

PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UM TRAÇADOR DE CURVAS I-V PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Fernando Schuck de Oliveira – fernandoschuck@hotmail.com

César Wilhelm Massen Prieb – cprieb@ufrgs.br

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Energia Solar

4.2 Tecnologias e ensaios de módulos fotovoltaicos

Resumo. Este trabalho descreve o desenvolvimento e a construção do protótipo de um equipamento traçador de curvas I-V para módulos fotovoltaicos. Na sua construção foi empregada uma carga capacitiva como método de polarização do módulo fotovoltaico, sendo o chaveamento promovido por transistores MOSFETs. Uma placa ARDUINO, modelo DUE, foi utilizada na aquisição de dados e no controle lógico de operação do equipamento. O circuito foi dimensionado para ensaiar módulos cujos limites não ultrapassem 50 V para a tensão de circuito aberto e 10 A para a corrente de curto circuito. Para medir a corrente foi empregado um sensor de efeito hall e para a tensão um simples divisor resistivo. A irradiância foi medida a partir de uma célula de referência calibrada e a temperatura por um sensor LM35. Além disso, foi desenvolvido um software para operação do equipamento que permite visualizar a curva obtida e a transladada para outra condição de temperatura e irradiância, além de informar os parâmetros elétricos de interesse. Para avaliar o desempenho do protótipo foram realizados ensaios em um módulo de silício multicristalino com potência de 245 W_p, para o qual foram comparadas as curvas I-V obtidas com o protótipo e com um equipamento comercial. As curvas levantadas apresentaram boa concordância, resultando em diferenças inferiores a 1 % nos parâmetros elétricos de interesse, indicando que o protótipo apresenta razoável qualidade na caracterização de módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Traçador de Curvas I-V, Carga Capacitiva

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos houve crescimento na instalação de sistemas de geração distribuída no Brasil. Segundo dados da ANEEL (2017), atualmente existem mais de 178 MW de potência instalada neste tipo de geração, sendo que mais de 130 MW (73,8 %) correspondem à geração solar fotovoltaica. O Rio Grande do Sul ocupa o segundo lugar, em termos de potência instalada, com um total de mais de 22 MW sendo mais de 17 MW (79,8 %) em geração fotovoltaica. O gráfico da Fig. 1 mostra a evolução nos últimos quatro anos de sistemas de geração fotovoltaica que se enquadram na categoria de geração distribuída no Rio Grande do Sul.

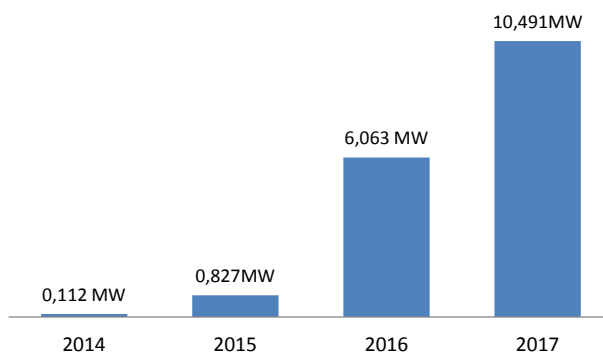


Figura 1 - Evolução de sistemas de geração fotovoltaica que se enquadram na categoria de geração distribuída no Rio Grande do Sul.

Considerando também sistemas fotovoltaicos de maior porte, a potência instalada no país passou de 24 MW em 2016 (EPE, 2017) para 360 MW em 2017 (ANEEL, 2017). Este crescimento de 1500 % se deve, principalmente, pela entrada em operação de uma usina de 28 MW e 11 de 30 MW entre junho e outubro deste ano.

Em um sistema de geração de energia elétrica a partir da tecnologia fotovoltaica, o módulo fotovoltaico é o responsável pela conversão da radiação solar diretamente em eletricidade. Através das características elétricas deste

componente é possível extrair informações que permitem avaliar sua qualidade e desempenho. O levantamento experimental da curva I - V (ou curva característica) permite realizar esta avaliação, pois a partir dela determinam-se a corrente de curto circuito I_{SC} , a tensão de circuito aberto V_{OC} e a máxima potência P_M , além do fator de forma FF e da eficiência de conversão η . Através do traçado desta curva também é possível identificar defeitos nas células que compõem o módulo e/ou no diodo de *bypass*. Estes possíveis defeitos apresentam-se como descontinuidades na tendência natural do traçado da curva característica.

Um instrumento que permita levantar a curva característica de um módulo fotovoltaico é uma ferramenta indispensável no diagnóstico de falhas em sistemas de geração distribuída ou mesmo em sistemas de maior porte que usam a tecnologia fotovoltaica, além disso, é um instrumento básico em pesquisas acadêmicas desta tecnologia. Neste trabalho descrevemos o desenvolvimento e a construção do protótipo de um traçador de curvas I - V para módulos fotovoltaicos. A sua construção exige baixo investimento financeiro, favorecendo seu uso em grupos de pesquisas que estão iniciando suas atividades no campo da energia solar fotovoltaica e ainda não dispõem de recursos para aquisição de um equipamento comercial.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO

O princípio básico para obter a curva I - V de um módulo fotovoltaico consiste em expô-lo à radiação solar (natural ou artificial) e medir pares de corrente e tensão enquanto é polarizado nos pontos de operação. Para polarizar um módulo e promover uma varredura dos pares I - V , partindo da região de I_{SC} e terminando na de V_{OC} , uma carga capacitiva pode ser empregada. Este método de polarização possui um custo baixo e apresenta resultados satisfatórios na caracterização de módulos e arranjos fotovoltaicos, sendo utilizado tanto na construção de protótipos, conforme descrito no trabalho de Muñoz e Lorenzo (2006); como em equipamentos comerciais.

