

INVERSORES PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM LOCALIDADES ISOLADAS

Luiz Antonio de Souza Ribeiro – luiz_ribeiro@cefet-ma.br

Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, Departamento de Eletro-Eletrônica

Guilherme Bonan – bonan@cp.com.br; **Gerson Gabiatti** – gabiatti@cp.com.br; **Alexandre Saccol Martins** – saccol@cp.com.br

CP Eletrônica S.A. - Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

Oswaldo Ronald Saavedra – o.saavedra@ieee.org; **José Gomes de Matos** – gomes@dee.ufma.br

Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Elétrica, Núcleo de Energias Alternativas

Resumo. *Um dos principais problemas da utilização de energia a partir de fontes de energia renováveis em comunidades isoladas, de difícil acesso, são os inversores, responsáveis pela conversão e regulação da tensão de alimentação das cargas. O tempo médio para que os inversores apresentem uma falha normalmente é bem abaixo do desejável. Combinado com a distância e o difícil acesso a estas comunidades, isto tem levado ao descrédito de tais tecnologias. Por outro lado, devido à sazonalidade das fontes a unidade processadora de energia necessariamente precisa ter alto rendimento. Estas características requerem que os inversores utilizados em tais aplicações sejam confiáveis e eficientes. Portanto, este trabalho apresenta os primeiros resultados de pesquisa e desenvolvimento de inversores para tais aplicações. Os inversores desenvolvidos estão sendo testados para serem utilizados no projeto piloto intitulado “Sistema Híbrido de Geração Elétrica Sustentável para a Ilha dos Lençóis, município de Cururupu – MA”. Este sistema é baseado nas fontes solar fotovoltaica e eólica. Este trabalho apresentará uma breve descrição da aplicação; o modo de operação dos inversores e os resultados de eficiência medidos em campo. Estes resultados mostram a viabilidade da aplicação dos inversores desenvolvidos em sistemas híbridos de geração utilizando fontes de energia renováveis.*

Palavras-chave: *Inversores, Sistemas de geração híbridos, Energia Solar, Energia eólica.*

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis, derivadas principalmente da radiação solar, são ao mesmo tempo as mais antigas e as mais modernas formas de energia usadas pela humanidade (Burton *et al.*, 2001). Idealmente, uma **fonte de energia renovável** é aquela que não se esgota com o uso contínuo, que não ocasiona emissão de poluentes ou outros problemas ambientais e que não envolve a perpetuação de perigo substancial para a saúde ou injustiça social (Boyle, 2004). Na prática, somente poucas fontes de energia se aproximam destas características. Contudo, as fontes renováveis parecem ser mais sustentáveis que combustíveis nucleares e fósseis e o seu uso geralmente resulta numa emissão de gases bem menor e com menos perigo para a saúde. Um fator importante sobre as tecnologias relacionadas às fontes de energia renováveis é que todas elas requerem mais pesquisa, projeto e teste, sendo a ênfase diferente para cada tecnologia. A maioria das áreas tem perguntas científicas sem respostas, particularmente àquelas relacionadas com os materiais usados, que precisam ser respondidas antes que um projeto eficiente seja realizado. E um rigoroso teste de campo das tecnologias emergentes ainda está sujeito ao futuro (The Watt Committee, 2003). Os principais fatores que levaram a um grande interesse destas tecnologias foram: 1) o crescente aumento do petróleo a partir dos anos setenta; 2) a preocupação com a segurança após alguns acidentes nucleares; 3) questões ambientais relacionadas à transformação da energia, especialmente a emissão de dióxido de carbono e os efeitos poluentes da chuva ácida e 4) a preocupação contínua sobre a sustentabilidade de combustíveis fósseis e nuclear. É isto tem aumentado interesse em fontes de energia renováveis e estimulado um número substancial de projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração financiados por órgãos privados e governamentais.

Aparentemente, a produção de energia através de hidroelétricas é a tecnologia de fontes renováveis mais avançada. Contudo, devido à distância das usinas hidroelétricas aos grandes centros de consumo, o problema de alagamento devido à construção de barragens, que destroem o ecossistema local e forçam famílias a se deslocarem, são as grandes desvantagens desta tecnologia. A segunda tecnologia mais avançada é a fonte de energia renovável relacionada ao vento (turbinas eólicas). Embora um teste de fadiga de tempo de vida ainda esteja pendente, a conversão da energia do vento pode agora ser considerada uma tecnologia com certa maturidade. O mesmo não pode ser dito dos sistemas fotovoltaicos (PV). Eles ainda não são completamente confiáveis, tendo como principal problema o inversor. Hoje, o inversor de um sistema PV é um componente caro e complexo, sendo que o tempo médio para primeira falha deste componente é de aproximadamente cinco anos (West *et al.*, 2002). A experiência com sistemas PV tem mostrado que a baixa confiabilidade do inversor contribui para que o sistema como um todo seja não-confiável e tem levado a uma **falta de confiança na tecnologia de renováveis**. Os problemas com o inversor não são únicos dos sistemas PV e um crescente aumento na necessidade de todas estas tecnologias por um inversor confiável fornece uma oportunidade

