

## **SISTEMA TRAÇADOR DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

**Fabiano Perin Gasparin, Arno Krenzinger.**

Laboratório de Energia Solar UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil  
PROMEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Tel. 055 51 3308 6841 email: gasparin.fabiano@gmail.com

**RESUMO:** As células e módulos fotovoltaicos possuem um comportamento elétrico característico, sendo a determinação da curva I-V (corrente *versus* tensão) essencial para avaliar a qualidade do dispositivo. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema para traçar curvas características de módulos fotovoltaicos, composto por fonte de quatro quadrantes para polarização do módulo, multímetros para medida simultânea de tensão e corrente, multímetro para medida de irradiância solar por meio de uma célula de referência e multímetro para medida de temperatura do módulo utilizando um sensor Pt100. O sistema é gerenciado por um programa de computador dedicado que envia os comandos para os equipamentos através de uma interface USB – GPIB. Os limites do sistema são  $\pm 100$  V e  $\pm 10$  A, com capacidade de adquirir até 2000 pontos. O sistema tem sido utilizado para caracterização de módulos fotovoltaicos no Laboratório de Energia Solar da UFRGS – Brasil.

**Palavras chave:** energia solar, módulo fotovoltaico, curva característica I-V,

### **INTRODUÇÃO**

Todas as formas de utilização de energia são fundamentais para o funcionamento da sociedade moderna e para a sobrevivência humana. Certamente a energia elétrica desempenha papel chave no funcionamento da economia e na satisfação das necessidades básicas da população. A tendência mundial na busca de fontes alternativas e renováveis de energia está cada vez mais em evidência, tanto por razões ecológicas como para diversificação da matriz energética. A energia solar é abundante e renovável sendo a conversão da energia solar diretamente em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico, uma forma confiável de geração de eletricidade, considerando que não há partes móveis, geração de ruídos e o consumo de combustível para o funcionamento dos sistemas instalados. Embora seja uma fonte intermitente de geração de eletricidade, ela pode desempenhar um papel significativo na matriz energética futura.

Os módulos fotovoltaicos possuem um comportamento elétrico característico, e a geração de eletricidade, objetivo final das instalações fotovoltaicas, é influenciada por variáveis como radiação solar, temperatura da célula fotovoltaica, distribuição espectral da radiação e tipo de tecnologia empregada na fabricação das células que compõem o módulo fotovoltaico. A curva característica I-V (corrente *versus* tensão) de um módulo fotovoltaico é a base para sua caracterização elétrica, e os parâmetros extraídos da curva são utilizados para determinação da qualidade do dispositivo, para realização de estudos científicos e de engenharia, para dimensionamento dos sistemas, estimativa de geração de energia elétrica e estudos de viabilidade econômica dos projetos de sistemas fotovoltaicos.

### **SISTEMAS PARA TRAÇAR CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V**

Existem diversos sistemas de instrumentação para esta finalidade, e cada laboratório ou centro de pesquisa possui sua instrumentação para a realização do ensaio. Dentre os sistemas encontrados na literatura cita-se aquele desenvolvido por Prieb (2002), que utiliza uma fonte de quatro quadrantes para polarização do módulo, juntamente com multímetros comandados por um programa de computador para a leitura dos pares I-V. Este sistema tem como principais características a aquisição de 512 pares I-V em um tempo aproximado de 1,8 s. A linguagem de programação utilizada foi Basic para MS-DOS. Koster *et al* (2006) descreve um sistema que utiliza uma fonte bipolar da marca Kepco como carga eletrônica e um equipamento de aquisição de dados da *National Instruments* com conversor A/D de 16 bit para medida dos pares I-V em um tempo total da varredura de 0,4 s. Os resultados deste trabalho mostram diferentes efeitos na curva I-V para diferentes formas de onda de polarização. Durisch *et al* (1996 e 2000) descrevem o equipamento utilizado para medida de módulos fotovoltaicos no Paul Scherrer Institute, instituto de pesquisa em ciências naturais e engenharia localizado na Suíça. A varredura do módulo fotovoltaico leva entre 5 e 15 s e são medidos entre 100 e 300 pares I-V que são representados em uma curva I-V e analisados pelo programa do sistema. O equipamento permite testes com corrente de até 32 A e tensão de 120 V.

Na caracterização elétrica de módulos individuais a utilização de fontes bipolares de quatro quadrantes permite flexibilidade e facilidade na polarização, além de boa precisão e velocidade de varredura. Porém estas fontes têm limitações de corrente e

tensão que limitam seu uso a apenas módulos e pequenos arranjos fotovoltaicos, além do custo elevado e dificuldade de transporte devido ao peso e dimensões. Para a medida de arranjos fotovoltaicos cujos valores de corrente e tensão ultrapassem os limites das fontes eletrônicas disponíveis utilizam-se outras formas de polarização. Munhoz e Lorenzo (2006) descrevem uma instrumentação com a carga baseada em capacitores e transistores IGBT para a medida da curva I-V. A utilização deste recurso como carga eletrônica permitiu no referido sistema a ampliação dos limites de tensão para até 800 V e corrente até 80 A. Um osciloscópio que permite a captura de 512 pares I-V foi utilizado para medida. Outra vantagem deste sistema é a portabilidade, requisito indispensável para medidas em campo.

