



**OBJETIVO**  
Medição das linhas características de um módulo fotovoltaico em dependência da intensidade da iluminação

**TAREFAS**

- Medição das linhas características *I-U* de um módulo fotovoltaico com intensidades de iluminação diferentes.
- Comparação das linhas características medidas com um cálculo segundo o modelo de um diodo.
- Determinação da correlação entre tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito para diferentes intensidades de iluminação.

**RESUMO**

Uma instalação fotovoltaica transforma energia luminosa da luz solar em energia elétrica. Para isto, utiliza-se células solares, feitas, por exemplo, de silício adequadamente dopado e que, em princípio, correspondem a um fotodiodo grande. A luz absorvida pela célula solar ativa portadores de carga nas ligações do cristal que contribuem com uma fotocorrente na direção contrária da transição p-n. A corrente entregue a uma carga externa é limitada pela corrente no diodo da célula solar. Ela alcança, na chamada tensão de circuito aberto  $U_{oc}$ , o valor zero, pois a fotocorrente e a corrente do diodo se compensam exatamente ali e fica negativa quando é aplicada uma tensão acima da tensão de circuito aberto. No âmbito de correntes positivas, a célula solar pode ser operada como gerador para entrega de energia elétrica à carga externa. Na experiência, as linhas características de corrente e tensão deste gerador são medidas em dependência da intensidade de iluminação e descrita com conjunto simples de parâmetros.

**APARELHOS NECESSÁRIOS**

Número	Instrumentos	Artigo N°
1	SED Energia solar (230 V, 50/60 Hz)	U8498301-230 ou
	SED Energia solar (115 V, 50/60 Hz)	U8498301-115
1	Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A (230 V, 50/60 Hz)	U33020-230 ou
	Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A (115 V, 50/60 Hz)	U33020-115

**FUNDAMENTOS GERAIS**

O termo fotovoltaico é uma junção da palavra grega Phos (luz) e do nome italiano Volta. Ele homenageia *Alessandro Volta*, que, entre outros, inventou a primeira bateria eletroquímica funcional. Uma instalação fotovoltaica transforma energia luminosa “disponível gratuitamente” da luz solar em energia elétrica, sem emissão de  $CO_2$ . Para isto, utiliza-se células solares, feitas, na maioria dos casos, de silício adequadamente dopado e que correspondem a um fotodiodo grande. A luz absorvida pela célula solar ativa portadores de carga nas ligações do cristal (fotoefeito interno), que chegam aos contatos externos da célula solar no campo elétrico da transição p-n obtida por dopagem, os elétrons para o lado dopado n e os buracos (furos) de elétrons para o lado dopado p (Fig. 1). Assim, forma-se uma fotocorrente em direção contrária à transição p-n, que pode transmitir energia elétrica a uma carga externa.

Informações técnicas sobre os dispositivos, consulte 3bscientific.com



A fotocorrente  $I_{ph}$  é proporcional à intensidade de iluminação  $\Phi$ :

$$(1) \quad I_{ph} = \text{const} \cdot \Phi$$

Ela é sobreposta com a corrente de diodo na direção de passagem

$$(2) \quad I_D = I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

$I_s$ : corrente de saturação,  $U_T$ : tensão de temperatura

e cresce mais forte quanto mais a tensão  $U$  acumulada entre os contatos ultrapassa a tensão de difusão  $U_D$ . Ou seja, a corrente  $I$  transmitida para fora é limitada pela corrente de diodo:

$$(3) \quad I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right)$$

Ela alcança, na chamada tensão de circuito aberto  $U_{oc}$ , o valor zero, pois a fotocorrente e a corrente do diodo se compensam exatamente ali e fica negativa quando é aplicada uma tensão  $U > U_{oc}$ .

No âmbito de correntes positivas, a célula solar pode ser operada como gerador para entrega de energia elétrica à carga externa. A equação (3) descreve a linha característica *I-U* deste gerador.

Como a fotocorrente  $I_{ph}$ , na prática, é significativamente maior que a corrente de saturação  $I_s$ , pode-se derivar, para a tensão de circuito aberto, a partir de (3), a correlação

$$(4) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

Se a célula solar é curto-circuitada em seus conectores, ela fornece a corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , que corresponde à fotocorrente por conta de  $U = 0$  conforme (3). Então

$$(5) \quad U_{oc} = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right), \text{ com } I_{sc} = I_{ph}$$