única para desenvolvimento de projetos de pesquisa nesta área. Para atender adequadamente as necessidades de um sistema de geração isolado baseado em energias eólica e solar, um sistema inversor deve atender aos seguintes requisitos:

- Apresentar boa eficiência;
- Estar adequado para operação em condições ambientais adversas;
- Apresentar flexibilidade de expansão;
- Ser robusto.

Diferentemente das aplicações onde há energia suficiente, neste caso há uma limitação na quantidade de energia gerada uma vez que ela depende de condições climáticas sazonais. Portanto, a eficiência do sistema de conversão é fundamental para disponibilização da maior quantidade possível da energia gerada. A robustez do sistema leva em consideração a confiabilidade do inversor individual. Portanto, o mesmo deve ser desenvolvido com proteção adicional para aplicações em climas tropicais com atmosfera salina. E o sistema deve ser flexível o suficiente para permitir expansão da demanda a custo mínimo.

Este trabalho apresenta os primeiros resultados de pesquisa e desenvolvimento de inversores para tais aplicações levando-se em conta os fatores acima citados. Os inversores desenvolvidos estão sendo testados para serem utilizados no projeto piloto intitulado “Sistema Híbrido de Geração Elétrica Sustentável para a Ilha dos Lençóis, município de Cururupu – MA”. Este é um sistema híbrido baseado nas fontes solar fotovoltaica e eólica. Na seção 2 será feita uma breve descrição da aplicação. A seguir serão descritos os inversores desenvolvidos e os seus modos de operação. E finalmente serão apresentados os resultados experimentais colhidos em campo.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO

Uma característica interessante dos sistemas que usam energias renováveis é que eles são altamente escalonáveis, permitindo um aumento do fornecimento de energia (através da adição de novas unidades) a medida que a demanda aumenta. Além disso, as fontes alternativas podem ser combinadas, formando os chamados sistemas híbridos. Normalmente estas combinações são realizadas em aplicações remotas onde não há fornecimento convencional de energia. Com os sistemas híbridos consegue-se um maior fornecimento de energia à carga, pois é menos provável que todas as fontes alternativas estejam ausentes simultaneamente. E mesmo que estivessem, ainda assim estes sistemas usam elementos armazenadores de energia e, como unidades de back-up, geradores diesel. Uma combinação tradicional é o uso de aero-geradores com painéis solares. Nestes tipos de sistemas há um grande demanda por pesquisa na área de gerenciamento da energia proveniente de várias fontes que estão em paralelo.

O sistema híbrido no qual os inversores desenvolvidos estão sendo testados é mostrado na Fig. 1. Ele é composto por nove linhas de painéis solares, cada uma com 18 painéis em série, fornecendo potência total máxima de aproximadamente 18 kW, e três aero-geradores de 7,5 kW cada. Estas fontes alimentam um banco de 120 baterias, arranjadas em seis linhas, cada uma com 20 baterias de 150 Ah em série, com tensão nominal de 240 V. Há ainda um grupo gerador de back-up para ser utilizado eventualmente no caso de falta das fontes primárias de energia e as baterias estiverem descarregadas. O barramento CC alimenta o sistema inversor, que é configurado de tal forma a operarem em paralelo, dividindo a carga igualmente entre si. O controle supervisor do sistema é feito por um controlador lógico programável, cuja função básica é coordenar a operação de todas as fontes em paralelo de tal forma a fazer com que todo o sistema de geração opere no ponto de maior eficiência possível. Além disso, haverá monitoramento on-line de todo o sistema, com transmissão via satélite de todas as grandezas elétricas e ambientais. Isso permitirá monitorar o funcionamento *on-line* do sistema, obtendo um maior conhecimento e aperfeiçoamento do mesmo, além de possibilitar a capacitação de recursos humanos para trabalhar com sistemas híbridos de geração de energia.

