

# Sistemas Fotovoltaicos Isolados Aplicados à Eletrificação Rural: Ensaios de Equipamentos, Maximização de Potência e Monitoramento de Sistemas

L. de V. B. Machado Neto, PUC MINAS, C. V. T. Cabral, UFV, A. S. A. C. Diniz, CEMIG,

P. C. Cortizo, UFMG e D. Oliveira Filho, UFV

**Resumo-** A maximização da eficiência é essencial para o desenvolvimento da viabilidade técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos. Este artigo apresenta o desenvolvimento de conversor para máxima transferência de potência. O sistema fotovoltaico utilizado é similar aos instalados pela CEMIG em escolas de comunidades isoladas - Programa Luz Solar. Inicialmente foram realizados ensaios de equipamentos, cobrindo requisitos mínimos de desempenho e com adequações às normas nacionais e internacionais. Foi montado um sistema de aquisição de dados para o monitoramento do sistema fotovoltaico. O sistema foi simulado com o objetivo de otimizar o projeto e realizar um estudo comparativo com os resultados do monitoramento. O algoritmo de controle do conversor para máxima transferência de potência foi implementado utilizando um microcontrolador. Os resultados deste trabalho estão permitindo o desenvolvimento da sustentabilidade dos sistemas instalados pela CEMIG, dando suporte às iniciativas governamentais no controle da qualidade de equipamentos e promovendo o desenvolvimento de tecnologia nacional.

**Palavras-chave** - Ensaios de Equipamentos, Monitoramento de Sistemas, Rastreamento do Ponto de Potência Máxima. E Sistemas fotovoltaicos.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia solar fotovoltaica para a geração distribuída de energia elétrica têm se tornado uma opção, cada vez mais, viável técnica e economicamente. A sua natureza como fonte renovável, a modularidade, a minimização de custos dos equipamentos proporcionados pela eletrônica e as exigências sociais, ambientais e de órgãos reguladores contribuem para este avanço. O crescimento médio anual da produção mundial de geradores fotovoltaicos na última década foi de 20 %, com previsão para a primeira década do século XXI de 30 %.

---

Este trabalho é apoiado pela Companhia Energética de Minas Gerais CEMIG – ANEEL – P&D017.

L. de V. B. Machado Neto é professor da PUC Minas (e-mail: lvilhena@pucminas.br).

C. V. T. Cabral é aluna de doutorado da UFV (e-mail: tclavale@vicososa.ufv.br).

A. S. A. C. Diniz é engenheira da CEMIG (e-mail: asacd@cemig.com.br).

P. C. Cortizo é professor da UFMG (e-mail: porfirio@cpdee.ufmg.br)

D. Oliveira Filho é professor da UFV (e-mail: delly@ufv.br)

Os maiores produtores mundiais são o Japão, Estados Unidos e União Européia, sendo o segmento de mercado predominante o dos sistemas interligados à rede. No Brasil, o segmento de mercado predominante é o de sistemas isolados para eletrificação rural (DINIZ et al., 2002; ANEEL, 2002).

O mercado brasileiro de geradores fotovoltaicos possui uma capacidade total de potência de pico instalada de cerca de 12 MW, sendo 2 MW produzidos no Brasil e o restante, importado. Também a produção brasileira de outros equipamentos para sistemas fotovoltaicos é incipiente, sendo a maioria importada. As principais barreiras para o desenvolvimento do mercado brasileiro constituem-se de: elevados custos iniciais de implantação, precariedade dos programas de sustentabilidade e a não coordenação conjunta de esforços (ANEEL, 2002). As pesquisas sobre sistemas fotovoltaicos têm se concentrado nas seguintes áreas: novos materiais, modelos de irradiação solar, modelos de demanda, monitoração, avaliação econômica e programas de qualidade, algoritmos de carga de baterias e técnicas de máxima transferência de potência (HUA e LIN, 2003; HOHM e ROPP, 2003; CASTAÑER e SILVESTRE, 2002). Em todas estas iniciativas, um ponto a se destacar é a análise da viabilidade técnica e econômica. A incorporação ao sistema fotovoltaico de técnicas de máxima transferência de potência possui, atualmente, viabilidade técnica com a utilização de equipamentos eletrônicos, como conversores e microcontroladores. Com a tendência à diminuição de custos verificados na eletrônica e com o ganho no desempenho dos sistemas fotovoltaicos com máxima transferência de potência, a viabilidade econômica pode vir a ser atingida. As pesquisas para maximização da transferência de potência concentram-se no desenvolvimento de sistemas utilizando-se conversores eletrônicos microcontrolados de alto rendimento. Estes equipamentos permitem a otimização dos algoritmos mesmo com a variação da radiação solar e temperatura. Desta forma, o estudo do equipamento para a máxima transferência de potência é imprescindível, contribuindo para a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos.

Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de um conversor eletrônico para máxima transferência de potência em sistemas fotovoltaicos, com as seguintes etapas: ensaios de equipamentos do sistema fotovoltaico utilizado, tais como, geradores fotovoltaicos, reatores eletrônicos, inversores, controladores de carga e baterias, projeto, simulação e monitoração do sistema com e sem conversor eletrônico e análise técnica e econômica do desempenho do sistema com e sem conversor eletrônico para máxima transferência de potência.

