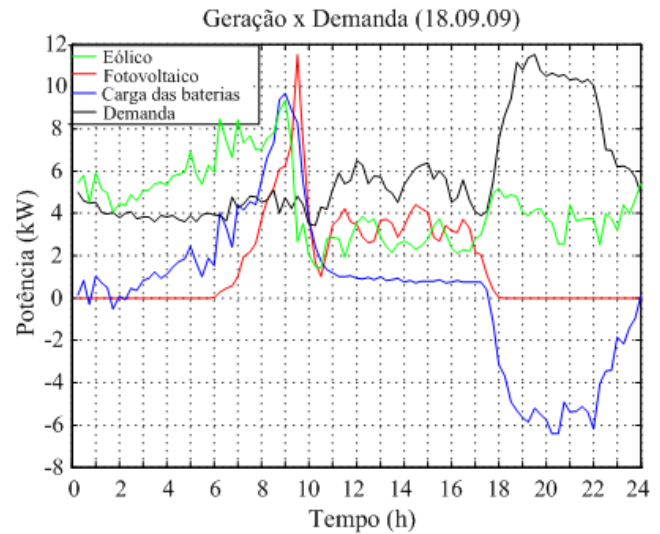


Fig. 6. Geração x Demanda dia 18.09.2009

Quanto à demanda, apresenta características semelhantes a demanda residencial de centros urbanos, mantendo-se constante na maior parte do dia, aumentando no período vespertino e chegando ao pico entre 19 e 20 horas, correspondente ao período de ponta. A demanda média por unidade consumidora no horário de ponta é da ordem de 0,138 kW, incluindo iluminação pública.

Nos treze meses monitorados, com o sistema operando durante 24 horas, a geração renovável teve 94 % de participação na energia consumida, sendo os 6 % restantes complementados pelo GMG. Em outras palavras, a continuidade de serviço foi garantida com uma participação de apenas 6 % de energia não renovável.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentadas as soluções implementadas no sistema híbrido de geração de energia elétrica da Ilha de Lençóis com a finalidade de melhorar a confiabilidade e robustez deste tipo de sistema. Os resultados obtidos durante treze meses de operação evidenciam o sucesso destas soluções.

Estas medidas se traduziram em especificações técnicas para os sistemas de geração, conversão, armazenamento e mini-redes de distribuição, de forma a minimizar a possibilidade de falhas, uma vez que estas comunidades se encontram distantes de centros urbanos e sem disponibilidade de mão-de-obra para manutenção emergencial. A automação do sistema também influencia na confiabilidade, reduzindo a probabilidade de erros humanos na operação do sistema.

A principal contribuição deste trabalho foi mostrar que a introdução de alguns requisitos que melhoram a confiabilidade deste tipo de sistemas podem concretamente viabilizar técnica e economicamente seu uso para comunidades isoladas de baixa renda.

VII. REFERÊNCIAS

Periódicos:

- [1] Doig, A. 1999. "Off-grid electricity for developing countries". IEE Review, Volume 45, Issue 1, Page(s):25 – 28.
- [2] Hatziaargyriou, N. "Microgrids." IEEE Power and Energy Magazine, Volume 6, Issue 3, May-June 2008 Page(s):26 - 29
- [3] Katiraei, F.; Irvani, M.R. 2006. "Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units". IEEE Transactions on Power Systems, V. 21, Issue 4, Page(s):1821 – 1831.
- [4] Xiarnay, C.; Asano, H.; Papatthaniou, S.; Strbac, G.; "Policymaking for microgrids". Power and Energy Magazine, IEEE, Volume 6, Issue 3, May-June 2008. Page(s):66 – 77.
- [5] Xu Liu; Islam, S.; Chowdhury, A.A.; Koval, D.O.; "Reliability evaluation of a wind-diesel-battery hybrid power system". Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2008. Page(s):1 – 8.
- [6] Saavedra, Osvaldo R.; OLIVEIRA, Sérgio Henrique de; MATOS, José Gomes de. "Energia solar e eólica como vetor de desenvolvimento de comunidades isoladas no Maranhão: o Projeto da Ilha dos Lençóis". Revista INOVAÇÃO, São Luís, V. 02, P. 32-34, 05 JUL.2005.
- [7] Mercier, P.; Cherkaoui, R.; Oudalov, A. 2009. "Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System". IEEE Transactions on Power Systems, Volume 24, Issue 3, Page(s):1469 – 1477
- [8] Oudalov, A.; Chartouni, D.; Ohler, C.; 2007. "Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control". Power Systems, IEEE Transactions on V. 22, Issue 3, Page(s):1259 – 1266.

Artigos de Anais de Conferências (Publicado):