O funcionamento de uma carga capacitiva aplicada na polarização de módulos fotovoltaicos se caracteriza na propriedade de um capacitor, quando descarregado, comportar-se como um curto circuito (tensão nula entre seus terminais). Ao ser acoplado ao capacitor nesta condição, o módulo fotovoltaico fica polarizado no seu ponto de curto circuito I_{SC} , neste instante o capacitor inicia o seu processo de carga até atingir a tensão de circuito aberto V_{OC} . Durante este transiente é realizado o registro dos pontos de operação do módulo fotovoltaico, assim permitindo obter sua curva característica. A Fig. 2 mostra as formas de onda da tensão e da corrente em um módulo durante o processo de carga do capacitor.

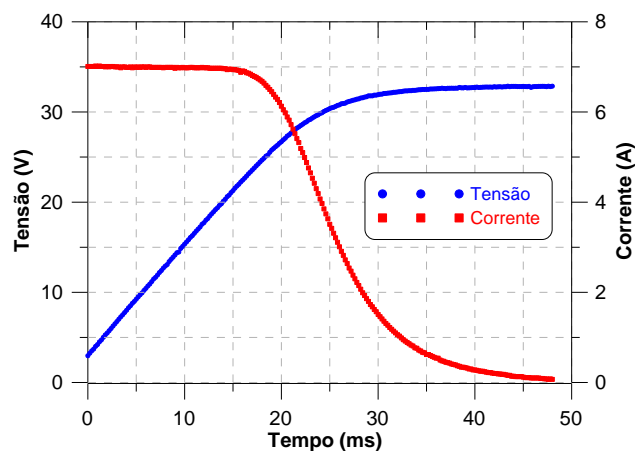


Figura 2 - Formas de onda da tensão e da corrente em um módulo durante o processo de carga do capacitor.

O tempo de carga do capacitor t_C depende da sua capacitância C e das características elétricas do módulo (V_{OC} e I_{SC}) submetido ao ensaio. De acordo com Mahmoud (2006), este tempo pode ser calculado pela Eq. (1).

$$t_C = 2C \frac{V_{OC}}{I_{SC}} \quad (1)$$

Para se obter a curva característica durante o transiente de carga do capacitor, o tempo gasto pelo sistema de medida deve ser compatível com o calculado pela Eq. (1). Portanto os pontos de tensão e corrente devem ser adquiridos neste intervalo de tempo, isto é, o tempo de aquisição t_a deve ser igual (ou ligeiramente superior) ao tempo de carga do capacitor t_C .

3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento desenvolvido destina-se à caracterização de módulos fotovoltaicos cujos limites de tensão e

corrente não ultrapassem os 50 V e os 10 A, respectivamente. Estes limites são impostos pelos circuitos de chaveamento, pela tensão de isolamento do capacitor usado como carga e pelos circuitos de medição. Estes limites, porém, podem ser modificados ao redimensionar alguns componentes eletrônicos.

A construção do equipamento pode ser compreendida em quatro circuitos principais: circuito de potência, circuito de acionamento, circuito de medição e circuito de controle e aquisição de dados.

3.1 Circuito de potência

O circuito de potência é responsável por acoplar e desacoplar o módulo fotovoltaico ao capacitor, descarregá-lo após a medida dos pares $I-V$ e auxiliar na medida dos parâmetros elétricos do módulo fotovoltaico para preparar o sistema de aquisição. Para sua construção são empregados alguns elementos de chaveamento como relés e transistores, além de diodos e resistores. Na Fig. 3 pode ser visto o diagrama esquemático do circuito de potência.

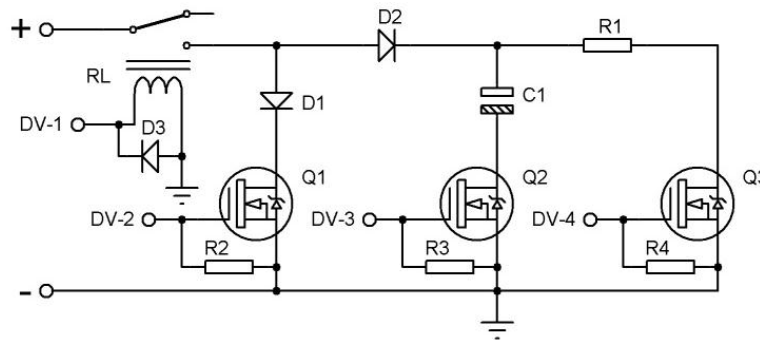


Figura 3 - Diagrama esquemático do circuito de potência.