A medida da curva característica de módulos fotovoltaicos já é muito difundida, porém o desenvolvimento tecnológico dos multímetros e principalmente da informática, permitiram a evolução na precisão da medida e nos programas para tratamento dos dados, estando o tema da instrumentação para medidas de curvas características I-V de módulos fotovoltaicos em constante evolução. A evolução vertiginosa da informática tornou diversas placas eletrônicas e interfaces obsoletas, dificultando o armazenamento e transferência de dados entre gerações tecnológicas. A utilização de interfaces USB, além de sistemas operacionais e arquitetura de computadores atuais é outro ponto importante a considerar nos sistemas de aquisição de dados e medidas.

## DESCRIÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Para traçar a curva característica I-V de um módulo fotovoltaico é necessário realizar uma varredura de tensão no módulo, polarizando-o com valores de tensão e medindo a corrente correspondente sob determinadas condições de irradiância solar e temperatura do módulo. Para a obtenção completa da curva característica I-V são necessários valores de tensão inferiores a 0 V para definir o ponto de curto-circuito, pois é necessário compensar a queda de tensão associada à resistência série e aos fios e conexões, até valores de tensão superiores ao ponto de circuito aberto. Foi utilizada como carga eletrônica no sistema desenvolvido uma fonte bipolar de quatro quadrantes marca KEPCO modelo BOP 100-10 MG. Por meio de comandos enviados por um computador, esta fonte é programada com o valor inicial e final da rampa de tensão e o tempo de duração da rampa é calculado a partir do número de pontos e do tempo de duração de cada medida. Enquanto a fonte realiza a varredura de tensão é necessário medir os pares I-V de maneira sincronizada com a rampa. Foram utilizados dois multímetros digitais Agilent 3458A para as medidas de tensão e corrente. Ao mesmo tempo deve-se medir o valor da irradiância solar incidente sobre o módulo. Como no Laboratório de Energia Solar UFRGS há apenas dois multímetros modelo 3458A disponíveis, a aquisição dos dados de irradiância solar e temperatura são realizados com multímetros modelo 34410A. Segundo a norma técnica brasileira NBR 12136 (ABNT 1991) a variação da irradiância durante o ensaio sob iluminação natural não deve ser maior que 1 %. A melhor maneira de garantir esta condição é a realização da varredura em um intervalo de tempo pequeno, da ordem de décimos de segundo, pois nesse período a variação de irradiância não ultrapassa 1 % em dias de céu limpo. A temperatura do módulo é medida imediatamente antes e depois do ensaio, e o ensaio é realizado em um tempo no qual a variação de temperatura é desprezível.

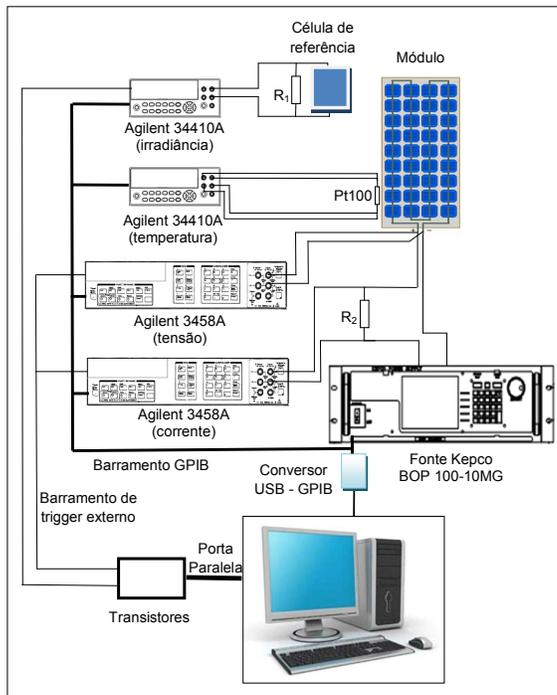
Toda a instrumentação é gerenciada por um programa de computador dedicado, desenvolvido no Laboratório de Energia Solar UFRGS na linguagem Visual Basic® versão 6.0. O número de pontos de cada curva pode ser definido no programa de gerenciamento, limitado a 2000 pontos. O limite teórico seria de 10240 pontos, que é o número de medidas que o multímetro 3458A pode armazenar na memória, porém uma quantidade de pontos desta magnitude aumentaria o tempo total de medida e o tempo de transferência dos dados dos multímetros para o computador desnecessariamente.