3. INVERSOR DE TENSÃO

Os inversores propostos nesse trabalho foram desenvolvidos buscando atender as principais carências apresentadas pelos sistemas híbridos de energia. Essas carências estão principalmente relacionadas com a confiabilidade dos equipamentos e também com a sua capacidade de expansão. A confiabilidade se deve a utilização desses equipamentos em regiões isoladas e muitas vezes de difícil acesso. A capacidade de expansão também deve ser observada uma vez que sistemas desse tipo são vetores para o desenvolvimento de comunidades carentes. Um outro aspecto fundamental é a eficiência e neste sentido buscou-se um compromisso entre frequência de chaveamento \times tamanho dos filtros de tal forma a melhorar o rendimento, uma vez que nestes tipos de aplicações há limite nas fontes de energia disponíveis.

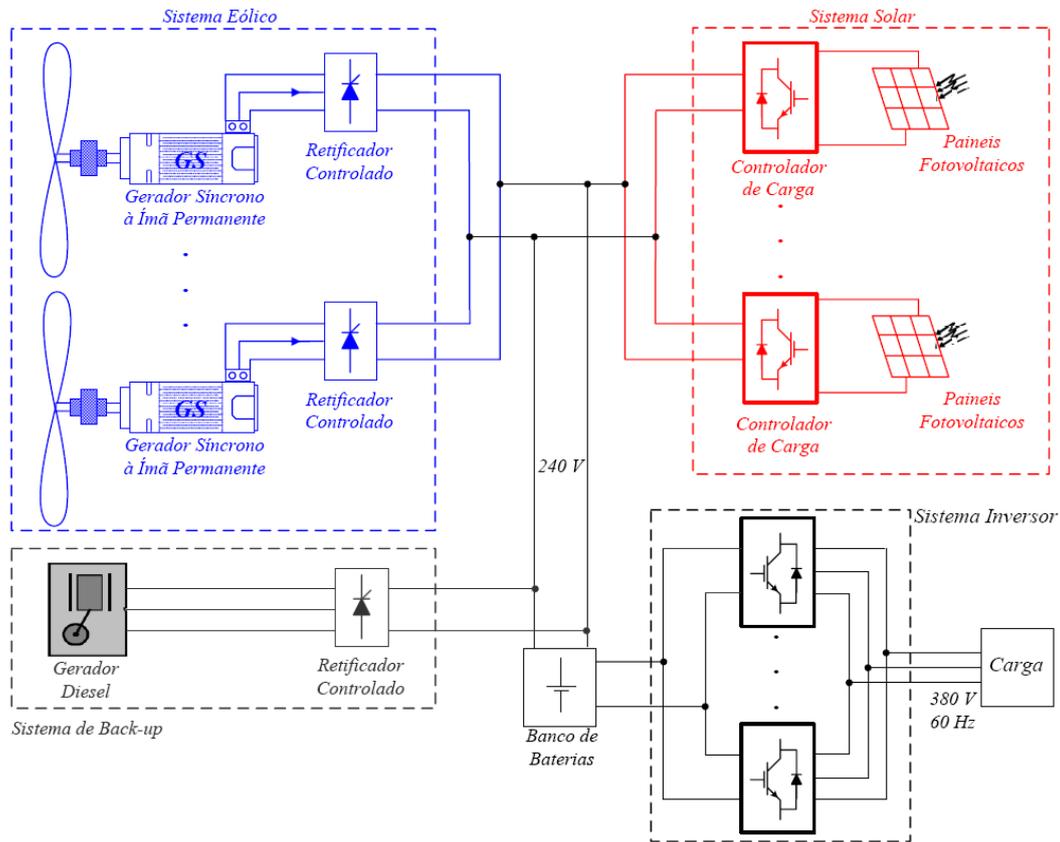


Figura 1. Sistema híbrido da Ilha de Lençóis.

3.1 Confiabilidade do Sistema

Considerando a estrutura básica que compõe um sistema inversor (Fig. 2) e os valores de MTBF (Tempo médio entre falhas) obtidos em campo, chegou-se a um valor de 60.000 horas para um equipamento singelo, sem utilizar qualquer tipo de chave de transferência para uma outra rede alternativa em caso de falha.

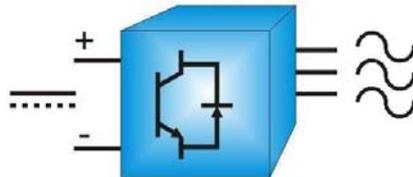


Figura 2. Estrutura básica do Inversor.