A função dos componentes do circuito da Fig. 3 é descrita abaixo:

- O relé RL tem a função de conectar o módulo ao circuito de potência para as funções desempenhadas pelos transistores Q1 e Q2 (este relé não opera com carga acoplada ao módulo);
- Q1 tem a função de provocar um curto circuito no módulo fotovoltaico, permitindo a medida de I_{SC} para que o sistema de aquisição possa ajustar, em conjunto com o V_{OC} , o número e o tempo de aquisição dos pares $I-V$;
- Q2 conecta o capacitor C1 ao módulo fotovoltaico, permitindo a varredura dos pares $I-V$;
- Q3 permite a descarga do capacitor C1 através do resistor R1. Neste processo RL não deve estar acionado e o diodo integrado ao Q2 é utilizado;
- D1 e D2 são diodos com a função de evitar que os transistores Q1 e Q2, respectivamente, sejam danificados caso o módulo seja ligado com a polaridade invertida no circuito de potência;
- D3 funciona como proteção do circuito de acionamento do relé RL, evitando que a tensão negativa gerada pela presença da indutância seja transferida para este circuito;
- R2, R3 e R4 são resistores de *pull down*, empregados para manter os transistores em corte quando não estão acionados.

A Tab. 1 apresenta informações sobre os componentes utilizados no circuito de potência.

Tabela 1 - Características dos componentes do circuito de potência.

| Componente | Descrição | Características elétricas |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| C1 | Capacitor eletrolítico | 4700 μF / 63 V |
| Q1, Q2 e Q3 | Transistor MOSFET canal N IRFZ44N | 55 V / 49 A |
| D1, D2 e D3 | Diodo retificador 1N4007 | 1000 V / 1 A |
| R1 | Resistor | 470 Ω / 2 W / 10 % |
| R2, R3 e R4 | Resistor | 100 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| RL | Relé METALTEX AT1RC2 | 15 A |

Os transistores não necessitam de dissipador de calor, pois o tempo de operação é reduzido.

3.2 Circuito de acionamento

Os componentes do circuito de potência são acionados com tensão de 12 V, porém o circuito de controle opera no limite de 3,3 V. Portanto é necessário um circuito intermediário para realizar o ajuste destes níveis de tensão. Este

circuito incorpora, além de outros componentes, isoladores ópticos com a finalidade de proteger o circuito de controle contra surtos que possam ocorrer no circuito de potência. A Fig. 4 mostra este circuito.

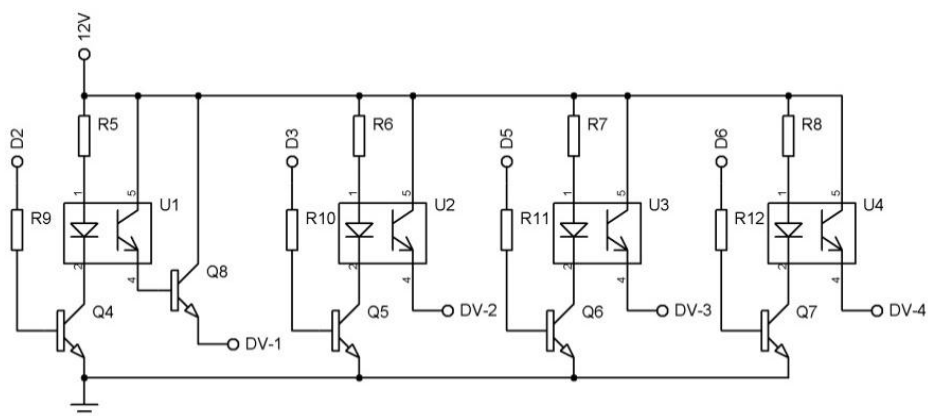


Figura 4 - Circuito de acionamento.

Na Tab. 2 estão listados os componentes (e suas características elétricas) empregados no circuito de acionamento.

Tabela 2 - Características dos componentes do circuito de potência.

| Componente | Descrição | Características elétricas |
|------------|------------------------------|-------------------------------|
| U1 a U4 | Optoacoplador 4N35 | 70 V / 50 mA |
| Q4 a Q8 | Transistor bipolar NPN BC337 | 45 V / 800 mA |
| R5 a R8 | Resistor | 1 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| R9 a R12 | Resistor | 10 k Ω / 0,25 W / 10 % |

Os terminais identificados por DV-1, DV-2, DV-3 e DV-4, no circuito da Fig. 4, devem ser conectados aos de mesmo nome no circuito da Fig. 3 (circuito de potência).

3.3 Circuito de medição

O circuito de medição compreende os sensores e os circuitos de condicionamento de sinal. Para medir a tensão foi aplicado um divisor de tensão construído a partir de dois resistores com valores nominais 78,7 k Ω e 4,7 k Ω , ambos com tolerância de 1 %. Este divisor provoca uma atenuação de, aproximadamente, 17 vezes na tensão do módulo fotovoltaico medido.