O método escolhido para iniciar cada medida foi o disparo por *hardware* através da entrada de *trigger* externo dos multímetros. Desta maneira garante-se que cada medida terá o mesmo pulso de disparo para os dois multímetros, assegurando a simultaneidade dos pontos obtidos. A fonte geradora dos pulsos de disparo é a porta paralela do computador. Foram montadas duas linhas de *trigger* para tornar independente o disparo da medida de irradiância e do par I-V. Isto foi necessário devido ao multímetro modelo 34410A possuir tempo mínimo de integração de 100  $\mu$ s o que limitaria o tempo total da medida da curva, e não seria explorada a capacidade de leitura do multímetro 3458A. Com a divisão das linhas de *trigger* em duas, obtém-se a individualidade do disparo para os multímetros 3458A e 34410A. No programa de gerenciamento foi desenvolvida uma função para estabelecer um tempo mínimo para cada medida de irradiância. Desta maneira é possível realizar a varredura de tensão tomando até 50  $\mu$ s por medida de corrente e tensão, e ao mesmo tempo tomar medidas de irradiância em intervalos maiores de tempo. Embora o sistema desenvolvido esteja interconectado com a fonte, também é possível utilizá-lo para aquisição de pares I-V quando a polarização é feita por cargas externas. O tempo de varredura da carga externa deve ser compatível com o tempo da medida e o sincronismo do início da medida pode ser feito manualmente. O diagrama esquemático e a fotografia do sistema podem ser vistos na Figura 1.

O sistema é composto pelos seguintes componentes:

- Fonte bipolar KEPCO – BOP 100-10MG

É a carga eletrônica utilizada para polarizar o módulo fotovoltaico com os diversos valores de tensão da curva I-V. A fonte KEPCO BOP 100-10MG é um dispositivo que atua nos quatro quadrantes, ou seja, operando como fonte de tensão ela fornece energia para uma carga passiva e como carga eletrônica absorve a corrente e dissipa a energia de uma carga ativa. A detecção automática faz o equipamento operar no modo fonte (*source*) ou absorvedor (*sink*). O módulo fotovoltaico atua como carga ativa, ou seja, como fonte de corrente quando polarizado no quadrante de geração. Nos outros quadrantes o módulo irá dissipar a corrente fornecida pela fonte. A fonte pode ser configurada pelo painel frontal ou programada por meio de comandos SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) enviados pela interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*). No sistema desenvolvido as funções da fonte são programadas remotamente pelo programa de gerenciamento, permitindo grande flexibilidade nas aplicações. A fonte tem potência máxima de 1000 W com limites de  $\pm 100$  V e  $\pm 10$  A, permitindo caracterizar módulos e arranjos dentro desta faixa de tensão e corrente.



(a) Diagrama esquemático do sistema, (b) Fotografia do sistema

- **Multímetro Agilent 3458A**

A resolução máxima do aparelho é de  $8 \frac{1}{2}$  dígitos. No sistema desenvolvido a resolução é de  $6 \frac{1}{2}$  dígitos devido ao tempo de integração utilizado. O multímetro pode ser configurado através de menus no painel frontal ou através de comandos enviados através da interface GPIB, utilizando uma sintaxe de comandos própria, similar ao padrão SCPI. A memória do equipamento tem capacidade de armazenar até 10240 medidas. Entre outros parâmetros, o tempo de integração, que é o tempo no qual o conversor A/D (analógico / digital) mede o sinal de entrada, é o mais preponderante na resolução máxima obtida. O parâmetro NPLC (*Number of Power Line Cycles*) ou APER (*APERture time*) especificam o tempo de integração do conversor A/D do multímetro. O parâmetro NPLC especifica o tempo em termos do número de ciclos da tensão de alimentação do multímetro e o parâmetro APER especifica o tempo diretamente em segundos.

- **Multímetro Agilent 34410 A**

A resolução máxima deste equipamento é de  $6 \frac{1}{2}$  dígitos. O tempo de integração mínimo para a medida de tensão DC é de 100  $\mu$ s. A memória interna tem capacidade de armazenar até 50000 leituras. Além das variáveis usuais, este multímetro tem a função de medida de temperatura diretamente utilizando um Pt100 a 2 ou 4 fios. A programação do multímetro é realizada através de comandos SCPI enviados pela interface GPIB.

- **Microcomputador e conversor USB – GPIB**

Um computador com sistema operacional Windows®, interfaces USB e porta paralela é utilizado para comandar o sistema. O programa de gerenciamento do sistema irá rodar no computador, efetuando a comunicação com os equipamentos por comandos enviados via conversor USB - GPIB modelo Agilent 82357A. A outra função do computador é realizar o disparo dos multímetros pela entrada de *trigger* externo, utilizando pulsos enviados pela porta paralela.