## II. ENSAIOS DE EQUIPAMENTOS

O desenvolvimento da sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos exige programas de qualidade de equipamentos. Atualmente, no Brasil várias iniciativas encontram-se em processo de desenvolvimento, tais como a revitalização do Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios – PRODEEM e implantação do programa de qualidade, Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO. A estratégia básica a ser utilizada para a implantação do programa é o desenvolvimento de ensaios cobrindo requisitos mínimos de desempenho dos equipamentos. Para subsidiar estas iniciativas, o desenvolvimento do conversor eletrônico para máxima transferência de potência e a sustentabilidade dos sistemas do Programa Luz Solar da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, em torno de 10.000 sistemas residenciais e 300 sistemas fotovoltaicos instalados em escolas e centros comunitários no interior de Minas Gerais, encontra-se em desenvolvimento procedimentos de ensaios de geradores fotovoltaicos, reatores eletrônicos, inversores, controladores de carga e baterias, cobrindo requisitos mínimos e com adequações às normas nacionais e internacionais. O desenvolvimento do trabalho consistiu das seguintes etapas: calibração de piranômetros, implantação de estação de irradiação e iluminância, ensaios de geradores fotovoltaicos, ensaios de reatores eletrônicos e lâmpadas fluorescentes e ensaios de inversores. Atualmente, encontra-se em desenvolvimento, o procedimento de ensaios de controladores de carga e baterias.

### A. Ensaios de Geradores Fotovoltaicos

O desenvolvimento de procedimentos de ensaios para a avaliação do desempenho de geradores fotovoltaicos consistiu das seguintes etapas: desenvolver rotinas de ensaios, montar bancada de ensaios, realizar ensaios dos componentes utilizados no sistema projetado e no Programa Luz Solar e gerar relatórios de resultados e recomendações. Inicialmente, os piranômetros a serem utilizados nos ensaios foram calibrados. Em seguida foi montada a estação de irradiação e iluminância. A estação tem como objetivos coletar e tratar dados de irradiação e iluminância para formação de uma base de dados a ser utilizada nos projetos em desenvolvimento pelo grupo. A Figura 1 apresenta os

primeiros resultados obtidos. São apresentados para um dia os seguintes parâmetros: irradiação direta, irradiação global, iluminância global, iluminância difusa, iluminância oeste, iluminância leste, iluminância norte e iluminância sul. Atualmente, estão sendo realizados os ajustes dos sensores, procedimentos de acompanhamento e tratamentos de dados. Um procedimento simplificado para o ensaio do gerador fotovoltaico com a técnica de iluminação contínua consistiu dos seguintes passos: determinação da hora na qual a massa de ar é igual a 1,5, montagem do sistema para teste, exposição do gerador ao Sol durante um período suficiente para atingir o balanço térmico, medição da temperatura média do gerador, medição da característica tensão – corrente do gerador sob teste e imediatamente após a medição, repetir a medição de temperatura e verificar se a variação de temperatura não excedeu 2°C. O simulador de carga eletrônico utilizado para obtenção da curva tensão–corrente consiste de um conversor cc-cc que permite o controle eletrônico de uma carga resistiva imposta ao gerador fotovoltaico. Um computador controla o ciclo de trabalho através de um conversor digital-analógico, um modulador por largura de pulso e um conversor cc-cc. Um sistema de aquisição de dados permite a coleta dos seguintes parâmetros: irradiação global, temperatura, tensão e corrente do gerador fotovoltaico. Um exemplo dos resultados do ensaio para um gerador fotovoltaico é apresentado na Fig. 2. Devido ao volume de dados coletados, um programa para o tratamento dos dados utilizando o MatLab encontra-se em desenvolvimento. Observe que o fator de escala para a corrente e tensão não foram ainda incorporados. Para estimar os parâmetros do gerador foi utilizado o método de regressão não-linear dos mínimos quadrados de Levenberg-Marquand nos dados coletados. Foi realizada também a comparação da curva característica fornecida pelo fabricante e a curva obtida com a simulação do modelo de exponencial dupla para o gerador. A Figura 2 apresenta, também, a janela do programa com a estimação de parâmetros realizada.

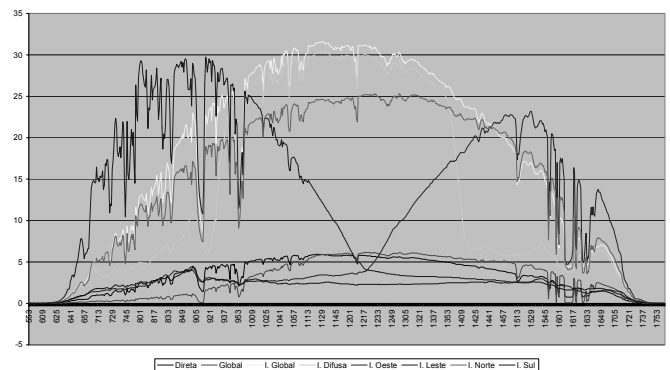


Fig. 1. Resultados da estação de irradiação e iluminância.