A medida da corrente utiliza o sensor de efeito hall CSNF661, fabricado pela HONEYWELL. Este sensor, nominalmente, mede correntes de até 100 A e fornece uma corrente de medição de 100 mA (razão de conversão de 1/1000) que pode ser convertida em tensão através de um resistor ligado entre sua saída e o terra. Neste trabalho utilizou-se um resistor de 32,25 Ω com tolerância de 1 % para esta função. Além disso, o sensor exige alimentação simétrica e, como se optou pela utilização de fonte de alimentação simples para o funcionamento do sistema¹, foi necessário construir um conversor c.c./c.c. para fornecer a tensão negativa. O circuito deste conversor é mostrado na Fig. 5 e a descrição dos seus componentes na Tab. 3.

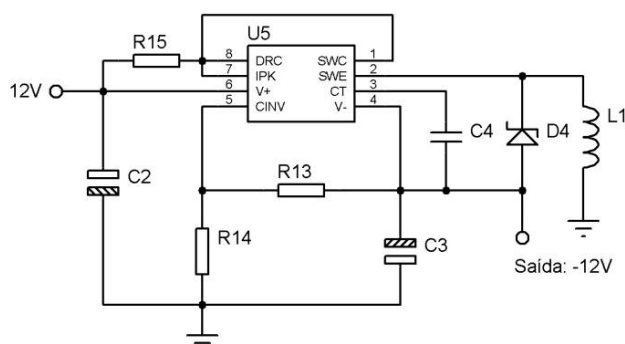


Figura 5 - Conversor c.c./c.c.

¹ Adotar fonte de alimentação simples, em vez de simétrica, permite a utilização do equipamento em campo, necessitando apenas de uma bateria de 12 V para o seu funcionamento.

Tabela 3 - Características dos componentes do conversor c.c./c.c.

| Componente | Descrição | Características elétricas |
|------------|-------------------------|---|
| U5 | MC34063 | Circuito de controle para conversor c.c./c.c. |
| D4 | 1N5819 (diodo schottky) | 40 V / 1 A |
| R13 | Resistor | 3,9 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| R14 | Resistor | 33 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| R15 | Resistor | 0,56 Ω / 0,25 W / 10 % |
| C2 | Capacitor eletrolítico | 100 μ F / 25 V |
| C3 | Capacitor eletrolítico | 470 μ F / 25 V |
| C4 | Capacitor cerâmico | 220 pF / 50 V |
| L1 | Indutor | 470 μ H / 500 mA |

Para aumentar a sensibilidade do sensor hall, foram enroladas 10 voltas de fio com seção 1,5 mm² em torno do seu primário, conforme mostra a Fig. 6. Este procedimento estabelece uma razão de conversão de 1/10.

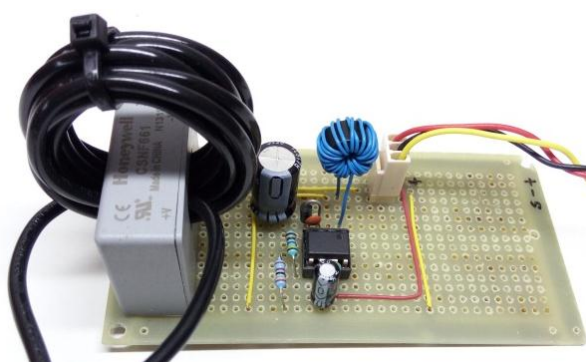


Figura 6 - Circuito utilizado para medir corrente, mostrando o sensor de efeito hall, com 10 voltas de fio secção 1,5 mm² em torno do seu primário, e o conversor c.c./c.c. necessário para fornecer a tensão de -12 V.

A irradiância é medida por uma célula de silício polarizada eletricamente próximo à sua região de curto circuito através de um resistor de baixa resistência. O conjunto fornece constante de calibração igual a 45,68 mV/kW·m⁻². Por ser um sinal elétrico muito baixo, foi utilizado um amplificador de instrumentação com ganho de, aproximadamente, 40 vezes para aproximá-lo do fundo de escala do conversor A/D do circuito de controle e aquisição de dados. O circuito de amplificação pode ser visto na Fig. 7 e as características dos componentes utilizados na Tab. 4.

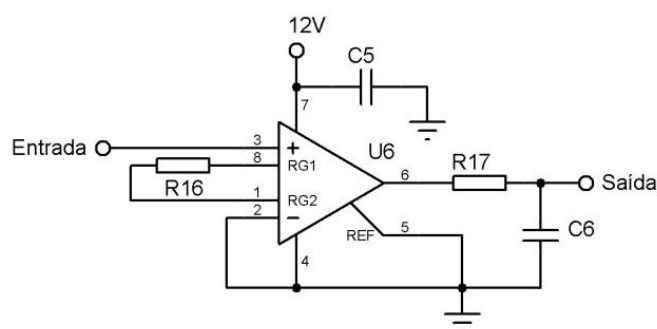


Figura 7 - Diagrama esquemático do amplificador de instrumentação utilizado na medida da irradiância.