- **Resistor *shunt* para medida da corrente**

A corrente é medida por meio de um resistor *shunt* da marca *Hartmann & Braun* classe de precisão 0,5 %, representado por  $R_2$  na Figura 1a. A relação nominal do resistor utilizado é de 300 mV / 10 A.

- **Célula de referência com resistor *shunt***

A célula de referência utilizada para a medida da irradiância solar é de silício monocristalino previamente calibrada no Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri – Espanha, no ano de 1988. A célula foi aferida no Laboratório de Energia Solar da UFRGS no mês de Novembro de 2008, contra um piranômetro marca Eppley, permanecendo o valor especificado na calibração original. A célula tem corrente de curto-circuito de 122,8 mA para 1000 W/m<sup>2</sup> de

irradiância. Esta corrente é medida através de um resistor de  $0,2505 \Omega$ , representado por R1 na Figura 1a. Com estes dados obtém-se a constante de  $30,761 \text{ mV}$  para  $1000 \text{ W/m}^2$  de irradiância.

### Conexões de hardware

O circuito de entrada de *trigger* do multímetro 34410A está representado na Figura 2. O multímetro 3458A possui circuito de entrada de *trigger* similar. A conexão do sinal da porta paralela com a entrada de *trigger* externo é realizada por meio de um transistor NPN utilizado para acoplar o sinal. Para isto foi montado o circuito apresentado na Figura 3. Neste circuito além do acoplamento dos sinais de *trigger* há o circuito de um relé de isolamento que foi instalado para manter o módulo em circuito aberto enquanto não for aplicada a varredura de tensão.

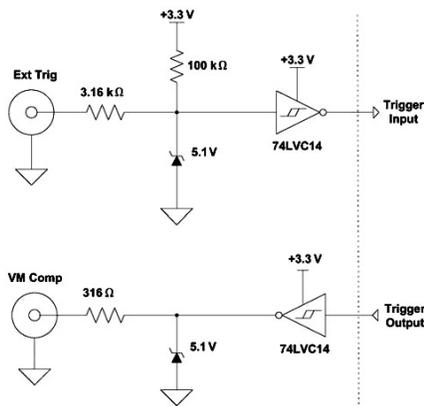


Figura 2 – Circuito de entrada de *trigger* (acima) e circuito de saída de *trigger* do multímetro Agilent 34410A. Fonte: Agilent Technologies (2007).

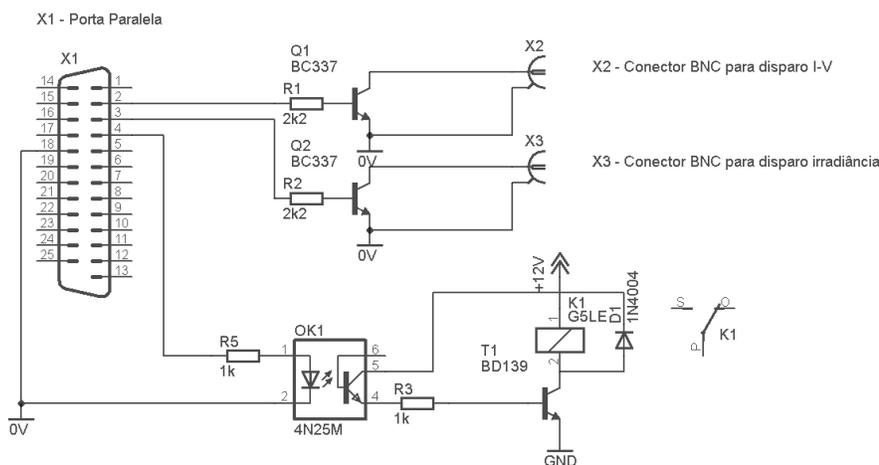


Figura 3 – Circuito para acoplamento do sinal de *trigger* e acionamento do relé de isolamento.

### Geração de pulsos de disparo na porta paralela

Os sistemas operacionais Windows (NT, 2000, XP) não foram projetados para aplicações de tempo real ou aplicações de tempo críticas, sendo este fato um limitador na utilização destes sistemas operacionais em instrumentação para aquisição de dados com tempo crítico. Entretanto os requisitos do mercado e a facilidade de seu uso requerem a aplicação do Windows em programas de aquisição de dados e controle de instrumentos de medida, principalmente pela facilidade na interface com o usuário (Marcu M, *et al* 2005). O sistema de aquisição de curvas I-V proposto tem a necessidade de obter precisão no tempo de duração dos pulsos de disparo e simultaneidade das medidas. O disparo dos multímetros por software através do barramento GPIB, embora fosse viável tecnicamente, foi descartado pela característica multitarefa do Windows. Os tempos e atrasos no processamento, o tempo de envio e processamento do sinal de disparo através de uma interface USB – GBIP poderiam introduzir atrasos não controlados comprometendo a simultaneidade do disparo dos multímetros. O disparo também poderia ser comandado pelo relógio interno dos multímetros, porém o fato da utilização de multímetros de modelos diferentes poderia deixar dúvidas em relação aos tempos de processamento.