Esse valor remete a uma expectativa de aproximadamente 6 anos de operação sem falhas. A partir desse dado de MTBF, pode-se estimar a probabilidade de ocorrer uma falha nesse equipamento após um ano de funcionamento, considerando a Eq. (1) (Lewis, 1987):

$$P_N = \frac{h_{ANO}}{MTBF} \quad (1)$$

Sendo

P_N = Probabilidade de falha para um equipamento singelo

h_{ANO} = Número de horas de funcionamento em um ano

A partir da Eq. (1) chega-se a um valor em torno de 14,6% para a probabilidade de falha em um ano de operação.

Utilizando-se dois equipamentos operando em modo de Paralelismo Ativo (Lorençato, 2007), onde a carga é dividida igualmente entre as unidades, na configuração $N+1$ tem-se considerável aumento no MTBF do sistema, reduzindo drasticamente a probabilidade de falha. Nessa configuração, N equipamentos operam em paralelo suprindo toda a energia exigida pela carga e 1 equipamento redundante é adicionado ao sistema.

Na Fig. 3 abaixo, pode-se observar a composição de um sistema $N+1$, composto por dois inversores.

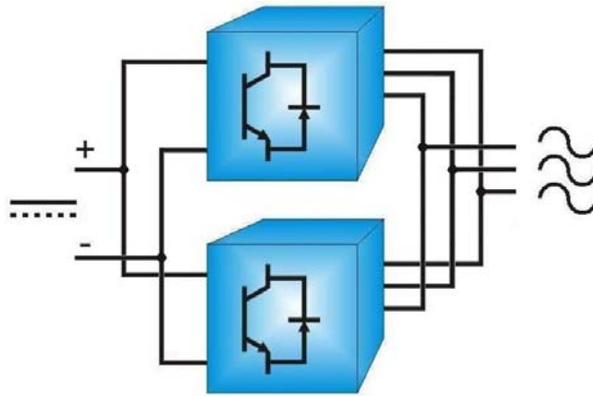


Figura 3. Sistema Paralelo Ativo N+1 com dois equipamentos.

Nessa situação, para ser interrompido o fornecimento de energia para a carga, não basta que apenas um dos equipamentos apresente uma falha. Somente se ambos falharem o sistema provocará interrupção de energia à carga. Essa situação passa a ser um acontecimento composto por dois eventos. Sendo assim, utilizando a Distribuição Binomial, chega-se ao valor da probabilidade de falha do sistema no primeiro ano, que é de aproximadamente 2,1%. A partir dessa probabilidade, determina-se o MTBF do sistema completo, composto pelos dois inversores. Utilizando-se (1), obtem-se um MTBF acima de 410.000 horas, ou seja, aproximadamente 47 anos sem interrupção no fornecimento de energia. Obviamente, a vida útil desses equipamentos não se compara a esse valor, porém ele apenas reflete a elevada confiabilidade obtida através desse modo de operação. Essa mesma análise pode ser estendida para um sistema operando na configuração N+2. Apesar de não ter sido utilizada nessa aplicação, a Tab. 1 apresenta um comparativo entre essas três configurações.

Tabela 1. MTBF das configurações Singelo, Paralelo N+1 e Paralelo N+2.

Configuração	MTBF (horas)	Probabilidade de falha no primeiro ano
Singelo	60.000	14,6%
Paralelo N+1	411.000	2,1%
Paralelo N+2	2.815.000	0,3%

3.2 Capacidade de Expansão

A utilização de inversores em conjunto com fontes de energias alternativas se faz necessário devido ao caráter pulsante dessas fontes. Para ser aproveitada, essa energia precisa ser convertida e condicionada para que possa ser utilizada pelos consumidores. O inversor é responsável pela conversão da energia CC gerada pelos painéis fotovoltaicos e armazenada no banco de baterias, em energia CA adequada para o consumo, possuindo uma capacidade nominal fixa.

A presença de energia elétrica em comunidades isoladas, que antes não possuíam acesso a ela, estimula o seu desenvolvimento e possibilita o acesso dessas comunidades a requisitos básicos de qualidade de vida, servindo como vetor de desenvolvimento social e econômico.

Muitas vezes esse crescimento é tal que acaba excedendo a capacidade de geração instalada, por isso, a possibilidade de expansão desses sistemas torna-se um dos itens essenciais para o sucesso dos mesmos. A utilização de inversores comerciais que operam em modo singelo, com o passar do tempo torna-se insuficiente em função do crescimento da demanda de energia das comunidades. Em conseqüência, há a necessidade de substituição do inversor, gerando custos elevados além de alterações na infra-estrutura de instalação do sistema.

