

# Desenvolvimento de um traçador de curvas $V \times I$ para painéis fotovoltaicos<sup>1</sup>

**Bernardo Rogowski dos Santos**  
Acadêmico, Sistemas Eletrônicos, IF-SC  
bernardodico@yahoo.com.br

**Clóvis Antônio Petry**  
Doutor, Sistemas Eletrônicos, IF-SC  
petry@ifsc.edu.br

**Charles Borges de Lima**  
Doutor, Sistemas Eletrônicos, IF-SC  
cborges@ifsc.edu.br

**Resumo:** Neste trabalho se apresenta um traçador de curvas para painéis fotovoltaicos, com o qual é possível determinar o modelo elétrico equivalente do painel a partir das medições realizadas com o circuito proposto, que possui baixo custo sendo de fácil implementação. O traçador proposto tem capacidade de obter as características elétricas de painéis fotovoltaicos com corrente máxima de 5 A e tensão de circuito aberto de 30 V. O sistema projetado é linear em contraste com modelos apresentados na literatura que são chaveados. Pode ser utilizado no ensino em escolas e institutos de pesquisa e na indústria, substituindo os equipamentos importados, que têm preços elevados.

**Palavras-Chave:** Painel fotovoltaico. Curva característica. Ponto de máxima potência.

## 1 Introdução

A energia elétrica processada eletronicamente é utilizada atualmente nos mais diversos setores, quais sejam: industrialmente no acionamento de cargas, controle de processos, co-geração de energia; no comércio em geral; na indústria de entretenimento e nas residências ou individualmente, através de eletroeletrônicos que utilizam intensamente a eletrônica para processamento de energia, sinais e dados.

Neste contexto, o processamento de energia, visando à utilização de energias alternativas, mais limpas que a hidrelétrica, como por exemplo: eólica, células de hidrogênio, fotovoltaica, entre outras; tem crescido e evoluído em países desenvolvidos e em desenvolvimento (SIMÕES, 2007).

Publicações relatando pesquisas recentes, conforme as referências bibliográficas mostram a possibilidade de estudar e aplicar a tecnologia de co-geração e processamento de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos

imediatamente pela indústria nacional (GONÇALVES, 2006) e (SÁ JUNIOR, 2004).

Em virtude de seu baixo rendimento e ainda alto custo, é de suma importância a caracterização dos painéis fotovoltaicos para modelagem elétrica e construção de um circuito auxiliar para extração da máxima potência nas condições climáticas onde será utilizado.

Para tanto, em alguns casos o próprio seguidor de máxima potência tem a função de obter as características elétricas do painel, como ocorre em (ITAKO, 2005), que utiliza um conversor Boost chaveado em alta frequência e controlado por um processador de sinais digital (DSP). Em (MUTOH, 2002) e (SUNTIO, 2005) são apresentados sistemas mais complexos e que envolvem a utilização de conversores chaveados, o que implica em aumento de volume e de preço pela utilização de indutores e filtros capacitivos.

Neste trabalho se propõe o estudo de um traçador de curvas de corrente por tensão ( $I \times V$ ) de painéis fotovoltaicos de baixa potência, com correntes de até 5 A. Este traçador permite obter a curva característica de painéis fotovoltaicos de forma automática com a utilização de um microcontrolador

<sup>1</sup> RTC, Florianópolis, SC, v.02, nº 01, p.17-23, 2010

( $\mu\text{C}$ ), facilitando o processo de aquisição de dados.

Além disso, com o equipamento proposto obtém-se maior mobilidade para medição da tensão e corrente elétrica de painéis fotovoltaicos, obtendo-se graficamente a curva de resposta do painel ( $I \times V$ ). Assim, despende-se menos tempo, obtém-se maior precisão e com menos chances de erros, pois no trabalho manual, o processo torna-se mais complicado e muitas vezes cansativo, se aplicado repetidas vezes, levando a erros de observação humana que normalmente ocorrem em processos repetitivos e exaustivos.

É importante salientar que existem analisadores de curvas fotovoltaicas no mercado. No entanto, estes equipamentos são importados e possuem alto custo de aquisição para instituições de pesquisa e ensino. Deste modo se propõe o desenvolvimento de um traçador de curvas ( $I \times V$ ) e ( $P \times V$ ) de baixo custo, fácil implementação e manutenção, com viabilidade técnica e econômica para ser desenvolvido por grupos de pesquisa e empresas nacionais da área de energias alternativas.