A porta paralela do computador pode desempenhar a função de disparo por hardware, desde que fosse possível controlar a duração dos pulsos com precisão de microssegundos. A opção pela porta paralela do PC deve-se ao fato de não ser necessário

nenhum *hardware* adicional para o disparo dos multímetros, bastando um transistor NPN para acoplar o sinal. Em sistemas operacionais como MS-DOS é possível utilizar o próprio clock da CPU para a geração dos atrasos (*delays*), utilizando laços vazios de instruções. Com esta solução é possível ao programador controlar as instruções executadas pelo processador e medir o tempo de execução. Em sistemas operacionais multitarefas, laços vazios não atendem esta necessidade, pois o tempo de execução de laços vazios é variável, dependendo da carga de processamento a que o computador está submetido e da velocidade do *clock* da CPU.

A solução encontrada para conseguir a precisão de tempo necessária foi o uso dos contadores de performance presentes nos microprocessadores. A maneira mais fácil de acessar estes contadores é através de funções API (*Application Programming Interface*), ou Interface de Programação de Aplicativos. As funções API são um conjunto de rotinas e padrões estabelecidos por um *software* para utilização de suas funcionalidades por programas aplicativos de alto nível que não estão envolvidos em detalhes da implementação do software. O Visual Basic é uma linguagem de programação de alto nível, não tendo funções de acesso direto ao *hardware*, porém o uso das funções API permitem o acesso.

As funções que permitiram a obtenção de pulsos com a precisão necessária foram as funções API “QueryPerformanceCounter( )” e “QueryPerformanceFrequency( )”. A função “QueryPerformanceCounter( )” retorna o valor de um contador incrementado com uma frequência fixa e específica desde a inicialização do computador. Para a obtenção do tempo é utilizada a função “QueryPerformanceFrequency( )”. Esta função retorna a frequência do contador de performance disponível no computador. Desta maneira a precisão na determinação do tempo será independente do processador utilizado e da carga de processamento. No computador utilizado no sistema de aquisição montado, a frequência do contador é de 3574595 Hz, resultando num período de 0,279  $\mu$ s. O erro máximo encontrado na duração dos pulsos de *trigger* foi de 2  $\mu$ s em relação ao valor programado, resultado do incremento do contador de performance que é de 0,279  $\mu$ s acrescido do tempo de processamento das instruções pelo programa. Para a aplicação destinada neste sistema, esta diferença não altera os resultados do sincronismo entre a rampa de varredura de tensão gerada pela fonte e as medidas dos pares I-V.

### Programa de gerenciamento do sistema

O programa de gerenciamento desenvolvido possui basicamente duas telas de interface com o usuário. Na tela de configuração (Figura 7a) são inseridos os parâmetros para definir o valor inicial e final da rampa de varredura de tensão. Estes valores são transmitidos para a fonte KEPCO através do barramento GPIB deixando-a preparada para a execução a partir de um comando futuro. Nesta tela de configuração também são introduzidos os valores das constantes para a medida de corrente e irradiância. Para a medida de corrente deve-se inserir a constante do resistor *shunt* na unidade [mV/A]. Este valor será utilizado no programa para converter os valores de tensão medidos para a corrente correspondente. A constante para medida de irradiância é expressa em [mV/1000 W/m<sup>2</sup>]. Esta unidade foi escolhida para possibilitar o uso de qualquer sensor ou instrumento de medida de irradiância solar com saída em tensão. Para medir a corrente de curto-circuito da célula de referência um resistor *shunt* é conectado e a relação de tensão deve ser determinada previamente. Para completar, configura-se o número total de medidas que serão tomadas e o tempo de cada medida em microssegundos. O tempo mínimo de cada medida foi estabelecido em 50  $\mu$ s e o número total de medidas foi limitado em 2000.