O sistema proposto, composto por inversores operando em modo de Paralelismo Ativo, além de oferecer uma confiabilidade extremamente elevada, oferece grande flexibilidade de expansão. Como as unidades não possuem nenhuma interface de comunicação entre elas ou qualquer tipo de módulo de controle centralizado, basta a conexão de mais unidades em paralelo para que o sistema aumente a sua capacidade de fornecimento de energia, não sendo necessário a realização de nenhum tipo de alteração nos inversores já instalados. Esse sistema foi desenvolvido de forma a permitir a conexão de até 6 equipamentos em paralelo.

3.3 Desenvolvimento do Hardware

Inicialmente buscou-se um compromisso entre frequência de chaveamento, velocidade de resposta e tamanho dos filtros de tal forma a melhorar o rendimento. Este aumento de rendimento não se refere somente a diminuição das perdas, mas também a diminuição da energia necessária para resfriar os módulos (ventilação forçada). Isso se deve a abordagem cuidadosa no projeto mecânico desses equipamentos. Todo o fluxo de ar interno foi projetado para otimizar a refrigeração dos componentes que operam com temperaturas mais elevadas, melhorando a eficiência global dos

equipamentos. Esses cuidados também se refletem na robustez operacional, uma vez que esse fluxo de ar impede acúmulo de poeira e outros resíduos em regiões críticas do equipamento.

A partir do desenvolvimento mecânico, foi iniciado o desenvolvimento elétrico partindo de um conjunto de potência trifásico de 20 kVA, composto por transistores IGBT. A tensão de saída em 60 Hz é modulada através de um controle PWM com frequência de chaveamento de 4 kHz. Na saída de cada braço da ponte inversora foi conectado um filtro passa baixa de segunda ordem LC para eliminação das harmônicas de alta frequência, fruto do chaveamento do inversor. Além do filtro passa baixa, também foi utilizado um transformador isolador que além de fornecer a relação de transformação para a tensão de saída, fornece isolamento galvânica ao sistema. Essa isolamento é necessária, pois além de proteger a carga também protege os demais equipamentos conectados em paralelo.