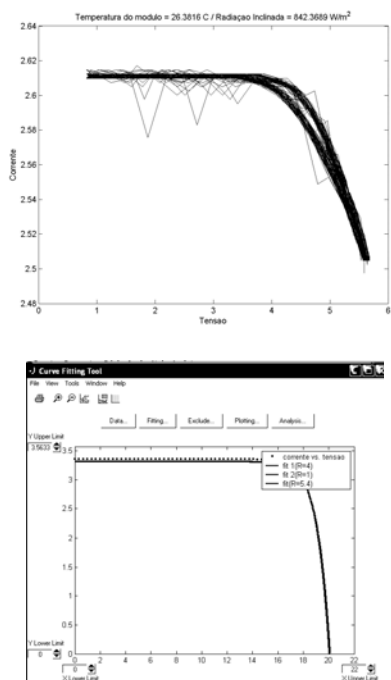


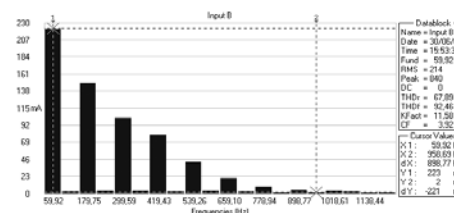
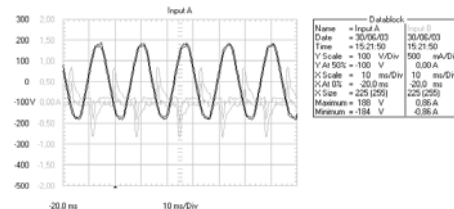
Fig. 2. Curvas V-I – tratamento de dados sem o fator de escala e estimação de parâmetros do modelo utilizando o método de Levenberg-Marquard - mínimos quadrados não linear nos dados coletados.

### B. Ensaios de Reatores Eletrônicos

A meta foi desenvolver procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho dos reatores eletrônicos utilizados no sistema projetado e nos sistemas fotovoltaicos do Programa Luz Solar da CEMIG. A norma utilizada nos ensaios foi a ANSI C82.11-1993. Os equipamentos utilizados na bancada de ensaios foram: osciloscópio digital Fluke 199, 200 MHz, 2,5 GS/s, ponta de corrente Fluke 80i-110s AC/DC, 100 kHz, Datalogger Li-cor LI-1400, fotômetro Li-cor, medidor de energia MCP5000 da Yokogawa e um Laptop Compaq Presario AMD-K6. O ensaio de reatores eletrônicos iniciou-se utilizando a tensão de alimentação senoidal da concessionária. Devido a não disponibilidade de um reator padrão calibrado, foi ensaiado inicialmente um reator que será utilizado como padrão. Este reator foi adquirido no varejo da cidade de Belo Horizonte, MG, Brasil. As características do reator fornecidas pelo fabricante, os resultados do ensaio e a análise harmônica da corrente de entrada (TDH=67,89%) são apresentados na Fig. 3. O desenvolvimento de ensaios de durabilidade encontra-se em progresso e observando os seguintes itens: temperatura de operação, qualidade dos capacitores e indutores, proteção contra transientes elétricos, operação com número reduzido de lâmpadas, operação com lâmpadas não adequadas ou queimadas, operação em circuito aberto e curto-circuito.

Tensão nominal - $V_n$	127V
Corrente nominal - $I_n$	0,23A
Potência Total	18W
Fator de Potência	0,55C
Fator Fluxo Luminoso	1,00
Fator de Eficiência	107%

Parâmetros de Saída	Valor
Corrente eficaz	226 mA
Corrente CA	224 mA
Corrente pico a pico	0,77 A
Corrente CC de saída	17 mA
Fator de crista da I	1,704
Frequência corrente	26,12 kHz
THD da corrente	15,65 %



Parâmetros de Entrada	Valor
Tensão alternada de entrada	127,3 V
Tensão pico a pico	0,35 kV
Corrente alternada de entrada	231 mA
Corrente pico a pico	1,68 A
Corrente eficaz de entrada	234 mA
Corrente contínua de entrada	20 mA
Fator de potência	0,56
Eficiência do sistema	186,17625
Potência ativa	16 W
Potência aparente	29 VAR
Potência reativa	24 VAR
Consumo	0,015 kWh
Luminância da lâmpada	2010 Lux 2978,82 Lumens
Frequência de entrada	59,97 Hz
THD da corrente	67,89 %

Fig. 3. Características do reator, resultados do ensaio e tensão e corrente de entrada e análise harmônica da corrente de entrada.

### C. Ensaios de Inversores

A meta foi desenvolver procedimentos de ensaios para a avaliação de desempenho dos inversores utilizados no sistema projetado e nos sistemas fotovoltaicos do Programa Luz Solar da CEMIG. Um procedimento inicial foi adotado, sugerido pelo grupo de trabalho em sistemas fotovoltaicos do INMETRO, com a avaliação dos seguintes parâmetros: regulação de tensão, regulação de frequência, eficiência, distorção harmônica da tensão e sobrecarga. Os equipamentos utilizados na bancada de ensaios foram: osciloscópio digital Fluke 199, 200 MHz, 2,5 GS/s, ponta de corrente Fluke 80i-110s AC/DC, 100 kHz, banco de baterias, cargas elétricas e Laptop Compaq Presario AMD-K6. O primeiro modelo ensaiado consistiu de um inversor onda quadrada de 300 W. As características fornecidas pelo fabricante são: tensão de entrada igual a 12 V, +/- 25%, potência de saída igual a 300 W, tensão de saída igual a 115 V, +/- 5%, frequência de saída igual a 60 Hz, eficiência maior que 70 %, forma de onda quadrada e corrente a vazio variando de 0,2 a 0,7 A. Os resultados do ensaio são apresentados na Fig. 4, sendo: curvas de eficiência e tensão da bateria, formas de onda da tensão e corrente de entrada e saída do inversor e análise harmônica da tensão de saída para uma carga de 50% da potência nominal.