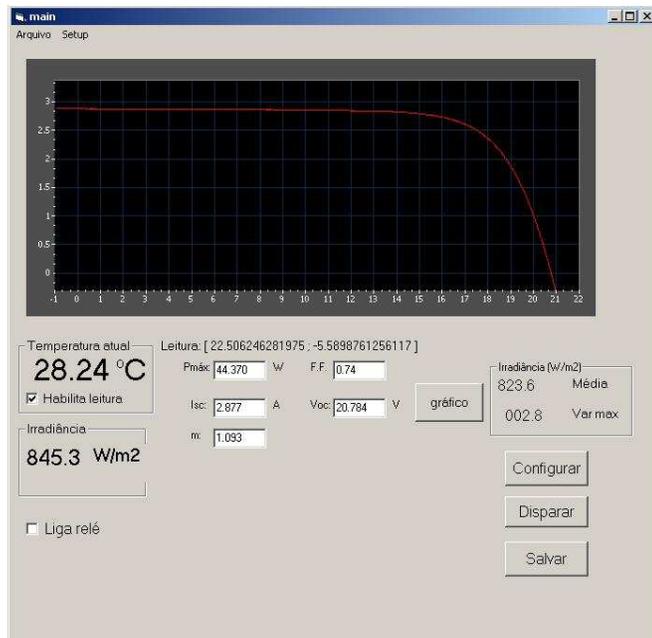
A tela principal do programa (Figura 7b) possui um botão de configuração que prepara os equipamentos para a medida, enviando os comandos de configuração. O botão “Disparar” inicia as seguintes ações no sistema:

1. O circuito elétrico é fechado por meio de um relé comandado pela porta paralela;
2. A temperatura inicial do módulo é medida;
3. É enviado o comando para a fonte iniciar a rampa de varredura;
4. Os pulsos de disparo são enviados para os multímetros pela porta paralela do computador;
5. Cada medida é armazenada na memória dos multímetros;
6. Após o envio do número de pulsos de *trigger* programado é tomada outra medida de temperatura;
7. O circuito é interrompido pelo relé, deixando o módulo em circuito aberto;
8. As medidas são transferidas do multímetro para o computador e armazenadas em vetores;
9. Os multímetros são reinicializados;
10. A curva I-V medida pode ser visualizada ao pressionar o botão gráfico;
11. É possível salvar as medidas em um arquivo de dados, pressionando o botão salvar.

Para facilitar o monitoramento enquanto não está sendo feita uma varredura de tensão, há dois campos que informam a irradiância solar instantânea e a temperatura do módulo com atualização a cada 0,5 s se a caixa de seleção correspondente estiver habilitada. A incerteza da medida da temperatura absoluta é de 0,26 °C, porém o campo possui resolução de 0,01 °C para verificação das variações pelo usuário do sistema. O arquivo gerado com extensão .dat é salvo em colunas separadas por vírgulas. As colunas possuem os seguintes dados: número da medida, medida de tensão, medida de corrente, e medida de irradiância solar. A temperatura inicial e temperatura final do módulo também são registradas no arquivo. Além destes dados, são gravados o horário e data da medida. Este arquivo pode ser aberto facilmente em planilhas eletrônicas para geração de gráficos e processamento onde é possível efetuar o cálculo dos parâmetros fotovoltaicos desejados, fazer a translação da curva para outras condições e gerar relatórios de ensaios.



(a)



(b)

Figura 7 (a) - Tela de configuração do programa de gerenciamento. (b) – Tela principal do programa de gerenciamento.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sistema desenvolvido foi utilizado para realizar ensaios de diversos módulos fotovoltaicos e pequenos arranjos montados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. A Figura 8a apresenta a curva característica I-V de um módulo com 36 células modelo HG-135P medido nas condições padronizadas de teste sob iluminação natural. Os parâmetros informados são potência máxima ( $P_m$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), tensão do ponto de máxima potência ( $V_{mp}$ ) e corrente do ponto de máxima potência ( $I_{mp}$ ). O catálogo do fabricante informa uma tolerância de 5 % para o valor de potência informado. Há na literatura trabalhos que comparam os dados dos módulos fotovoltaicos informados pelo fabricante e dados medidos por laboratórios independentes, como apresentado por Hecktheuer (2001) e Lorenzo (2002). Estes trabalhos mostram uma tendência dos parâmetros medidos apresentarem valores inferiores aos informados no catálogo, além da variação experimental esperada. O objetivo não é fazer esta análise neste trabalho, mas somente apresentar dados ilustrativos do funcionamento e confiabilidade do sistema de medida desenvolvido. Na Figura 8b há a curva característica e curva de potência de um módulo Kyocera KC85T cujas condições de medida foram  $G = 1013 \text{ W/m}^2$  e  $T = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para fazer comparações, esta curva característica foi transladada para as condições padronizadas de teste utilizando o método descrito por Bühler (2008). Os parâmetros medidos e informados pelo fabricante destes dois módulos são apresentados na Tabela 1.