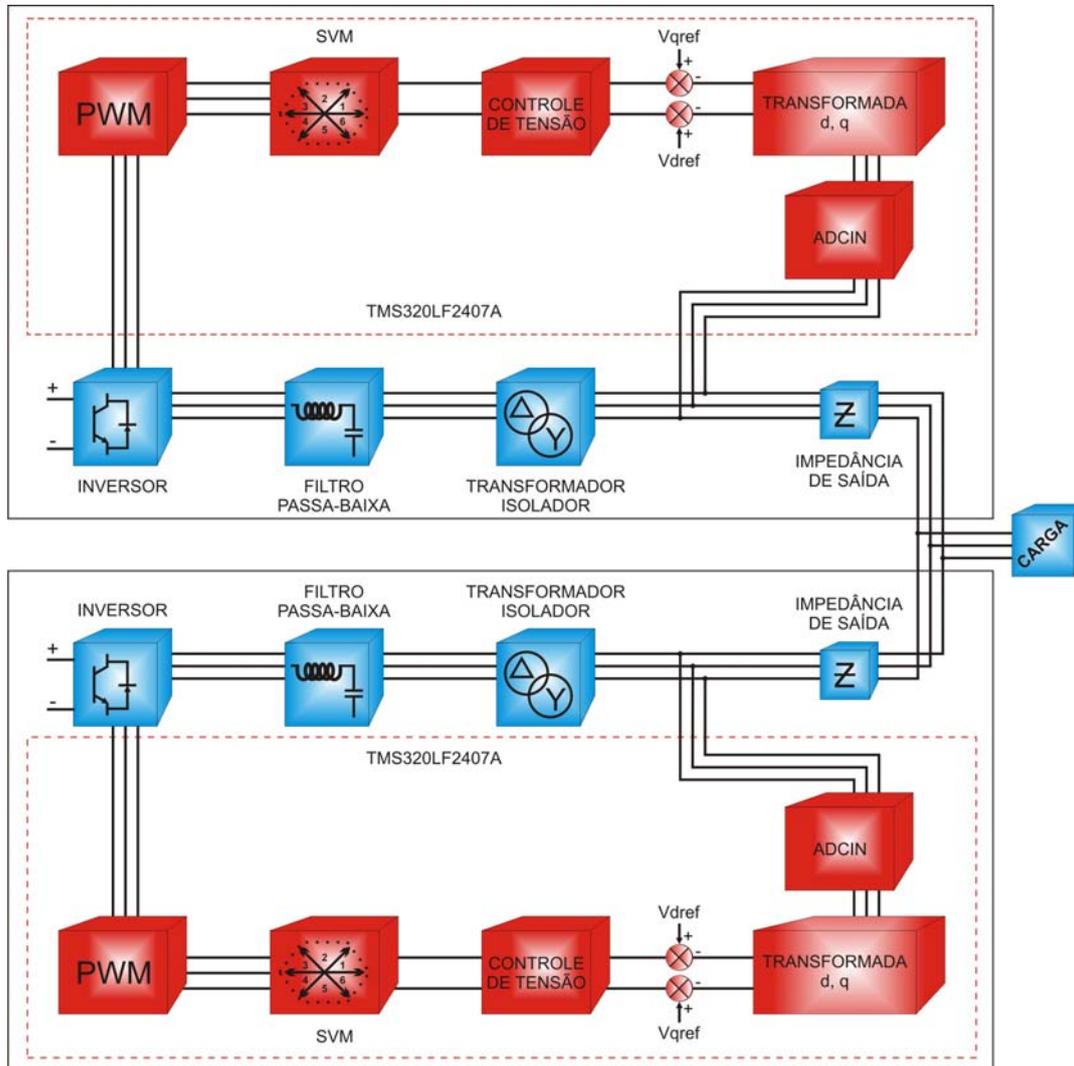


Figura 4. Diagrama em Blocos de dois Inversores em modo Paralelo Ativo.

3.4 Controle do Inversor

A técnica de controle utilizada nesta aplicação pode ser descrita com base na Fig. 4. Nela é possível observar os blocos desenvolvidos, utilizando DSPs da Texas Instruments, particularmente o DSP em ponto fixo modelo TMS320F2407A, para dois equipamentos operando em modo de Paralelismo Ativo. Percebe-se que não há nenhuma interface de comunicação entre os dois equipamentos, sendo a carga dividida igualmente entre os inversores.

As tensões de saída são amostradas na mesma frequência do chaveamento do inversor e através da Transformada de Park são geradas duas novas componentes de tensão, a componente direta e a componente em quadratura. Internamente o controlador possui referências independentes para cada uma das componentes, de forma que essas componentes permaneçam desacopladas.

Através de controladores do tipo PID, também independentes para cada uma das componentes dq de cada inversor, são geradas as ações de controle. Com base na Modulação PWM Vetorial, a partir das ações de controle calculadas, é determinada a seqüência de chaveamento a ser utilizada nos três braços do inversor, conforme mostra a Fig. 4.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A operação individual dos inversores foi testada com carga nominal linear, para medição de rendimento. O rendimento médio para os inversores desenvolvidos ficou em torno de 92%. Observa-se que o rendimento apresentado é cerca de 5% maior que o rendimento de equipamentos padrão de mesma potência, demonstrando o excelente resultado obtido com essa topologia.

A operação em modo de paralelismo ativo dos inversores foi testada em laboratório com uma carga de 20kW. As Fig. 5a e Fig. 5b mostram as correntes das fases A de cada um dos inversores antes e depois da desconexão de um deles. , Abaixo, podemos observar alguns resultados experimentais obtidos para esses inversores operando em modo de Paralelismo Ativo. Pode-se observar que antes da desconexão os inversores estão compartilhando a carga, cada um fornecendo aproximadamente 50% da corrente de carga. Pode-se observar que ao desconectar a saída de um dos equipamentos, representada pelo canal B, instantaneamente o outro equipamento, representado pelo canal A assume o fornecimento de energia para a carga, sem provocar nenhum tipo de interrupção na saída. Na Fig. 5b pode-se observar o exato instante da desconexão.