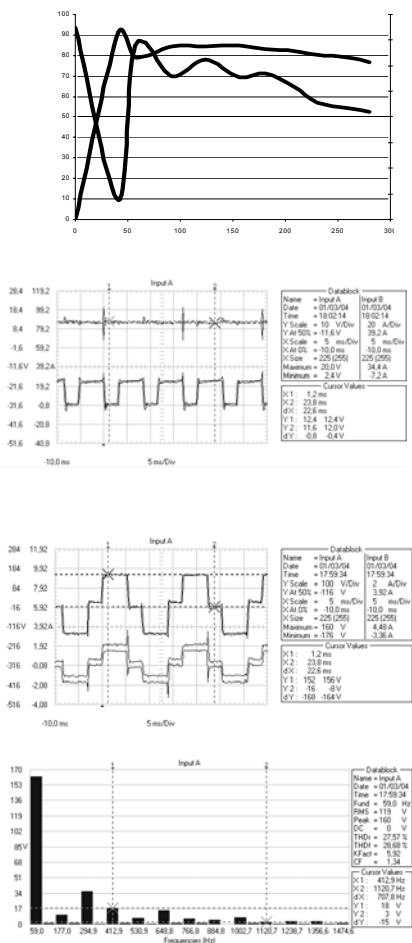


Fig. 4. Curvas de eficiência e tensão da bateria para cargas resistivas, formas de onda da tensão e corrente para entrada e saída do inversor com uma carga de 50% da potência nominal e análise harmônica da tensão de saída.

### III. MONITORAMENTO DE SISTEMAS

A sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos isolados passa por um acompanhamento dos sistemas instalados no campo. Para subsidiar este acompanhamento e validar o protótipo do conversor eletrônico foram desenvolvidos procedimentos de monitoramento em um sistema fotovoltaico similar ao instalado em campo. Os resultados obtidos irão permitir realizar a análise técnica e econômica do conversor de máxima transferência de potência e o desenvolvimento de um programa de manutenção preventiva dos sistemas fotovoltaicos instalados pela CEMIG nas escolas de comunidades isoladas dentro do Programa Luz Solar. O objetivo inicial foi desenvolver procedimentos de ensaios e monitoramento de sistemas fotovoltaicos para avaliação de desempenho e identificação de falhas, com as seguintes etapas de desenvolvimento: desenvolver rotinas de monitoramento para sistemas fotovoltaicos, montar bancada de monitoramento, gerar novas rotinas de implantação de sistemas fotovoltaicos e treinar equipe de implantação e manutenção. Foi desenvolvido um programa em C++ Builder para o dimensionamento do sistema e foi utilizado o programa Solar Studio Design - Sandia para simulação do mesmo. O objetivo foi realizar um estudo comparativo dos resultados da simulação com o do sistema montado. A montagem da bancada consistiu da implantação dos sensores de tensão, corrente, irradiância e temperatura, instalação das placas de aquisição de dados e desenvolvimento do programa de monitoração, coleta e tratamento dos dados (Labview). Atualmente, encontra-se em desenvolvimento o estudo comparativo dos resultados da simulação e os obtidos com a montagem, avaliação de desempenho do sistema e identificação de falhas. Encontra-se, também, em desenvolvimento novas rotinas de implantação, com a geração de novo esquema elétrico, desenvolvimento de fluxogramas e planilhas de descrição e treinamento da equipe de implantação, com a utilização de programas utilizando sistemas especialistas.

#### A. O Sistema Fotovoltaico Isolado

O sistema fotovoltaico isolado implantado é similar aos sistemas instalados pela CEMIG nas escolas de comunidades isoladas, dentro do Programa Luz Solar. O Sistema é composto de: 10 módulos fotovoltaicos de 54 W<sub>p</sub>, 6 baterias de 12 V, 85 Ah, selada e regulada por válvula, 1 controlador de carga, 12/24 V, 30 A, 1 Inversor 800 W/24 V, 3 disjuntores, 1 fusível 63 A, 500 V, 8 reatores 32 W, 118 V, 50/60Hz, 8 lâmpada Fluorescente 32 W. O sistema possui, ainda, uma carga de 3 reatores e lâmpadas fluorescente de 16 W, que não foram utilizadas porque os reatores apresentaram problema de ignição, não acendendo as lâmpadas. O inversor foi conectado diretamente ao banco de baterias devido à corrente de partida do inversor causar a atuação da proteção de sobre-corrente do controlador de carga. Além da carga de iluminação o sistema foi projetado para alimenta um televisor, videocassete e um receptor de sinais de antena parabólica. Esta carga foi simulada através

de um reostato com potência de 1 kW. A Figura 5 apresenta as características das cargas e seu perfil de demanda diária. Foram utilizado dois temporizadores para implementar os perfis de demanda diária. Figura 6 apresenta o diagrama elétrico e algumas fotos do sistema monitorado.