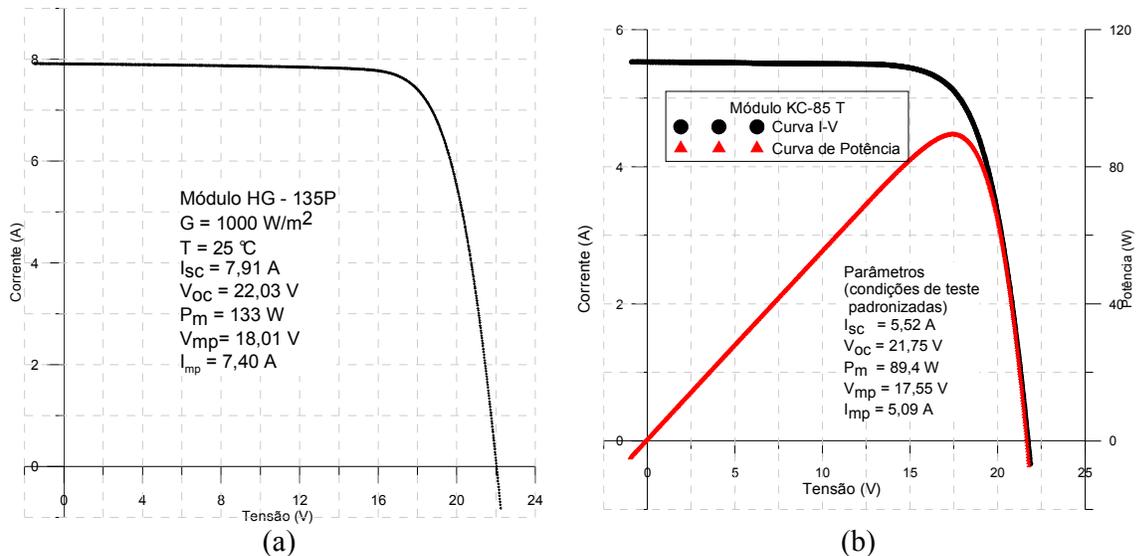


Figura 8 (a) Curva característica I-V do módulo HG – 135P com 1000 pontos medidos. (b) – Curva característica I-V e curva de potência do módulo Kyocera KC85T.

Parâmetro	Valor medido		Valor catálogo fabricante		Diferença percentual	
	HG135P	KC85T	HG135P	KC85T	HG135P	KC85T
$P_m$	133 W	89 W	135 W	87 W	-1,5 %	2,3 %
$I_{sc}$	7,91 A	5,52 A	8,68 A	5,34 A	-8,9 %	3,3 %
$V_{oc}$	22,03 V	21,75 V	21,6 V	21,7 V	2,0 %	0,2 %
$V_{mp}$	18,01 V	17,55 V	17,8 V	17,4 V	1,2 %	0,8 %
$I_{mp}$	7,40 A	5,09 A	7,58 A	5,02 A	-2,4 %	1,4 %

Tabela 1 – Parâmetros medidos e informados pelo fabricante Módulo HG – 135 P e KC 85T

O sistema permite medir pequenos arranjos fotovoltaicos dentro dos limites da fonte de polarização. Estas medidas podem ser utilizadas para validação de modelos de simulação e análise em programas de pós-processamento de dados. A Figura 9 mostra a curva característica e a curva de potência de um arranjo com quatro módulos da marca Kyocera modelo KC50T associados em série, em condições reais de operação. Este módulo possui os seguintes parâmetros nominais:  $P_m = 54$  W,  $V_{pm} = 17,4$  V,  $V_{oc} = 21,7$  V e  $I_{sc} = 3,31$  A. Neste ensaio foram medidos 1000 pontos em 200 ms.

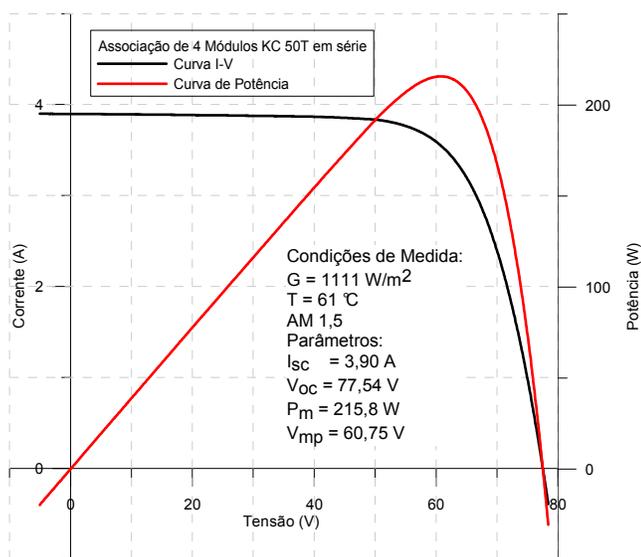


Figura 9 – Curva característica I-V e curva de potência de uma associação em série de 4 módulos modelo KC50T.