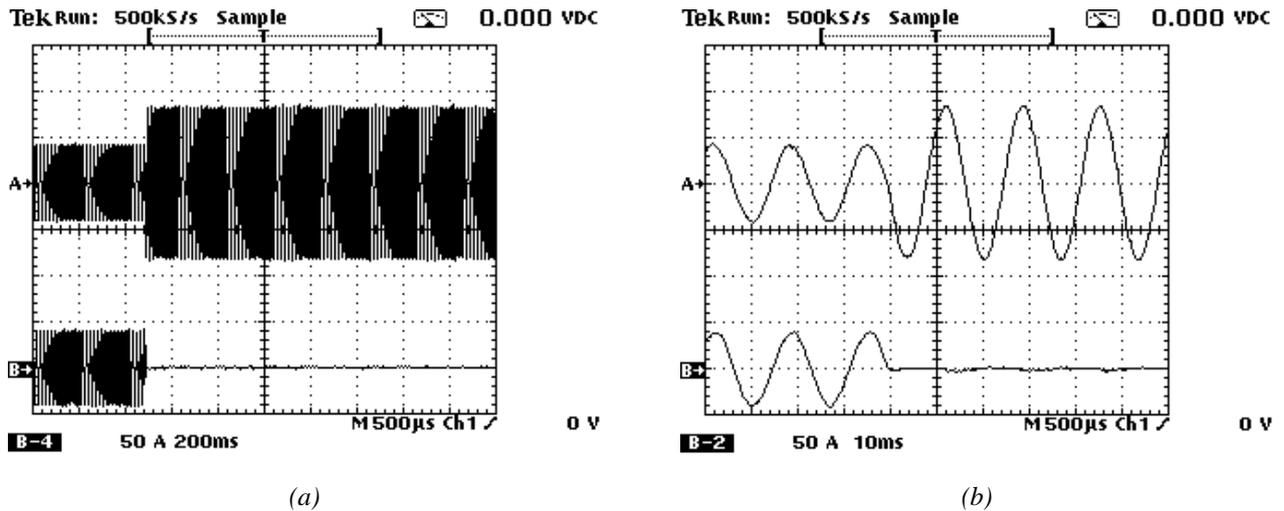


Figura 5. Operação de dois inversores em paralelismo ativo e desconexão de um dos inversores: (a) correntes das fases A dos dois inversores; (b) detalhe das correntes antes e depois da desconexão.

Na Fig. 6 é apresentada a resposta dinâmica no instante em que ocorre a desconexão de um dos inversores. Verifica-se uma leve distorção na tensão de saída (forma de onda maior) no instante do degrau de carga, sendo rapidamente corrigida pela ação de controle.

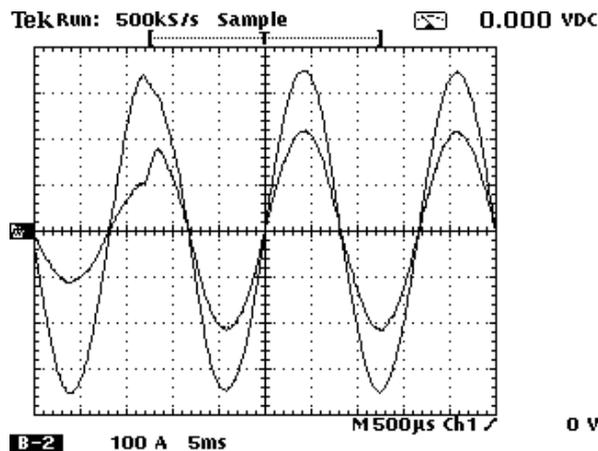


Figura 6. Resposta Dinâmica da Tensão de Saída (forma de onda maior) no momento da desconexão de um dos inversores, representada pelo degrau na corrente (forma de onda menor).

Na Fig. 7 pode-se observar a situação contrária, onde o equipamento que estava desconectado retorna ao barramento de saída, buscando a divisão da carga com o outro inversor. O transitório de compartilhamento é de aproximadamente 650 ms.

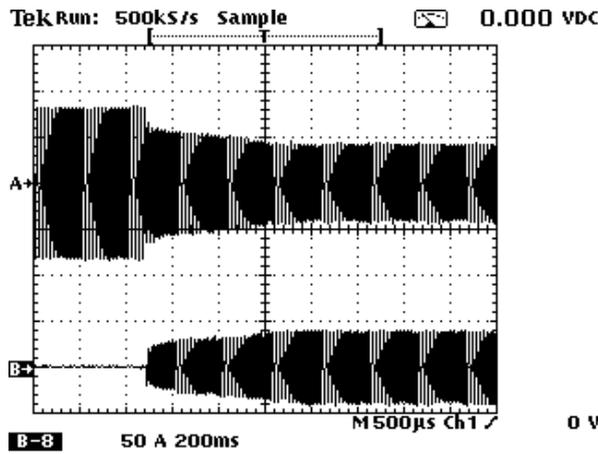
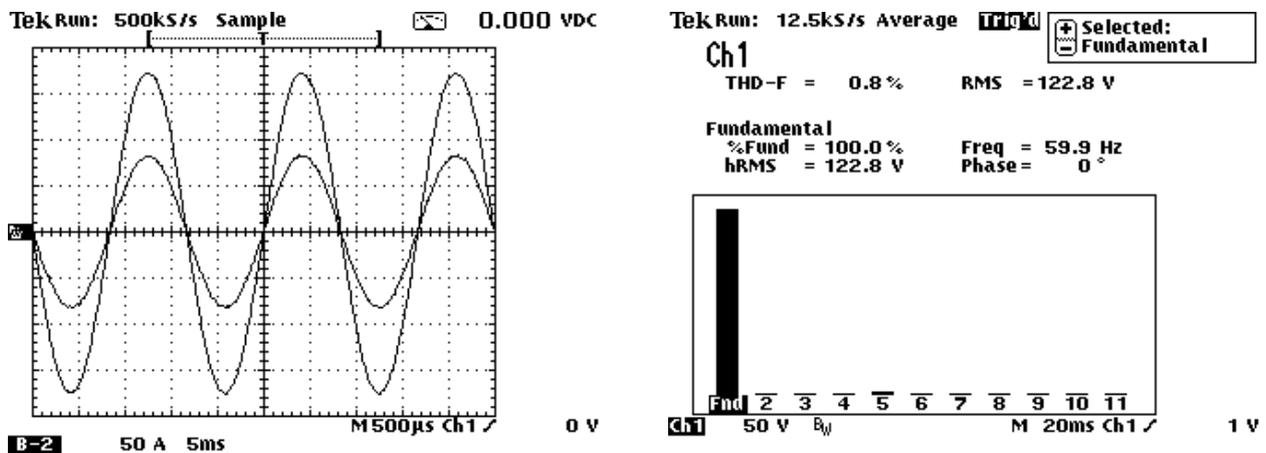