Iluminação 1	256 W	08:00/11:00 e 18:00/23:00
Iluminação 2	48 W	Não utilizada
TV, vídeo e receptor	150 W	18:00/22:00

Fig. 5. Tabela com as características e perfil de demanda das cargas.

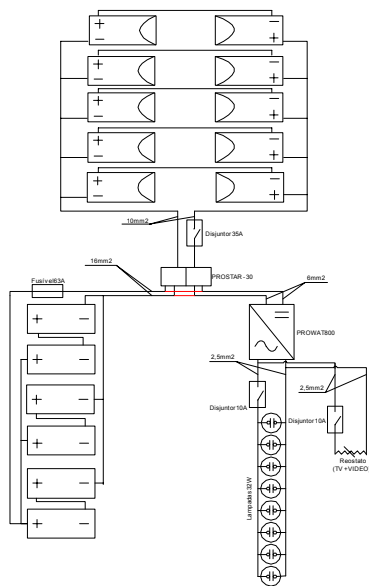


Fig. 6. Diagrama elétrico e fotos do sistema monitorado.

### B. Simulação do Sistema Fotovoltaico Isolado

Para otimizar o projeto do sistema fotovoltaico foi realizada uma simulação utilizando o programa PV – DesignPro da MAUI Software. Para gerar o perfil de irradiação da cidade de Belo Horizonte foi utilizado o programa Worldwide Hourly Climate Generator 4.0 da MAUI Software. Este programa cria arquivos de irradiação solar horária a partir de dados mensais. O programa possui uma base de dados mensais de mais de 2.123 localidades ao redor do mundo. Os dados destas localidades incluem médias diárias da irradiação solar em uma superfície horizontal em cada mês e latitude do local. Figura 6 apresenta o perfil de irradiação horário utilizado na

simulação. A seguir foram especificados o perfil de carga, o arranjo fotovoltaico, o banco de baterias e o inversor utilizados na simulação. Infelizmente a base dados do programa não incorpora o módulo fotovoltaico MSX-56; em vez deste módulo, foi utilizado na simulação o módulo Solarex MSX-60. A fração solar é calculada como Watt-hora da carga menos a energia de reserva mais Watt-hora de carregamento dividido pelo Watt-hora da carga. A fração solar anual calculada foi de 72,3% com um máximo de 83,5% em fevereiro e um mínimo de 65,8 em janeiro. O estado de carga médio da bateria é o estado de carga médio anual para as baterias. O estado de carga médio calculado foi de 75,5%. A profundidade de descarga diária estimada foi de 49%, assumindo que as baterias alcancem a plena carga na maioria dos dias. A Figura 7 apresenta o resultado geral da simulação para a primeira semana de dezembro. As curvas apresentadas são: irradiação ( $W/m^2$ ), temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ), potência do arranjo (W), temperatura da célula ( $^{\circ}C$ ), eficiência (%), estado de carga da bateria (%), tensão da bateria (V) e potência da carga (W).

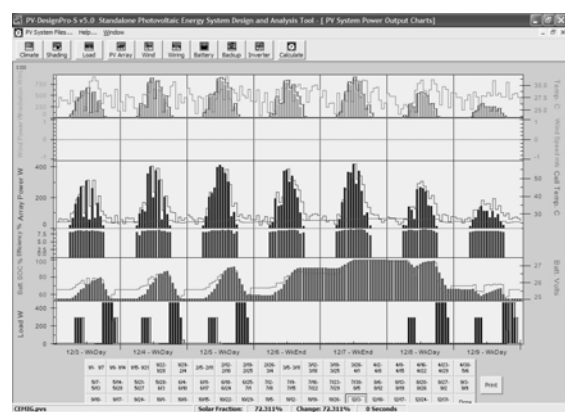
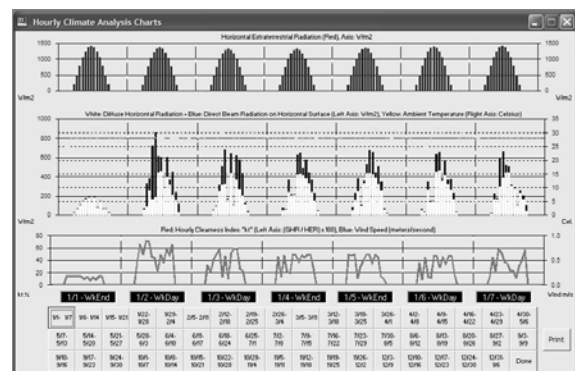


Fig. 7. Perfil de irradiação horário utilizado na simulação e resultado geral da simulação para a primeira semana de dezembro.