- [9] Qian, Kejun; Solanki, P.S.; Mallela, V.S.; Allan, Malcolm; Zhou, Chengke. 2009. "A hybrid power system using wind and diesel generator: A case study at Masirah Island in Oman". Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009. Page(s):1 – 4.
- [10] Qin Lei; Peng, F.Z.; Balaguer, I.J. 2009. "Islanding control of DG in microgrids", IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '09. Page(s):450 – 455.
- [11] Xuan Liu; Bin Su. 2008. "Microgrids — an integration of renewable energy technologies". China International Conference on Electricity Distribution, CIGRE 2008, China. Page(s):1 – 7.
- [12] Dialynas, E.; Hatziaargyriou, N.D. 2007. "Impact of Microgrids on Service Quality". IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007. Page(s):1 – 5.
- [13] Dicorato, M.; Forte, G.; Trovato, M. 2009. "A procedure for evaluating microgrids technical and economic feasibility issues". IEEE Bucharest PowerTech. Page(s):1 – 6.
- [14] Barnes, M.; Kondoh, J.; Asano, H.; Oyarzabal, J.; Ventakaramanan, G.; Lasseter, R.; Hatziaargyriou, N.; Green, T. 2007. "Real-World MicroGrids: An Overview". IEEE International Conference on System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07. Page(s):1 - 8
- [15] Kroposki, B.; Basso, T.; DeBlasio, R. 2008. "Microgrid standards and technologies". IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008. Page(s):1 – 4.
- [16] Pudjianto, D.; Strbac, G.; van Oberbeeke, F.; Androustos, A.I.; Larrabe, Z.; Saraiva, J.T. 2005. "Investigation of regulatory, commercial, economic and environmental issues in microgrids". International Conference on Future Power Systems. Page(s): 6pp. -6.
- [17] Ribeiro, L. A. S.; Matos, José Gomes de.; Saavedra, Osvaldo R.; Gabiatti Gerson; Bonan Guilherme. "Inversores para Aplicações em Sistemas Híbridos de Geração de Energia Elétrica em Localidades Isoladas". II Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008, Florianópolis. Anais do II CBENS. Florianópolis: UFSC, 2008. V.1 P. 1-7.
- [18] Ribeiro, L. A. S.; Bonan Guilherme; Saccol Martins, A.; Saavedra, Osvaldo R.; Matos, José Gomes de. "Small Renewable Hybrid Systems for Stand Alone Applications". 2009 IEEE PEMWA Symposium, 2009, Lincoln, Nebraska. Proc. of the 2009 IEEE Power Electronic and Machines in Wind Applications Symposium. Lincoln, 2009. V.1 P.1-7.
- [19] N. Jantharamin, L. Zhang, "A New Dynamic Model Lead-Acid Batteries", "4th IET Conference Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008", pp. 86-90, April 2008.
- [20] A.Maafi and A.Adane, "A two-states Markovian model of global irradiation suitable for photovoltaic conversion". *Solar and wind Technology*, 6,1989, 247-252.

- [21] J. Chiasson, B. Vairamohan, "Estimating the State of Charge of a Battery", *Control Systems Technology*, vol. 13, pp. 465-470, May 2005
- [22] Ribeiro, L. A. S.; Saavedra, Osvaldo R.; Matos, José Gomes de.; Bonan Guilherme; Gabiatti Gerson; Saccol Martins, A. "Renewable Hybrid Systems for Isolated Communities in Brazil". In: IFAC/CIGRE Symposium on Power Plants and Power Systems Control, 2009, Tampere. Proc. of the IFAC PP & PSC 2009. Helsinki: The Finnish Society of Automation, 2009. V.1 P.01-08.
- [23] Bonan, Guilherme ; Martins, Alexandre Saccol; Ribeiro, L. A. S. ; Saavedra, Osvaldo Ronald ; MATOS, José Gomes de . "Parallel-Connected Inverters Applied in Renewable Energy Systems". In: Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2009, Bonito, MS. Anais do Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2009.
- [24] Oudalov, A.; Chartouni, D.; Ohler, C.; Linhofer, G. 2006. "Value Analysis of Battery Energy Storage Applications in Power Systems". IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. Page(s):2206 – 2211.

Dissertações:

- [25] Pianezzola, G. 2006. "Mapas de Complementaridade dos Potenciais Solar e Eólico no Estado do Rio Grande do Sul". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Normas:

- [26] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources to Electric Power Systems, IEEE Standard 1547-2003.
- [27] Resolução Normativa nº 505, Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 26 de novembro de 2001. Disponível em www.aneel.gov.br
- [28] Resolução Normativa nº 24, Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 27 de janeiro de 2000. Disponível em www.aneel.gov.br
- [29] Procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodinst módulo 8 – qualidade da energia elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, 24 de agosto de 2005. Disponível em www.aneel.gov.br

VIII. BIOGRAFIAS

Denisson Queiroz Oliveira é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão.

Shigeaki Leite Lima recebeu o grau de bacharel e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) em 2005 e 2007 respectivamente. É pesquisador do Núcleo de Energias Alternativas (NEA) e atualmente Doutorando no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade (DEE-UFMA). As áreas de interesse são Fontes Renováveis de Energia, eletrônica de potência, sistemas de potência e inteligência artificial.

Osvaldo R. Saavedra (S'88, M'94) recebeu os graus de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, em 1988 e 1993, respectivamente. De 1983 a 1986 foi diretor de Inecom Engenheiros Ltda, Chile; De 1994 to 1997 foi professor visitante na Universidade Federal do Maranhão. Desde 1997 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMA onde é coordenador do Grupo de Sistemas de Potência e do Núcleo de Energias Alternativas. Suas áreas de interesse são inteligência computacional aplicada, serviços auxiliares e operação ótima de sistemas de potência.

Luiz Antonio de Souza Ribeiro concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba em 1998 e o pós-doutorado pela Universidade Wisconsin-Madison, U.W., Estados Unidos, em 2006. Atualmente é professor da Universidade Federal do Maranhão. Atua na área de engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica industrial.

Nelson José Camelo possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1977) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1981). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal do Maranhão. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente na área de energias alternativas.