Em síntese, o projeto ora apresentado visa à elaboração de um circuito capaz de medir características elétricas de tensão e corrente de painéis fotovoltaicos, permitindo o traçado da curva típica do painel individual ou de arranjos fotovoltaicos nas condições específicas do ensaio e do ambiente de instalação.

## 2 Seguimento da máxima potência

A característica de saída de um painel fotovoltaico é ilustrada na figura 1. Pode-se verificar que para um determinado nível de insolação tem-se a curva 1, e nesta curva existe um ponto de máxima potência (MPP – maximum power point) que pode ser extraída do painel. No entanto, para outro nível de insolação, a característica de saída será dada pela curva 2, e aí tem-se um outro ponto de máxima potência fornecida pelo painel (Coelho, 2008).

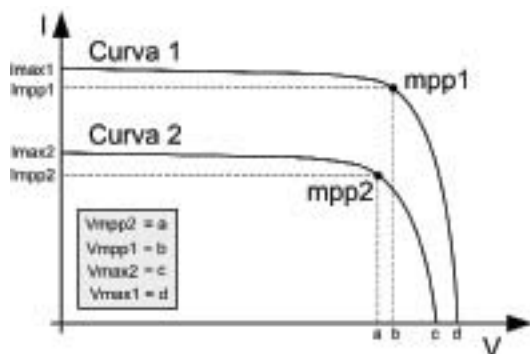


Figura 1 - Característica  $I \times V$  de um painel fotovoltaico.

Observa-se nas curvas da figura 1 que é necessário determinar a corrente a ser solicitada do painel conforme o nível de insolação, e isto é realizado implementando-se um seguidor de máxima potência (MPPT – maximum power point tracker).

Segundo (RAMOS, 2006), o método da curva da corrente em função da tensão nas condições padrões de teste, continua sendo o mais utilizado como referência para avaliação do comportamento elétrico de geradores fotovoltaicos. A curva permite a comparação qualitativa entre geradores, pois se espera que um gerador de mesma tecnologia que é melhor nesses testes condicionais seja melhor também nas mesmas condições em campo.

A condição padrão para testes adotados pelas instituições que emitem as normas são as mesmas, sendo a condição de irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura das células de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e espectro solar de 1,5.

Conforme mostra (PRIEB, 2002), a norma de caracterização utilizada em conversores fotovoltaicos de silício cristalino é a NBR12136/MB3477 (ABNT, 1991). Esta norma é utilizada para a determinação de características fotoelétricas, onde são prescritos os métodos e procedimentos aplicáveis para determinar a curva característica quando expostos à luz solar ou sob iluminação simulada.

Além disso, para que seja possível implementar o MPPT, é necessário realizar a modelagem dos painéis fotovoltaicos, para que se tenha um modelo equivalente e com este modelo possa ser projetado o circuito eletrônico que irá atuar como MPPT (SUNLAB, 2007).

Assim, a modelagem do painel fotovoltaico se dá pela obtenção de suas características elétricas e a partir daí pelo cálculo dos resistores  $R_s$  e  $R_p$ , onde estes podem ser obtidos por:

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad R_p = \frac{V_{oc}}{I_{cc} - I_{mpp}}$$

Onde  $R_s$  representa a queda de tensão e  $R_p$  a corrente de fuga do painel para uma dada condição de insolação (Coelho, 2008).

Um modelo simples para um painel fotovoltaico é mostrado na figura 2, onde a fonte de corrente  $i_{ph}$  representa a corrente de curto circuito do painel ( $I_{cc}$ ) e  $V_D$  a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ).

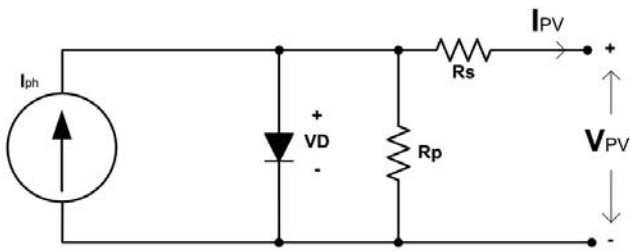


Figura 2 - Modelo elétrico do painel fotovoltaico (Coelho, 2008).