A equação 2 descreve o comportamento do diodo no âmbito do chamado modelo padrão. Aqui, a corrente de saturação  $I_s$  é uma grandeza material que depende dos dados geométricos e elétricos da célula solar. Para a tensão de temperatura  $U_T$ , vale

$$(6) \quad U_T = \frac{m \cdot k \cdot T}{e}$$

$m = 1 \dots 2$ : fator de idealidade  
 $k$ : constante de Boltzmann,  $e$ : carga elementar,  
 $T$ : temperatura em Kelvin

Em observação mais cuidadosa da linha característica, ainda precisam ser consideradas correntes de fuga nos cantos da célula solar e curtos-circuitos pontuais da transição p-n, que podem ser modeladas por uma resistência paralela  $R_p$ . A equação 3, com isto, torna-se

$$(7) \quad I = I_{ph} - I_s \cdot \left( \exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right) - \frac{U}{R_p}$$

Para alcançar tensões úteis na faixa entre 20 e 50 V, na prática, muitas células são ligadas em série em um módulo fotovoltaico. Na experiência, esta ligação em série de 18 células solares é iluminada com uma lâmpada halógena com intensidade de iluminação variável para registrar as linhas características corrente-tensão do módulo com intensidades de iluminação diferentes.

**AVALIAÇÃO**

A grande quantidade de linhas características corrente-tensão do módulo fotovoltaico (Fig. 2) pode ser descrita com auxílio da equação 7, quando, independentemente da intensidade da iluminação, se emprega o conjunto sempre igual de parâmetros  $I_s$ ,  $U_T$  e  $R_p$  e se seleciona a fotocorrente  $I_{ph}$  independentemente da intensidade de iluminação. Contudo, a tensão de temperatura é 18 vezes o valor estimado na equação 6, pois o módulo é constituído de ligação em série de 18 células solares. Como diagrama de circuito substituto para o módulo fotovoltaico, portanto, pode-se indicar uma ligação em paralelo de uma fonte ideal de corrente, uma ligação em série de 18 diodos semicondutores e uma resistência ôhmica, vide Fig. 3. A fonte de corrente fornece uma corrente independente da intensidade de iluminação na direção do bloqueio.

Fig. 1: Representação esquemática de uma célula solar como elemento semicondutor, n+: setor altamente dopado n, p: setor dopado p, ●: buraco (furo) de elétron causado por absorção da luz, ●: elétron livre gerado pela absorção da luz, +: carga positiva “fixa”, -: carga negativa “fixa”,  $E_{int}$ : campo elétrico marcado pela diferença da carga espacial,  $R_L$ -resistência de carga

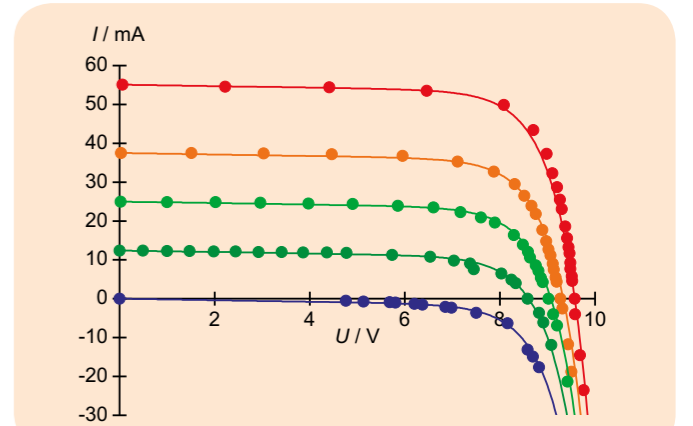
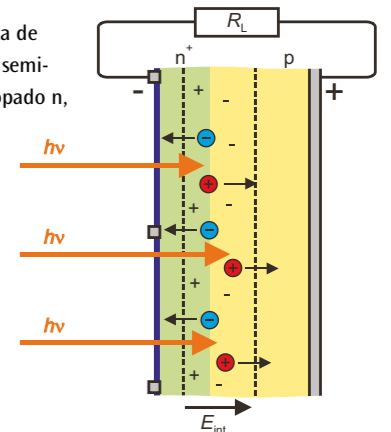


Fig. 2: Conjunto de linhas características corrente-tensão de um módulo fotovoltaico para cinco diferentes intensidades de iluminação

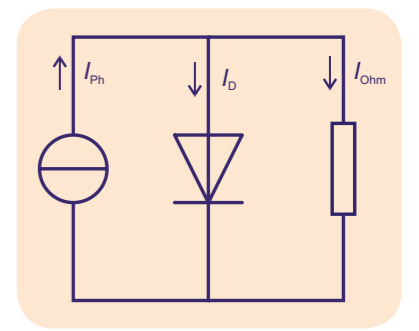


Fig. 3: Diagrama de circuito substituto para o módulo fotovoltaico