Figura 7. Transitório de compartilhamento de carga na conexão de um inversor em paralelo.

Na Fig. 8a pode-se observar a tensão e a corrente na saída do inversor, perfeitamente senoidais, demonstrando a excelente qualidade da energia disponibilizada aos consumidores. A distorção harmônica total da tensão de saída está abaixo de 1%, conforme verificado na Fig. 8b.



(a) (b)
Figura 8. (a) Tensão e Corrente de Saída; (b) THD da tensão de saída.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentaram-se os requisitos necessários para os inversores utilizados em aplicações com fontes de energia renováveis em localidades isoladas. Tais requisitos são robustez, eficiência e flexibilidade de expansão, pois as fontes de energia são sazonais e as localidades são de difícil acesso, requerendo baixa manutenção dos equipamentos. Através de um projeto adequado conseguiram-se inversores que apresentam rendimento superior que equipamentos padrão de mesma potência. E através da operação em modo paralelo ativo é possível aumentar o MTBF do sistema inversor. Por outro lado, a operação dos inversores em paralelo sem qualquer meio de comunicação entre os componentes individuais diminui ainda mais a propensão a falhas uma vez que a falha de um equipamento individual não altera o funcionamento dos demais. O sistema inversor está em teste no *Sistema híbrido da Ilha de Lençóis*, e os primeiros resultados tem mostrado a eficácia do mesmo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro e motivação providos pelos Ministério de Minas e Energia, C.P Eletrônica S.A, Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão (CEFET-MA).

REFERÊNCIAS

- Boyle, G. 2004. Renewable: power for a sustainable future, Oxford.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bosssanyi, E. 2001. Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons.
- Lewis, E.E. 1987. Introduction to Reliability Engineering, John Wiley & Sons Inc.
- Lorençato, A.A., Martins, A.S., Bonan, G., Gabiatti, G. 2007. Single, Series and Parallel Redundant UPS'S, Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência.
- The Watt Committee on Energy Working Group on Renewable Energy Sources. 2003. Renewable Energy Sources Watt Committee Report Number 22, Taylor & Francis Books, Inc.
- West, R., Mauch, K, Qin, Y. C, Mohan, N., Bonn, R. 2002. "Status and Needs of Power Electronics for Photovoltaic Inverters: Summary Document", Sandia Report SAND2002-1085, Sandia National Laboratories, may.

INVERTERS FOR APPLICATIONS IN HYBRID GENERATION POWER SYSTEMS USED IN ISOLATED LOCATIONS

***Abstract.** One of the main problems of using renewable energy in isolated communities with difficult access is the inverters that convert and regulate the load voltage. The mean time before failure of these inverters is normally lower than the desired. Combined to the distance and difficult access to these communities, this has led the communities to a loss of confidence in renewable technology. On the other hand due to seasonality of the sources the energy processor unit must have high efficiency. These factors require that the inverters used in these applications must be reliable and efficient. The purpose of this work is to present the first results of research and development of inverters to be used in such applications. The developed inverters are being tested to be used in the pilot project named "Renewable Hybrid System for the Lençóis's Island, Cururupu-MA". This system is based on solar and photovoltaic power sources, and this work will show a brief description of the application; the operation mode of the inverters and the efficiency results measured in the field. The results show the viability of the application of the developed inverters in renewable hybrid systems.*

Key words: Inverters, Hybrid Systems, Solar Energy, Wind Energy