Conforme explanado anteriormente, a obtenção dos parâmetros do painel fotovoltaico é importante para sua caracterização e posterior operação no ponto de máxima potência. A obtenção do modelo da figura 2 pode ser realizada por um processo manual sendo caracterizado por se medir a tensão e corrente do painel alterando a carga do mesmo, como apresentado na figura 3.

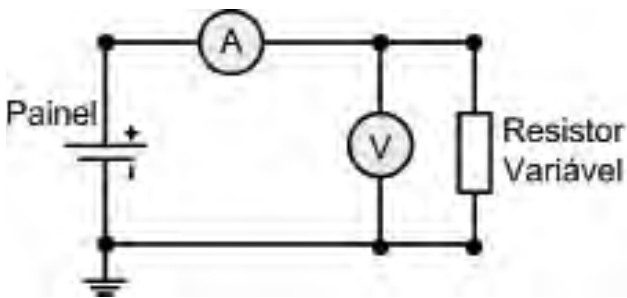


Figura 3 - Modelo teórico para extrair dados de tensão e corrente do painel.

O modelo teórico da figura 3 foi utilizado para a concepção do traçador proposto neste trabalho, onde a função do resistor variável é realizada por um circuito eletrônico linear e a medição de tensão e corrente é feita com auxílio de um microcontrolador.

### 3 Diagrama de blocos do traçador

O traçador de curvas corrente versus tensão ( $I \times V$ ) para painéis fotovoltaicos é constituído por diversos estágios, como está mostrado na figura 4. O elemento central é um microcontrolador de onde se faz o controle das variáveis elétricas e enviam-se ao computador os dados adquiridos para obter graficamente o comportamento do painel fotovoltaico com as variações de carga e também determinar a região de máxima potência.

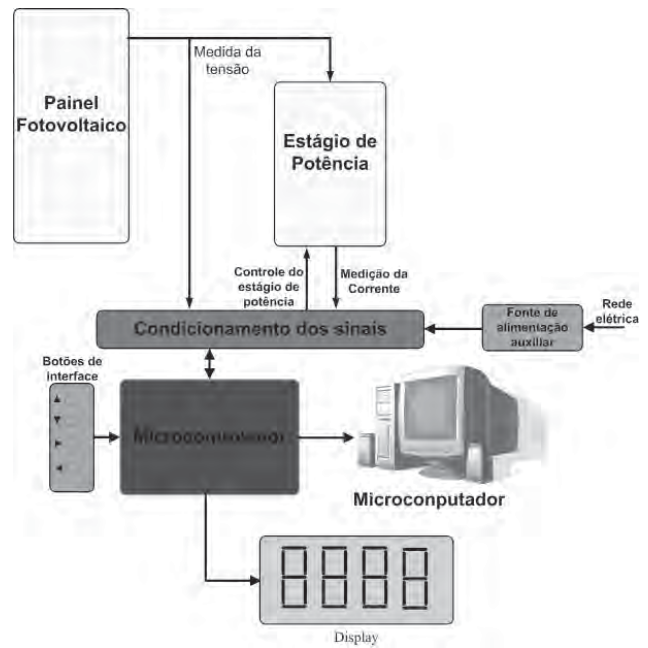


Figura 4 - Diagrama de blocos do sistema.

Em síntese os blocos do diagrama da figura 4 são:

- Painel fotovoltaico: elemento que será caracterizado pelo sistema, podendo ser um painel individual ou um arranjo de painéis, com tensão e corrente limites de 30 V e 5 A;
- Estágio de potência: circuito responsável por provocar a variação de corrente no painel fotovoltaico, comportando-se como uma carga variável;
- Fonte auxiliar: circuito responsável por fornecer as tensões de alimentação aos diversos estágios do sistema;
- Condicionamento de sinais – circuitos eletrônicos para condicionar as variáveis medidas, quais sejam: tensão e corrente do painel;
- Microcontrolador: sistema microcontrolado responsável pelo gerenciamento dos diversos elementos do sistema, interfaceamento com o usuário e comunicação com o microcomputador;
- Microcomputador: elemento responsável por receber os dados medidos pelo sistema e então traçar as curvas característica ( $I \times V$ ) dos painéis ensaiados, além de calcular os principais parâmetros do painel.