### C. Bancada e Resultados do Monitoramento

O Procedimento utilizado na montagem da bancada de monitoração consistiu de: implantação dos sensores de tensão, corrente, irradiação e temperatura, montagem do sistema de aquisição de dados, desenvolvimento programa

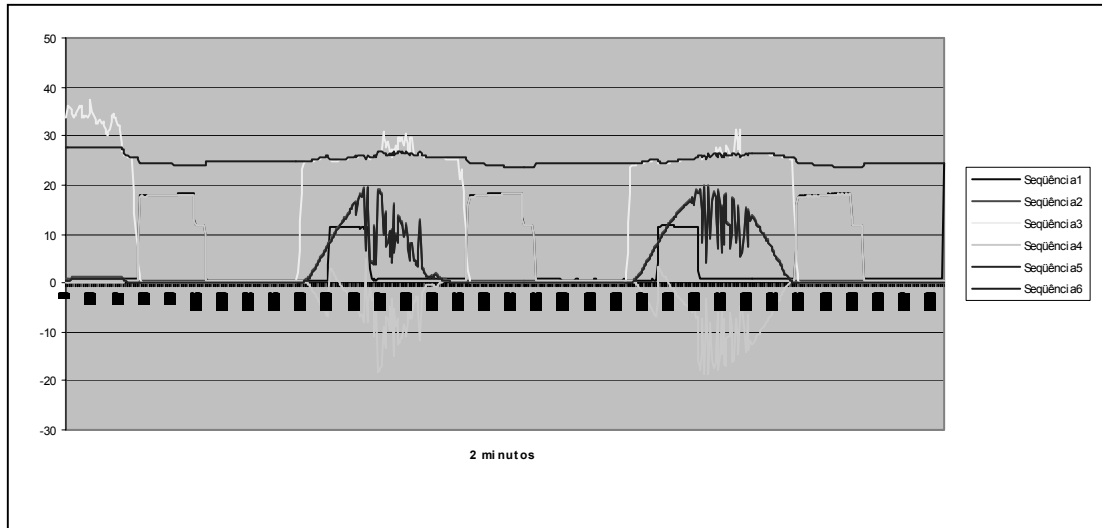


Fig. 8. Resultados do monitoramento: corrente na entrada do inversor (S. 1), corrente do gerador (S. 2), tensão do gerador (S. 3), corrente da bateria (S. 4), corrente na saída do controlador (S. 5), tensão da bateria (S. 6).

de monitoração e coleta e tratamento dos dados. Para a medição de corrente e tensão dos componentes foi utilizado sensores de efeito Hall. Não foi necessário condicionar os sinais para o sistema de aquisição de dados devido à sua característica contínua. Foram utilizados piranômetros para a medição da irradiação global horizontal e inclinada e um pireliômetro para a medição da irradiação direta normal. Dois termopares tipo K foram utilizados para a medição das temperaturas no gerador fotovoltaico e no banco de baterias. Foram utilizadas duas placas de aquisição de dados, sendo uma para a aquisição das grandezas elétricas e a outra para a aquisição das grandezas atmosféricas. O programa LabView foi utilizado para monitorar e tratar os dados coletados. Os primeiros resultados do monitoramento são apresentados aqui. A Figura 8 apresenta o monitoramento das seguintes grandezas: corrente na entrada do inversor, corrente do gerador, tensão do gerador, corrente do banco de baterias, corrente na saída do controlador e tensão do banco de baterias. Estas formas de onda correspondem a 2,5 dias de monitoramento. A cada dois minutos o programa calcula o valor médio das grandezas.

#### IV. CONVERSOR PARA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

A configuração básica de um sistema de energia solar fotovoltaica isolado pode incluir os seguintes subsistemas: gerador fotovoltaico, rastreador solar, conversor eletrônico para máxima transferência de potência, controlador de carga, bateria, inversor e cargas em corrente contínua e alternada. A metodologia de projeto de sistemas fotovoltaicos apresenta algumas especificidades: radiação com característica estocástica, necessidade de avaliação do desempenho energético dos geradores fotovoltaicos, adequação da carga ao ponto de máxima transferência de potência do gerador, necessidade de algoritmos de controle

de carga de baterias, adequação do regime de funcionamento das cargas em corrente contínua e alternada e otimização do desempenho dos condicionadores de energia (controladores de carga, inversores e reatores eletrônicos). Ao incorporar ao sistema fotovoltaico um conversor com Rastreamento do Ponto de Potência Máxima - RPPM, que consiste de um casador de impedância dinâmico entre o gerador fotovoltaico e a carga, espera-se obter um ganho de energia de forma a otimizar a carga das baterias e minimizar o número de módulos do gerador fotovoltaico. Aqui são apresentados os primeiros resultados do desenvolvimento de um conversor para RPPM. Após a conclusão do protótipo, este será incorporado ao sistema fotovoltaico que se encontra em monitoramento e será realizada uma análise técnica e econômica do projeto.