Tabela 4 - Características dos componentes do amplificador de instrumentação.

| Componente | Descrição | Características elétricas |
|------------|------------------------|--------------------------------|
| U6 | INA122 | Amplificador de instrumentação |
| R16 | Resistor | 5,6 k Ω / 0,25 W / 1 % |
| R17 | Resistor | 1 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| C5 | Capacitor de poliéster | 100 nF / 63 V |
| C6 | Capacitor de poliéster | 470 nF / 63 V |

Por fim, o sensor LM35 foi empregado para medir a temperatura de célula. Este sensor é um circuito integrado que fornece um sinal elétrico proporcional à temperatura ($10 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$). Para evitar possíveis erros de leitura deste sinal pelo conversor A/D, empregou-se um amplificador de ganho unitário utilizando o amplificador operacional OP213.

3.4 Circuito de controle e aquisição de dados

No circuito lógico de operação e na aquisição dos dados foi empregada uma placa ARDUINO, que é uma plataforma eletrônica de prototipagem baseada em um microcontrolador, possuindo tanto *hardware* como *software* livres (Arduino, 2017). Diversos modelos estão disponíveis comercialmente, mas neste projeto foi utilizado o modelo DUE por possuir um conversor A/D de 12 bits, maior memória interna e maior velocidade de processamento quando comparado com os modelos UNO ou MEGA, que são os mais populares.

Para que a placa ARDUINO execute as tarefas necessárias para o funcionamento do protótipo é necessário escrever um código. Neste código são implementadas rotinas de ajuste para aquisição dos dados e para o controle do circuito de potência. Resumidamente, com relação ao circuito de potência, as etapas estão descritas abaixo:

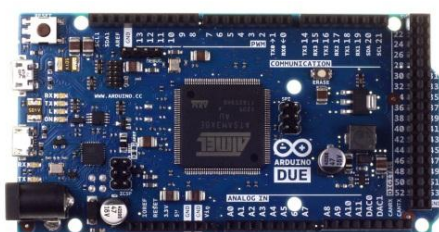
1. Inicia com o transistor Q3 acionado para manter descarregado o capacitor C1 e assim permanece até que seja enviado o comando para iniciar a medida de uma curva *I-V*;
2. Quando solicitada a medição da curva *I-V* através do *software* de controle e operação, Q3 é desligado, o relé RL é ligado e a tensão de circuito aberto é medida. Em seguida, o transistor Q1 é acionado, polarizando o módulo próximo ao curto circuito e a corrente neste ponto é medida. Após esta medida Q1 é desligado;
3. Com os valores de V_{OC} e I_{SC} determinados na etapa anterior são definidos o número de pontos e a taxa de amostragem, configurados inicialmente em 1000 pontos e 5000 amostras/s, respectivamente;
4. Após definidos os parâmetros da varredura, inicia-se efetivamente a medida dos pontos da curva *I-V* do módulo quando o transistor Q2 é ligado. São medidos valores de tensão, corrente, temperatura e irradiância, os quais são armazenados, temporariamente, na memória interna da placa ARDUINO;
5. Quando termina a etapa anterior o transistor Q2 e o relé RL são desligados, nesta ordem. O capacitor C1 é então descarregado com o acionamento do transistor Q3 e os dados armazenados na memória do ARDUINO são transferidos para o *software* de controle e operação. Quando termina a descarga de C1 o sistema volta para a etapa 1, permitindo uma nova medida.

O processo de operação pode ser acompanhado pela leitura das informações codificadas por um LED bicolor (verde e vermelho) que está disposto na placa principal (circuito de controle e aquisição de dados). A interpretação das informações pode ser obtida na Tab. 5.

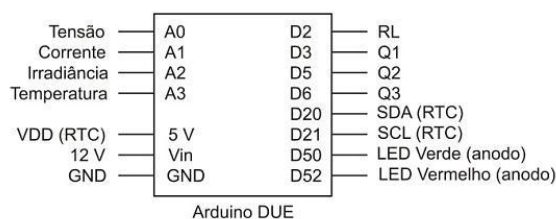
Tabela 5 - Interpretação das informações codificadas pelo LED bicolor.

| Estado de operação | Codificação do LED |
|--|--|
| Sistema pronto para aquisição | Luz verde fixa |
| Sistema realizando aquisição | Luz vermelha fixa |
| Sistema enviando dados para o computador | Luz vermelha intermitente |
| Sistema descarregando o capacitor | Alternância entre a luz vermelha e a verde |

A Fig. 8 (a) mostra a foto da placa ARDUINO DUE e (b) a representação esquemática da placa com as conexões utilizadas no protótipo.



(a)



(b)

Figura 8 - (a) Foto da placa ARDUINO DUE e (b) esquema simplificado da placa ARDUINO indicando as conexões utilizadas, no qual os terminais indicados por “A” são entradas analógicas e os por “D” entradas e saídas digitais.

Para operar o equipamento é utilizada a conexão USB da placa ARDUINO, por onde são trocadas informações com o computador através do *software* de controle e operação. Para registrar informações sobre data e horário, um RTC (do inglês, *Real Time Clock*) foi utilizado. O circuito do RTC pode ser visto na Fig. 9.