O algoritmo simplificado para traçado da curva corrente por tensão de painéis fotovoltaicos, executado pelo microcontrolador, é:

1. Definir a tensão de referência ( $V_{ref}$ ), arbitrada em 5 V;
2. Realizar a leitura da corrente, definindo esta

como a corrente máxima ou corrente de curto-circuito;

3. Iniciar a varredura da curva do painel com  $V_{ref}$  igual a 0 V, incrementando gradativamente  $V_{ref}$ , medindo corrente e tensão do painel e armazenando os valores na memória até que a corrente alcance o valor mensurado como máximo;
4. Calcular as potências para cada ponto de tensão e corrente lidas;
5. Identificar as principais características de tensão, corrente e potência;
6. Indicar a finalização das medições e enviar os principais valores ao display LCD e ao microcomputador.

#### 4 Estágio de potência

Este estágio é o responsável por impor a corrente elétrica do painel fotovoltaico através da configuração FCCT (Fonte de corrente controlada por tensão), onde esta tensão de controle, arbitrada de  $V_{ref}$ , é inserida na entrada não inversora do amplificador operacional (AMPOP), de modo que a corrente do painel varie desde circuito aberto a curto-circuito com a variação controlada de  $V_{ref}$ .

A chave seletora apresentada na figura 5 foi adicionada ao circuito para alterar a medição de corrente total entre painéis, que para correntes baixas, o sinal PWM se torna impreciso nas aquisições a serem realizadas, então, para melhorar as medidas, acrescentou-se esta chave para troca e seleção de uma resistência 10 vezes maior. A posição 1 é escolhida para medição de correntes de 50 mA a 500 mA e a posição 2 para medição de corrente de 0,5 A a 5 A.

A resistência série é escolhida para que a tensão final do painel seja a menor possível, aproximando-se o possível da operação de curto-circuito.

O resistor (carga), representado por R na figura 5, define a corrente elétrica que atravessa o ramo do emissor do transistor de potência, desta forma, com a tensão aplicada ao resistor, pode-se definir a corrente que o atravessará. Se o resistor for de  $1 \Omega$ , a corrente será igual à tensão, pois seguindo a equação da Lei de Ohm onde “”, esta pode ser igualada a “. Então, de fato, a tensão aplicada no resistor será a própria corrente que atravessa o ramo de R.

Na entrada não inversora do amplificador operacional, uma tensão qualquer é inserida, e através do curto-virtual (resistência muito alta) intrínseco entre os terminais inversor e não inversor deste elemento, a tensão inserida em  $V_{ref}$  torna-se a tensão que será imposta no resistor, assim controlando

a corrente do resistor (carga) e conseqüentemente a corrente do painel fotovoltaico.

Desta forma, pode-se obter um espectro de coordenadas ( $I \times V$ ) de um painel fotovoltaico; desde os extremos, circuito em aberto (sem carga) até corrente de curto-circuito (resistência mínima).

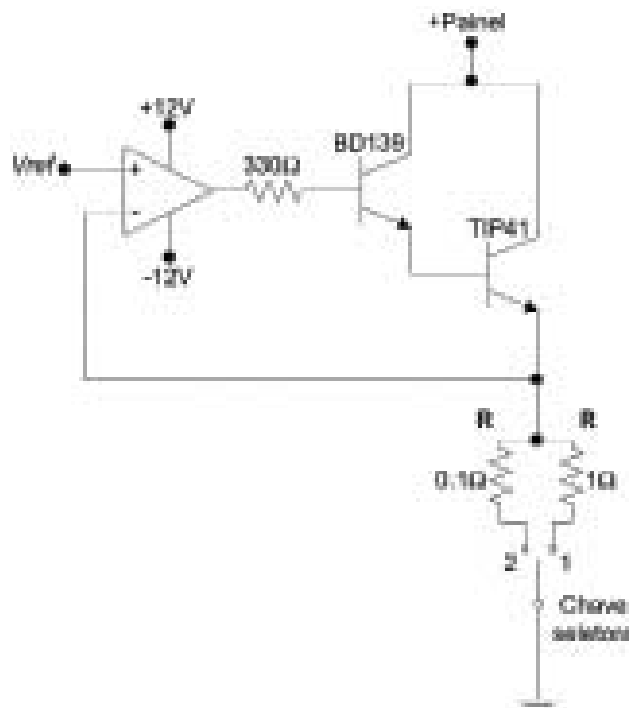


Figura 5 - Estágio de potência.