##### A. Rastreamento do Ponto de Potência Máxima

O gerador fotovoltaico possui um ponto no qual fornece potência máxima para a carga. A interseção da curva característica corrente-tensão com a reta de carga estabelece o ponto de operação. Com isto, geralmente o ponto de operação encontra-se em um nível de potência abaixo do ponto de potência máxima. Para a maximização da energia gerada é necessário um circuito eletrônico de acoplamento entre o gerador fotovoltaico e a carga. O acoplamento entre o gerador fotovoltaico e a carga a ser alimentada é definido pela interseção da curva característica corrente-tensão do gerador e da carga. No ponto de potência máxima a taxa de variação da potência é igual a zero; com isto, tem-se:

$$\Delta P = 0 \quad [1]$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad [2]$$

$$\frac{dV}{dI} = Z_d \quad \text{Impedância Dinâmica} \quad [3]$$

$$\frac{V}{I} = Z_e \quad \text{Impedância Estática} \quad [4]$$

### B. Conversor Eletrônico com Seguidor do Ponto de Potência Máxima

Para a maximização da geração de energia é necessário um equipamento eletrônico de acoplamento e algoritmos de controle. Estes algoritmos utilizam os seguintes princípios: (i) injeção periódica de pequeno sinal de corrente no barramento do gerador com a medição da impedância estática ( $Z_e=V/I$ ) e dinâmica ( $Z_d=dV/dI$ ) e controle da tensão de operação até a equalização das impedâncias, ou seja,  $Z_d = -Z_e$ ; (ii) medição da taxa de variação da potência em relação à tensão e aumento da tensão de operação enquanto a taxa de variação da potência for positiva; e (iii) medição da tensão de circuito aberto de uma célula no mesmo ambiente do gerador. Para a maioria das células a razão entre a tensão no ponto de máxima potência e a tensão de circuito aberto é igual a uma constante  $K$ . Portanto, é estabelecido o valor da tensão de operação como sendo  $K$  vezes a tensão de circuito aberto (PATEL, 1999). Algoritmos mais recentes incorporam técnicas de otimização, tais como, ajuste de curvas, redes neurais e lógica nebulosa. Atualmente, as pesquisas para maximização da transferência de potência concentram-se no desenvolvimento de sistemas utilizando-se conversores eletrônicos microcontrolados ou com processadores de sinais. Estes equipamentos permitem a otimização dos algoritmos mesmo com a variação da radiação solar e temperatura. O diagrama do conversor para máxima transferência de potência e o fluxograma do algoritmo de rastreamento são apresentados na Figura 9. Neste primeiro protótipo foi utilizado o microcontrolador HC08 da Motorola.

O desenvolvimento do algoritmo de máxima transferência de potência obedeceu ao seguinte procedimento: estudo dos algoritmos de máxima transferência de potência e definição por um algoritmo de fácil implementação, não envolvendo processamento matemático pesado, por exemplo, cálculo de derivadas - condutância incremental (HUA e LIN, 2003). A Figura 9 apresenta os primeiros resultados do protótipo para uma carga resistiva de 11,78  $\Omega$ . Para esta carga, a faixa do ganho de potência foi de 18 a 90% para uma faixa de irradiação de 600 a 180  $W/m^2$ .

### V. CONCLUSÕES

Os trabalhos desenvolvidos têm demonstrado o potencial de ensaios de equipamentos e avaliação de sistemas fotovoltaicos para a sustentabilidade de sistemas fotovoltaicos isolados aplicados à eletrificação rural e para o desenvolvimento de uma tecnologia nacional nesta área. Atualmente, encontra-se em desenvolvimento procedimento de ensaios para controladores de carga e baterias. Os resultados preliminares obtidos estão permitindo colaborar para a sustentabilidade dos sistemas instalados pela CEMIG, subsidiar as iniciativas governamentais e promover o

aprimoramento da qualidade de equipamentos da indústria local.

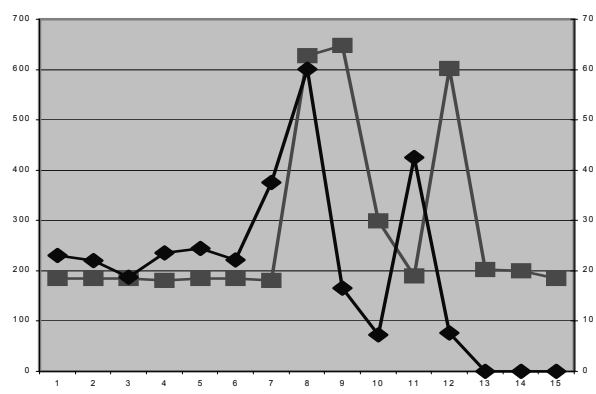
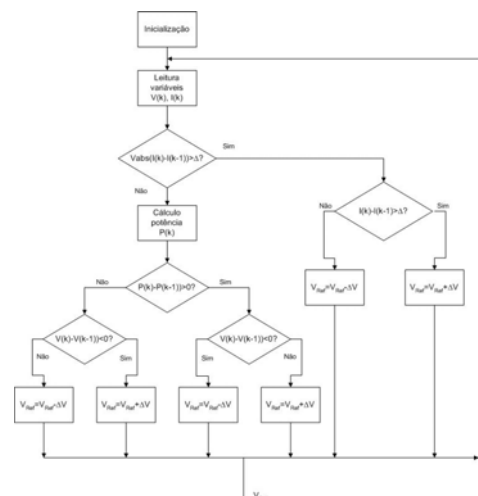
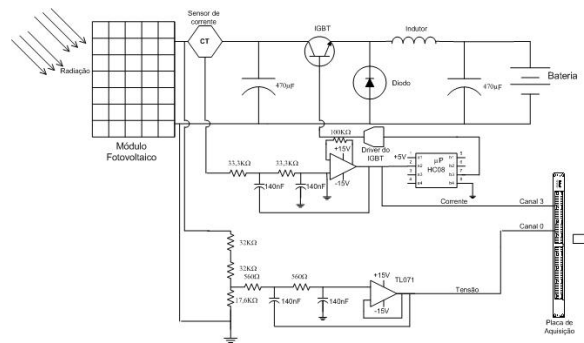


Fig. 9. Diagrama elétrico do conversor, fluxograma do programa de rastreamento e Irradiação solar (■  $W/m^2$ ) e potência de saída do conversor de máxima potência (◆  $W$ ).