A principal incerteza na determinação das características fotoelétricas é devido à medida da irradiância solar, pois a célula de referência é calibrada com incerteza mínima de 2%. A determinação da temperatura do módulo tem incerteza de  $\pm 0,26^\circ\text{C}$ , valor reduzido devido ao fato de utilizar um sensor Pt100. Para a determinação da corrente de curto-circuito e da potência máxima, a incerteza é de aproximadamente 2,2%. No cálculo da incerteza da potência está incluída a incerteza da medida da corrente, a incerteza da medida de temperatura, a incerteza devido à irradiância solar e a incerteza devido à tensão medida. A incerteza na medida da corrente é aproximadamente 0,5%, principalmente devido à classe do resistor *shunt* utilizado. A determinação da tensão de circuito aberto tem incerteza aproximada de 0,1%, incluindo a medida de todas as variáveis envolvidas (instrumentos de medida, temperatura e irradiância solar).

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema para traçar curvas características I-V de módulos fotovoltaicos. O método utilizado para disparo dos multímetros através da entrada de *trigger* externo mostrou-se eficiente pela garantia da simultaneidade do *trigger* além de possibilitar a independência e integração de diferentes multímetros no sistema. A fonte programável torna a configuração dos parâmetros da rampa de varredura de tensão flexível, possibilitando estudos futuros com diferentes tempos e formas de onda. O programa de gerenciamento desenvolvido em Visual Basic permite flexibilidade e agilidade no tratamento e transferência dos arquivos com os dados medidos. O sistema tem sido utilizado para caracterizar diversos módulos fotovoltaicos e pequenos arranjos montados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. A análise de incertezas demonstra que a principal fonte de incerteza na determinação dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos é na medida da irradiância solar, pois a incerteza na determinação da corrente de curto-circuito e da potência máxima do módulo fotovoltaico foi ligeiramente superior a 2%, que é praticamente a incerteza na calibração da célula de referência.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991. “NBR12136 Módulos fotovoltaicos – Determinação de características fotoelétricas”, Rio de Janeiro.
- Agilent Technologies, 2007 “Agilent 34410A/11A User’s Guide”, Edition 4.
- Bühler, A. J., 2008. “Comparação Entre Diferentes Métodos de Translação de Curvas I-V de Módulos Fotovoltaicos” II CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis, 18 a 21 de Novembro de 2008
- Durisch, W., Urban, J., Smestad, G. 1996. “Characterisation of solar cells and modules under actual operating conditions” Renewable Energy Volume 8, Issues 1-4, May-August 1996, Pages 359-366 Special Issue World Renewable Energy Congress Renewable Energy, Energy Efficiency and the Environment.
- Durisch, W., Tille, D., Worz, A., Plapp, W., 2000 Characterisation of photovoltaic generators” Applied Energy 65 pp. 273-284
- Hecktheuer, L. A., Krenzinger, A., Prieb, C. W. M., 2001. “Rated versus Measured Power of PV Modules Used in Brazilian Rural Properties Electrification”, Seventeenth European Solar Energy Conference, Munich, Germany. October 2001 volume II, pp. 2083 -2086
- Hecktheuer, L. A.; Krenzinger, A.; Prieb, C. W. M..2002. Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis. J. Braz. Soc. Mech. Sci. , Rio de Janeiro, v.24, n.1, Mar.2002.
- Koster, D., Minette, F., O’Nagy, O., 2006 “Cell Technology Independent I-V Curve Measurement of PV Modules Under Real Operating Conditions” 21st European Photovoltaic Conference in Dresden, p. 2528
- Lorenzo, E., 2002. “La energia que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y “el cascabel del gato”. Era Solar. Madrid: n° 107, p. 22-28, Marzo/Abril 2002
- Muñoz, J., Lorenzo, E., 2006 “Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays” Solar Energy 80 (2006) 1489–1497.
- Marcu, M., Moldovan, H., Zilahi M, Tomescu V, Ionas Mihai, 2005 “Windows XP Issues for Real-Time Temperature Monitoring” IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference Ottawa, Canada, 17-19 May 2005
- Prieb, C. W. M., 2002. “Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos”. Dissertação de mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS.

**ABSTRACT:** Photovoltaic cells and modules have a characteristic electrical behavior, and the measuring of the I-V curve (current versus voltage) is essential for evaluating the device’s quality and performance. This paper presents a system designed to trace I-V curves of photovoltaic modules. It is composed by a four quadrant power supply for polarizing the module, multimeters to measure simultaneously current and voltage, a multimeter to measure solar irradiance by means of a reference cell and a multimeter to measure the temperature of the module using a Pt100. The whole system is managed by a computer program which sends commands to the equipments through a USB-GPIB interface. The system limits are  $\pm 100$  V and  $\pm 10$  A, and it can acquire 2000 data points. This system is being used to characterize photovoltaic modules in Solar Energy Laboratory – UFRGS, Brazil.

**Keywords:** Solar Energy, photovoltaic module, characteristic I-V curve