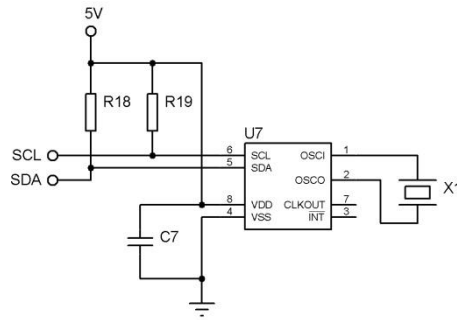


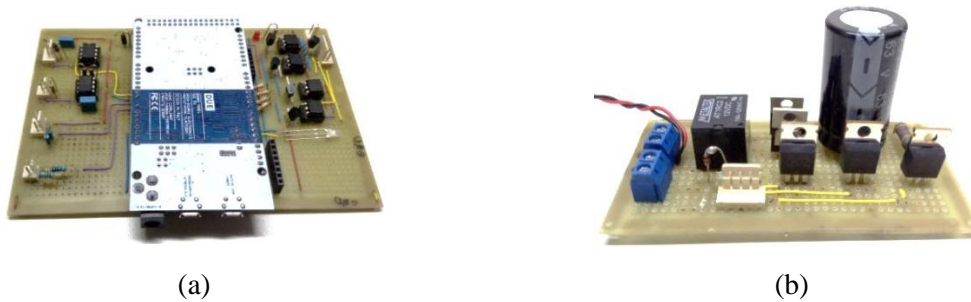
Figura 9 - Circuito do RTC.

A Tab. 6 informa as características dos componentes do circuito da Fig. 9.

Tabela 6 - Características dos componentes do RTC.

| Componente | Descrição | Características elétricas |
|------------|------------------------|-------------------------------|
| U7 | PCF8563 | <i>Real Time Clock</i> |
| R18 e R19 | Resistor | 10 k Ω / 0,25 W / 10 % |
| C7 | Capacitor de poliéster | 100 nF / 16 V |
| X1 | Cristal oscilador | 32.768 kHz |

O aspecto final dos circuitos montados em placas universais pode ser visto na Fig. 10, com exceção do circuito para medir corrente, já apresentado na Fig. 6.



(a)

(b)

Figura 10 - Circuitos construídos em placas universais: (a) circuito de controle e aquisição de dados, juntamente com o circuito de medição e o de acionamento e (b) circuito de potência.

4. PROGRAMA DE OPERAÇÃO E CONTROLE DO EQUIPAMENTO

Para operar o equipamento foi desenvolvida uma aplicação em Visual Basic que permite visualizar, processar e armazenar dados da curva obtida. A janela principal deste programa pode ser vista na Fig. 11.

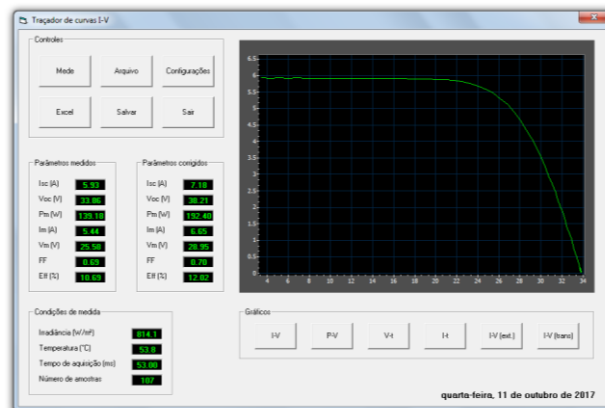


Figura 11 - Tela principal do programa de operação e controle do equipamento.

Os parâmetros elétricos medidos (e os transladados para uma condição de referência) são apresentados na tela principal do *software* e a curva $I-V$ pode ser visualizada em tempo real. A corrente de curto circuito I_{SC} e a tensão de circuito aberto V_{OC} são calculadas aplicando-se uma regressão linear nos pares $I-V$ presentes na região dos respectivos pontos e, para a potência máxima P_M , uma regressão polinomial de quarta ordem. Os limites para estas regressões podem ser definidos na tela de configurações do *software*, bem como as condições para translação da curva medida e a conexão do equipamento com o computador via comunicação serial. A imagem desta tela pode ser vista na Fig. 12. Para transladar os pontos para uma condição diferente da qual foi obtida a curva $I-V$, foi utilizado o método geométrico descrito em Bühler *et al* (2014).

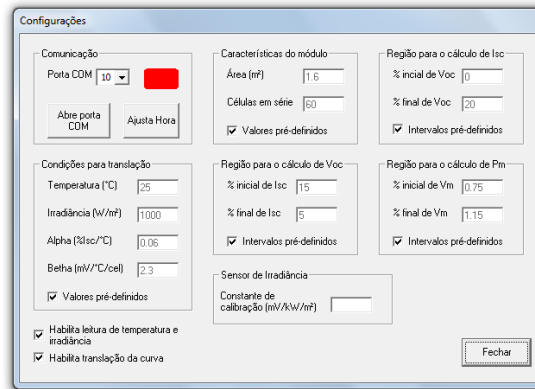


Figura 12 - Tela de configurações do programa de operação e controle do equipamento.