O monitoramento do sistema está permitindo avaliar o desempenho e identificar falhas. Os primeiros resultados estão colaborando para o desenvolvimento de um programa de manutenção preventiva dos sistemas instalados pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG.

Atualmente, o estudo comparativo dos resultados da simulação e do monitoramento, avaliação do desempenho do sistema e identificação de falhas encontra-se em desenvolvimento. Deste estudo serão desenvolvidas novas

rotinas de implantação de sistemas com a geração de um novo projeto elétrico, fluxogramas de implantação, planilhas de acompanhamento e treinamento da equipe de implantação. O estudo das técnicas de máxima transferência de potência para sistemas fotovoltaicos tem demonstrado o potencial destas técnicas para a viabilização econômica de sistemas fotovoltaicos isolados aplicados à eletrificação rural. Simulações do conversor e otimização do protótipo encontram-se em curso. O desempenho do algoritmo de rastreamento do ponto de potência máxima está sendo analisado em termos do ganho do conversor, tipo de carga e tempo de processamento do algoritmo. A análise técnica e econômica do conversor compreendem três etapas, sendo a primeira etapa o balanço de energia do sistema sem e com conversor para máxima transferência de potência. O segundo passo consiste da coleta e tratamento de dados do sistema em monitoramento, com a implementação do balanço de energia instantâneo, diário e sazonal, estudo comparativo e cálculo do ganho de energia obtido com o conversor. E finalmente, a terceira etapa consiste da estimativa do custo do protótipo, incluindo os custos de desenvolvimento, de componentes e de fabricação em série. Finalmente será realizada a análise de custos do sistema fotovoltaico com base no custo do capital inicial e análise de viabilidade e sensibilidade. A partir dos resultados obtidos, desenvolvimento e análise econômica de conversor eletrônico para máxima transferência de potência em sistemas fotovoltaicos, espera-se contribuir para o aumento da eficiência no aproveitamento da energia solar.

#### AGRADECIMENTOS

Este projeto tem o fomento da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG - P&D017 – CEMIG – ANEEL.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, Brasília, 153 p., 2002.
- [2] POPPE, M. K., **Anais do Seminário Reestruturação do PRODEEM**, CDU 621.311: 316.334.55(063), Brasília, 2002.
- [2] DINIZ, A. S. A. C., FRANÇA, E. D., TOMÉ, J., CARVALHO, F. W., BORGES, D., Canara, C. F., **An Utility's Photovoltaic Commercialization Initiative: Progress of the Luz Solar Program for Rural Electrification**, *Proc. 2002 IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1476–1480.
- [3] KOUTROULIS, E., KALAITZAKIS, K., **Development of an Integrated Data Acquisition System for Renewable Energy Sources Systems Monitoring**, *Renewable Energy*, 28, Elsevier Science Ltd., pp. 139-152, 2003.
- [4] MACHADO NETO, L. de V. B., OLIVEIRA, L. G. M. de, CABRAL, C. V. T., OLIVEIRA FILHO, D., Cortizo, P. C., DINIZ, A. S. A. C., **Development of Models for Test Performance of PV Modules**, *Proc. 2003 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 7LN-

D-11.

- [5] CASTAÑER, L., SILVESTRE, S., **Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice**, ISBN 0-470-845279, 358 p., John Wiley & Sons Ltd., England, 2002.
- [6] HADI, H., TOKUDA, S., RAHARDJO, S., **Evaluation of Performance of Photovoltaic System with Maximum Power Point (MPP)**, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 75, 2003, 673-678, Elsevier Science Ltd.
- [7] HOHM, D. P., ROPP, M. E., **Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms**, *Progress in Photovoltaics: Res. and Appl.*, 11, 2003, 47-62, John Wiley & Sons, Ltd.
- [8] HUA, C., LIN, J., **An On-line MPPT Algorithm for Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays**, *Renewable Energy*, 28, 2003, 1129-1142, Elsevier Science Ltd.
- [9] IKEGAMI, T., MAEZONO, T., NAKANISHI, YAMAGATA, Y., EBIHARA, K., **Estimation of Equivalent Circuit Parameters of PV Module and Its Application to Optimal Operation of PV System**, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 67, 2001, 389-395, Elsevier Science Ltd.
- [10] KUO, B. C., **Automatic Control Systems**, ISBN 0-13-304759-8, Prentice Hall, Inc., 1995.
- [12] PATEL, M. R., **Wind and Solar Power Systems**, ISBN 0-8493-1605-7, CRC Press, 1999.
- [13] MOHAN, N., UNDERLAND, T. M., ROBBINS, W. P., **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, ISBN 0-471-58408-8, John Wiley & Sons, Inc., 1995.