#### 5 Estágio de comando, controle, leitura e comunicação

Através de um microcontrolador é gerado um sinal modulado por largura de pulsos (PWM), que, em conjunto com um filtro passa-baixa, gera uma tensão média na entrada do pino do amplificador operacional. Um divisor resistivo foi acrescentado para atenuar esta tensão de referência ( $V_{ref}$ ), pois quanto menor o valor, menor será a tensão final do painel chegando assim mais próximo da operação a curto-circuito.. O circuito do microcontrolador com a interface do usuário e do display é mostrado na figura 6. Nota-se a presença de três botões, que tem as seguintes funções:

- Leitura do painel* - com a função de disparar o processo de medição de tensão e corrente do painel (varredura);
- Envio dos dados* - tendo como função iniciar a comunicação e envio dos dados para o microcomputador;
- Chave seletora da potência* - enquadra a potência máxima do painel na faixa do medidor.

O display tem a função de informar ao usuário os

valores que estão sendo medidos; como a função selecionada, o status de comunicação, principais valores medidos, entre outras funcionalidades.

Utiliza-se uma comunicação via cabo para a comunicação serial com o computador, sendo que no lado do microcontrolador é utilizado um circuito adaptador para o padrão lógico RS232. Os dados são enviados ao software MatLab onde é construída a curva característica sendo apresentada em forma de figura no microcomputador.

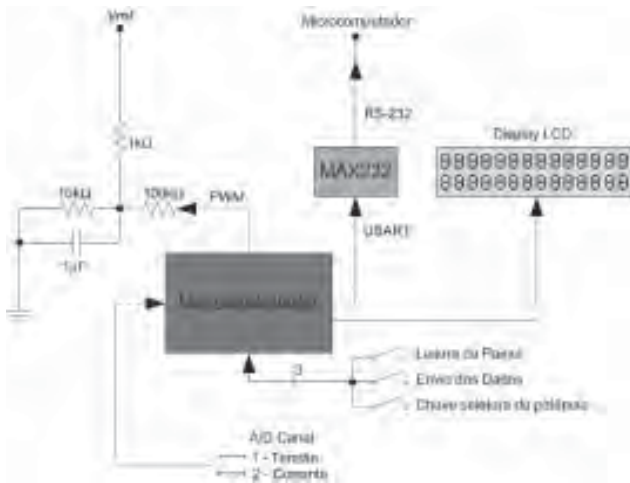


Figura 6 - Configurações de entrada e saída do  $\mu$ C.

Para a realização da leitura da tensão se definiu um valor de 30 V de tensão máxima para os painéis, condicionando o sinal para leitura a uma faixa aceitável pelo conversor A/D, no caso, 5 V.

Um sensor de efeito hall foi utilizado para medir a corrente elétrica do painel que atravessa o ramo do emissor do transistor de potência e esta foi adquirida no segundo canal do A/D. A chave seletora é operada em conjunto com a chave seletora do resistor shunt (R), assim é possível condicionar a tensão obtida na entrada do microcontrolador para um valor adequado à faixa de corrente que está sendo utilizada. A figura 7 mostra o circuito elétrico equivalente para medição de corrente e tensão.

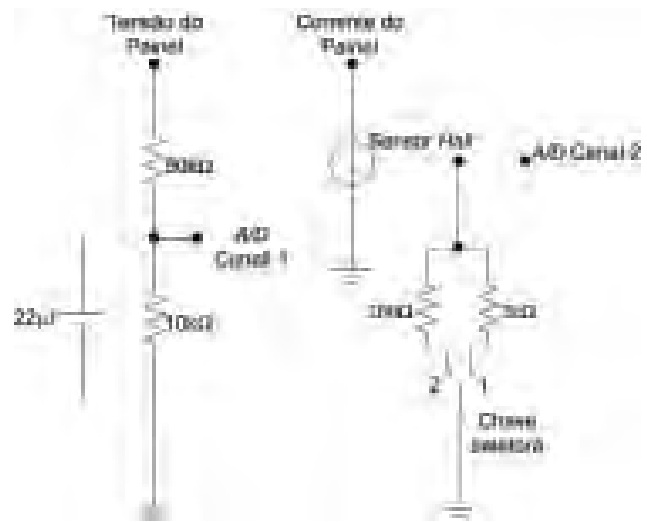


Figura 7 - Estágio de leitura da tensão e da corrente do painel.