Como opção adicional, o programa permite gerar um arquivo no formato Microsoft Excel no qual são registrados os dados do ensaio do módulo fotovoltaico. Um exemplo pode ser visto na Fig. 13.

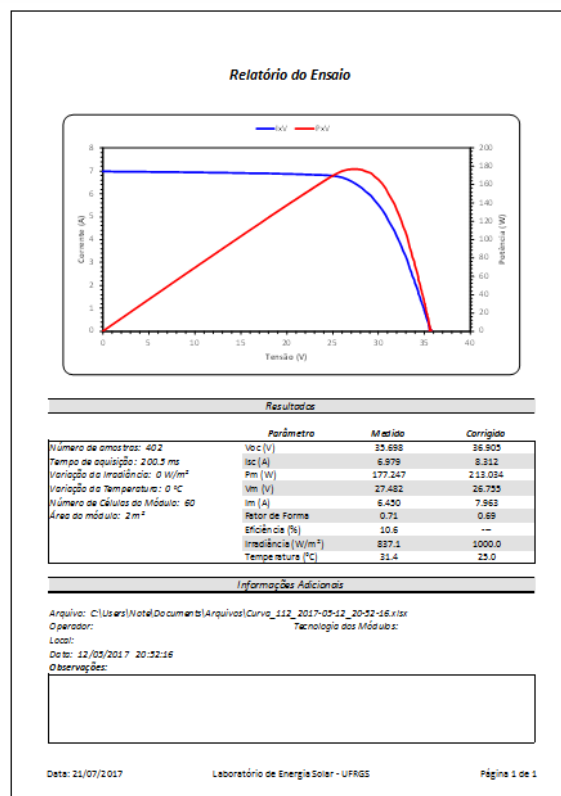


Figura 13 - Exemplo de um relatório gerado pelo programa.

5. RESULTADOS

Para avaliar o desempenho do protótipo foram realizados ensaios em um módulo de silício multicristalino com potência de $245 W_p$, cujos principais parâmetros elétricos na condição padrão de ensaio ($1000 W/m^2$, $25 ^\circ C$ e AM 1,5),

especificados pelo fabricante, estão descritos na Tab. 7. Foram obtidas curvas I - V deste módulo com protótipo e com um equipamento comercial e comparados os resultados.

Tabela 7 - Parâmetros elétricos nominais do módulo utilizado nos ensaios.

| V_{OC} | I_{SC} | V_{MP} | I_{MP} | P_M |
|----------|----------|----------|----------|-------|
| 37,8 V | 8,63 A | 30,2 V | 8,11 A | 245 W |

O equipamento comercial empregado nos ensaios utiliza como método de polarização uma carga capacitiva e os limites informados pelo fabricante permitem o teste do módulo utilizado neste trabalho (embora sua principal aplicação seja para medir arranjos em vez de módulos individuais por possuir limite de tensão em 1000 V e corrente em 100 A).

A Fig. 14 mostra as curvas I - V e P - V levantadas com o protótipo e com o equipamento comercial em um dia de céu limpo e sem a presença significativa de nebulosidade, sob a irradiância de 1046 W/m² e temperatura de célula de 57 °C, ambas medidas com o protótipo.

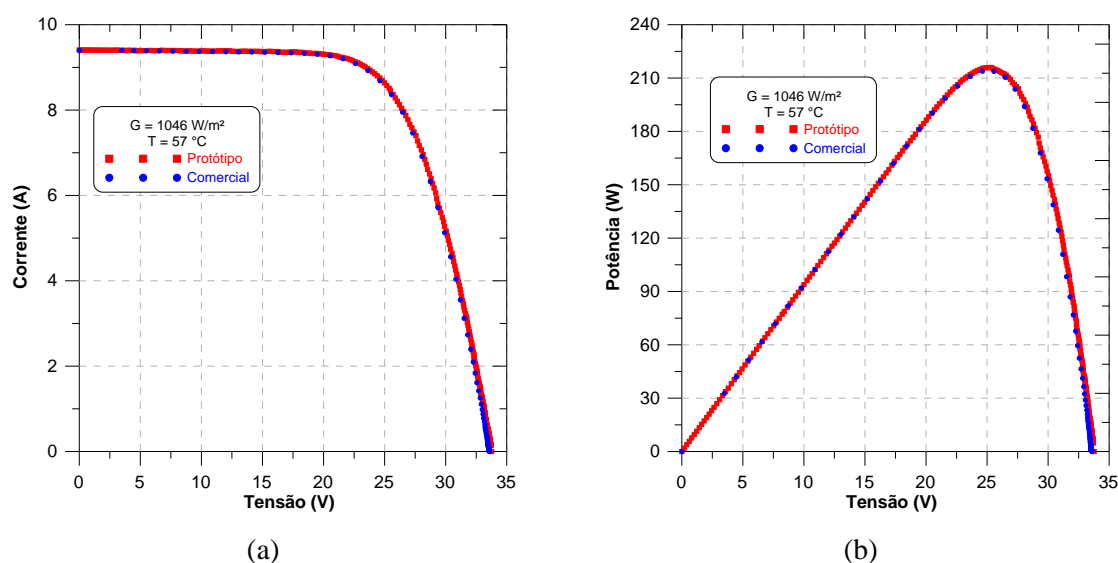


Figura 14 - Curvas levantadas com o protótipo e o equipamento comercial, sendo em (a) as curvas I - V e em (b) as curvas P - V .

Analisando qualitativamente os gráficos da Fig. 14 observa-se que há boa concordância entre as curvas obtidas com o protótipo e com o equipamento comercial, percebendo-se a sobreposição de pontos praticamente em todo o traçado da curva de caracterização do módulo fotovoltaico. A Tab. 8 mostra os parâmetros elétricos de interesse extraídos das curvas levantadas, além das diferenças encontradas, tendo como referência o equipamento comercial.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios.

| Parâmetro | Protótipo | Comercial | Diferença |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| I_{SC} | 9,408 A | 9,394 A | +0,15 % |
| V_{OC} | 33,771 V | 33,591 V | -0,53 % |
| I_{MP} | 8,576 A | 8,543 A | +0,38 % |
| V_{MP} | 25,138 V | 25,069 V | -0,27 % |
| P_M | 215,58 W | 214,18 W | +0,65 % |
| FF | 0,678 | 0,679 | --- |

Os resultados apresentados pela Tab. 8 mostram que os parâmetros elétricos apresentam diferenças inferiores a 1 %, indicando que o protótipo apresenta razoável qualidade na caracterização de módulos fotovoltaicos.

6. CONCLUSÃO

As características elétricas que permitem avaliar a qualidade e o desempenho de um módulo fotovoltaico são obtidas a partir da análise da sua curva I - V . Esta curva é obtida quando o módulo é exposto à radiação solar (natural ou artificial) e são medidos os pares de tensão e corrente enquanto é polarizado nos pontos de operação. Embora

existam equipamentos comerciais dedicados a esta função, é possível construir um traçador de curvas I - V com componentes eletrônicos de fácil obtenção no mercado.

Neste trabalho foi descrito e analisado o protótipo de um traçador de curvas I - V para módulos fotovoltaicos cujos limites de tensão e corrente não ultrapassem os 50 V e os 10 A, respectivamente. Na sua construção foi usada uma carga capacitiva para promover a polarização e permitir que os pares I - V fossem medidos. Para o chaveamento entre a carga capacitiva e o módulo foram utilizados transistores MOSFET. Uma placa ARDUINO, modelo DUE, foi utilizada para controlar e fazer a aquisição de dados neste protótipo e um programa para facilitar o uso foi desenvolvido em Visual Basic.

Para avaliar o desempenho do protótipo foram realizados ensaios em um módulo de silício multicristalino com potência de 245 W_p . Foram obtidas curvas I - V deste módulo com protótipo e com um equipamento comercial e os resultados foram comparados. As curvas levantadas apresentaram boa concordância, resultando em diferenças inferiores a 1 % nos parâmetros elétricos de interesse, indicando que o protótipo apresenta razoável qualidade na caracterização de módulos fotovoltaicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro. O LABSOL é um laboratório associado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia, INCT-EREEA.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017. Informações técnicas: banco de informações de geração, Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acesso em: 23 outubro 2017.
- Arduino, 2017. Arduino Due. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/arduino-due>>. Acesso em: 16 outubro 2017.
- Bühler, A. J., Gasparin, F. P., Krenzinger, A., 2014. Post-processing data of measured I - V curves of photovoltaic devices, *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 602-610.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Balanço energético nacional 2017, Brasília. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 23 outubro 2017.
- Mahmoud, M. M., 2006. Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I - V characteristics, *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2198-2206.
- Muñoz, J., Lorenzo, E., 2006. Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays, *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1489-1497.

PROJECT AND ASSEMBLY OF AN I - V CURVE TRACER DEVICE FOR PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. *This work describes the development and construction of an I - V curve tracer for photovoltaic modules. Such equipment employs a capacitive load for biasing the PV module under test. The power switching is performed by MOSFET transistors. An ARDUINO DUE board was used for the data acquisition and logical control of the equipment. The circuit has been designed to test modules whose limits do not exceed 50 V for the open circuit voltage and 10 A for the short circuit current. A hall effect device was used to sense the current of the module, while the voltage was measured from a resistive voltage divider. The irradiance was measured from a calibrated reference cell and the temperature was measured with a LM35 IC sensor. In addition, a software was developed for the operation of the equipment, allowing the visualization of the measured curve and its translation to another condition of temperature and irradiance (STC, for instance), besides retrieving the main electric parameters. To evaluate the performance of the prototype, tests were carried out on a multicrystalline silicon module with a power of 245 W_p . In these tests, I - V curves measured with the prototype and with a commercial equipment were compared. The obtained curves presented good agreement, resulting in differences of less than 1% in the electrical parameters of interest, indicating that the prototype presents a reasonable quality in the characterization of photovoltaic modules.*

Key words: *Photovoltaic Energy, I - V Tracer, Capacitive Load*