## 6 Resultados experimentais

O circuito desenvolvido está em fase de protótipo, visando à realização dos testes com diferentes modelos de painéis e a comprovação de seu correto funcionamento.

O traçador de curvas implementado dispense 10 segundos por ensaio, sendo que neste intervalo de tempo as variações de temperatura e irradiância foram consideradas constantes, desconsiderando-se o erro por variações ocorridas destas grandezas. A condição de teste foi realizada ao ar livre em dia ensolarado sem nuvens, visando menor variação luminosa e maior aproveitamento da energia solar.

Para a construção da curva característica, utilizou-se da ferramenta computacional MatLab que recebe os valores enviados pela comunicação serial, apresentando a seguir as curvas do ensaio.

O teste foi realizado com um módulo fotovoltaico que possui as seguintes características elétricas fornecidas pelo fabricante:

- Potência de pico: 5 W;
- Corrente de máxima potência: 0,282 A;
- Tensão de máxima potência: 17,74 V;
- Corrente de curto circuito: 0,31 A;
- Tensão de circuito aberto: 21,52 V.

O resultado experimental do sistema operando nas condições descritas acima é apresentado na figura 8 abaixo, onde se tem a curva da corrente em função da tensão. Nota-se que a curva obtida é similar a curva teórica mostrada na figura 1.

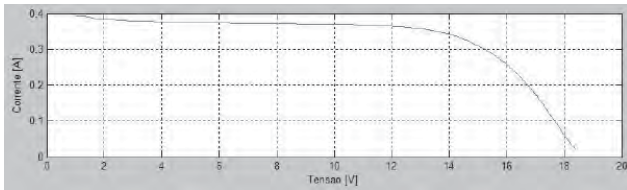


Figura 8 – Curva da corrente do módulo fotovoltaico obtida no ensaio realizado.

Para a potência, o resultado experimental é apresentado na figura 9, onde se verifica que a potência máxima ocorre para uma tensão um pouco superior a 14 V. Esta curva foi obtida pela multiplicação da tensão pela corrente mostradas na figura 8. A potência máxima de aproximadamente 5 W indica o ponto de máximo rendimento do painel fotovoltaico para as condições específicas do ensaio.

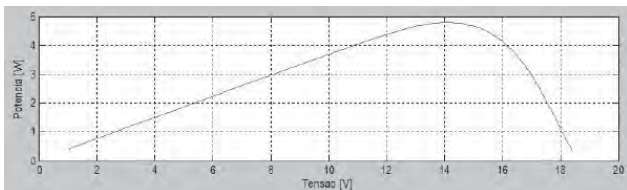


Figura 9 – Curva de potência do módulo fotovoltaico obtida no ensaio realizado.

Para validar os resultados obtidos com o traçador de curvas realizaram-se ensaios utilizando uma fonte que emula o comportamento de painéis fotovoltaicos (COELHO, 2008). Neste equipamento é possível programar as características elétricas de um painel e assim realizar os ensaios comparativos, conforme se mostra na figura 10, onde em azul se tem amostras lidas da corrente real e em vermelho a corrente do modelo teórico. Pelo resultado obtido, observa-se que a curva teórica e a curva real se sobrepõem, mostrando a fidelidade das medições realizadas com o sistema desenvolvido.

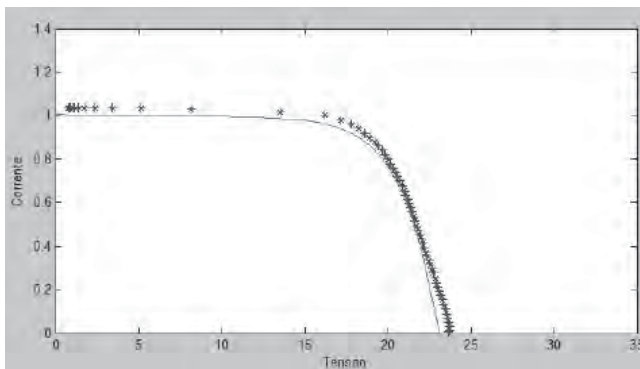


Figura 10 – Comparativo da curva da corrente teórica e da corrente medida pelo protótipo.

A figura 11 apresenta as respectivas curvas de potência teórica (em vermelho) e aquela obtida pela multiplicação da tensão pela corrente mensuradas pelo protótipo (em azul).

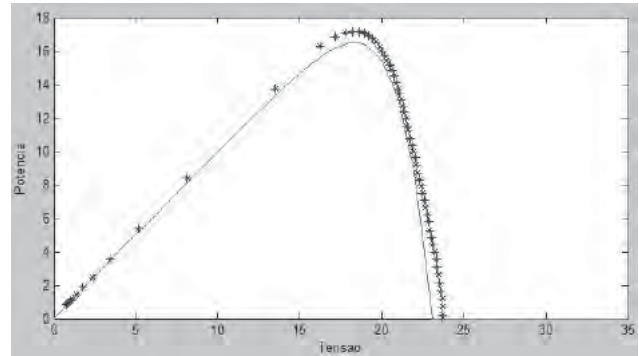


Figura 11 – Comparativo da curva da potência teórica e da potência calculada pelo protótipo.

Pode-se observar que a curva do módulo fotovoltaico não atinge a corrente de curto-circuito ou tensão igual a zero como apresenta a curva teórica, devido às quedas de tensão presentes nos circuitos de controle e de potência.

## 7 Considerações finais

Neste artigo apresentou-se um circuito para obtenção da curva corrente por tensão ( $I \times V$ ) e potência por tensão ( $P \times V$ ) para painéis fotovoltaicos. O circuito apresentado é tecnicamente simples, fácil de ser implementado e de baixo custo, podendo ser utilizado por instituições de ensino, pesquisa e empresas, substituindo os equipamentos importados e de alto custo.

Os resultados obtidos comparativamente com modelos teóricos gerados em equipamento adequado permitem concluir pela fidelidade das medições realizadas. Assim, o circuito proposto pode ser utilizado para obtenção da curva característica de células ou de arranjos fotovoltaicos e a partir da mesma os dados necessários para o modelo de circuito elétrico equivalente destes elementos.

O traçador proposto, pelos resultados obtidos nos ensaios realizados, possui viabilidade técnica, apesar de ainda haver erros de medição da imprecisão de alguns componentes passivos do protótipo, tornando o circuito aplicável a ensaio e caracterização de painéis fotovoltaicos com tensões e corrente de até 30 V e 5 A.

## 8 Referências

ABNT. Módulos Fotovoltaicos – Determinação de Características fotoelétricas – Método de Ensaio -

NBR12136/MB3477, 1991.

BÜHLER, Alexandre José. Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem simulação. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – UFRS. Porto Alegre, 2007.

COELHO, Roberto F. Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento da Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – USFC. Florianópolis, 2008.

GONÇALVES, Odiglei H. Contribuição ao estudo de dois estágios para aplicação em co-geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – USFC. Florianópolis, 2006.

ITAKO, Kazutaka; MORI, Takeaki. A New Current Sensorless MPPT Control Method for PV Generation Systems. EPE 2005. Dresden – Germany, 2005.

MUTOH, Nobuyoshi et al. Prediction-Data-Based Maximum-Power-Point-Tracking Method for Photovoltaic Power Generation Systems. 2002 IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference – PESC 2002, 2002.

PRIEB, César Wilhelm Massen. Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - UFRGS. Porto Alegre, 2002.

RAMOS, Cristina de Moura. Procedimentos para caracterização e qualificação de módulos fotovoltaicos. Dissertação de mestrado em Energia – USP. São Paulo, 2006.

SÁ JUNIOR, E. M. Sistema fotovoltaico para iluminação pública no período de alto pico de demanda da concessionária. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica – UFC. Fortaleza, 2004.

SIMÕES, Marcelo G.; FARRET, Feliz A. Integração de Fontes Alternativas de Energia – Mini-Curso - Tutorial. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2007. Blumenau - SC, 2007.

SUNLAB. Painéis Solares Fotovoltaicos. Disponível em: <<http://www.sunlab.com.br>> Acesso em: 10 de novembro de 2007.

SUNTIO, Teuvo et al. Issues on Solar-Generator Interfacing With Current-Fed MPP-Tracking Converters. IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 25, No. 9, September, 2010.