

Célula Fotovoltaica

LCET/MEFT - 2º ano, 2º Semestre - 2013/2014

Turno de Sexta-feira
Professor João Figueirinhas

Grupo D

João Lourenço (75382)/ Miguel Mora (75399)/ Miguel Levy (75516)/ Ana Almeida (75986)

07/03/2014

Resumo

Este trabalho teve como objectivo a determinação da característica eléctrica de uma célula fotovoltaica (relação tensão-corrente), bem como a obtenção da resistência óptima (resistência para a qual a potência é máxima) para diferentes inclinações (α) da célula. Outro objectivo desta experiência, foi o estudo da potência (P) em função da distância (d) à fonte luminosa, bem como a identificação de relações de linearidade entre algumas grandezas (V e I) com o nível de iluminação (α).

1 Introdução

Circuitos eléctricos

Um circuito eléctrico é constituído por diversos elementos como geradores, condensadores, resistências, bobines, entre outros. A combinação desses elementos determina a tensão (V) e a intensidade de corrente (I), num dado ponto do circuito, bem como a forma de obtenção destas grandezas.

Um circuito tem que possuir uma fonte que forneça energia, como um gerador que pode ser regulado por forma a estabelecer uma tensão constante.

Outro elemento essencial são as resistências que permitem a regulação da tensão por efeito Joule, sendo esta tensão dada pela Lei de Ohm, vindo:

$$V = RI \quad (1)$$

As resistências podem ser variáveis, permitindo a regulação do seu valor, sendo designadas por reóstato.

Estes elementos são muito importantes, pois através da sua regulação é possível identificar a resistência óptima, isto é, a resistência para a qual a potência (energia dissipada por unidade de tempo) é máxima, sendo esta dada por:

$$P = VI \leftrightarrow P = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

Como os fontes não são ideais, é necessário ter em conta que estas possuem uma resistência interna (R_i). Quando a fonte é ligada a uma resistência (R), tem-se o circuito representado:

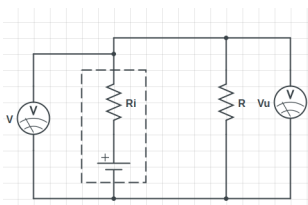


Figura 1: Circuito exemplo com representação de um gerador e a sua resistência interna ligada em série a uma resistência.

Como as resistências estão em série, vem que:

$$I = \frac{V}{R_i + R} \quad (3)$$

Para se obter então a potência máxima, é necessário calcular a potência dissipada na carga (P_u) vindo:

$$P_u = V_u I = RI^2 = \frac{R}{(R + R_i)^2} V^2 \quad (4)$$

$$(5)$$

A potência máxima é dada pelo zero da derivada de P_u em ordem a R , vindo:

$$\frac{dP_u}{dR} = 0 \rightarrow R = R_i \quad (6)$$

Assim, quando a resistência da carga for igual à resistência interna da fonte (resistência óptima), a potência dissipada é máxima.

Quando um sistema tem mais elementos a potência máxima de carga é obtida quando a resistência da carga é igual à resistência de Thévenin, isto é à resistência equivalente obtida pela combinação de todos os elementos do circuito, anteriores à carga.

Célula Fotovoltaica

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo que permite a transformação de energia luminosa em energia eléctrica através do efeito fotoeléctrico (emissão de electrões aquando a incidência de radiação electromagnética, originando corrente eléctrica).

Desta forma, quando maior for a intensidade luminosa, maior será a intensidade de corrente produzida

Assim sendo, o ângulo entre a fonte de luz e a célula determina a potência luminosa, vindo:

$$P_L = P \cos(\alpha) \quad (7)$$

Um outro factor a considerar é a distância à fonte luminosa, sendo que quando se trata de um feixe rectilíneo e uniforme, este factor é irrelevante. Contudo se não se estiver perante essa situação é necessário estudar o comportamento do feixe, sendo que para um feixe divergente a potência luminosa diminui, uma vez que a intensidade de radiação por unidade de área diminui também. Quando se trata de um feixe convergente a potência luminosa aumenta atingindo o máximo na distância focal.

2 Montagem e Procedimento Experimental

1. Montar o circuito eléctrico consoante o esquema abaixo:

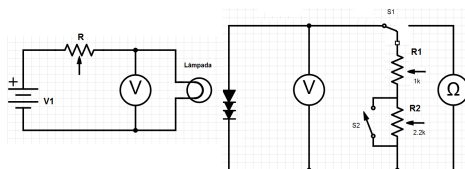


Figura 2: Montagem experimental.

2. Regular a fonte de alimentação de forma a ser obtida uma tensão de 12V aos terminais da lâmpada.
3. Determinar a característica eléctrica para diferentes níveis de iluminação (α):
 - (a) Ajustar o nível de iluminação, alterando a inclinação da célula fotovoltaica ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$);
 - (b) Para uma dada inclinação variar o valor da resistência;
 - (c) Medir a tensão aos terminais da célula;
 - (d) Calcular os valores de intensidade de corrente através da Lei de Ohm (eq...);
 - (e) Traçar gráfico $I(V)$;
 - (f) Repetir os passos anteriores para os restantes níveis de iluminação;
4. Determinar a resistência óptima:
 - (a) Ajustar a inclinação da célula ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$);

- (b) Regular a resistência e calcular a potência (2);
 - (c) Identificar um intervalo que contenha a potência máxima;
 - (d) Ajustar a resistência por forma a diminuir o intervalo onde se encontra a potência máxima;
 - (e) Repetir para os restantes níveis de iluminação;
 - (f) Traçar gráficos $P(R)$;
 - (g) Identificar a resistência óptima;
5. Identificar as relações de linearidade com o nível de iluminação:
 - (a) Estabelecer um valor de resistência;
 - (b) Para uma dada inclinação medir a tensão aos terminais da célula e calcular a intensidade;
 - (c) Repetir b) para os restantes níveis de iluminação ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$);
 - (d) Calcular os valores de potência para as diferentes inclinações;
 - (e) Traçar gráficos $I(P_L)$ e $V(P_L)$.
 6. Determinar a lei de Variação da potência à carga com a distância à fonte luminosa:
 - (a) Ajustar a inclinação da célula ($\alpha = 0$);
 - (b) Variar a distância (d) entre a lâmpada e a célula;
 - (c) Medir o valor de tensão aos terminais da célula;
 - (d) Traçar o gráfico de $\ln(P)$ por $\ln(d)$.

3 Análise de Resultados

3.1 Característica da Célula Fotovoltaica

Para estudar a característica da célula fotovoltaica modificou-se o ângulo de inclinação (α) da célula, sendo medida, para os mesmos valores de tensão (V), a resistência e, posteriormente, calculada a intensidade (Lei de Ohm).

Desta forma, traçou-se um gráfico $I(V)$:

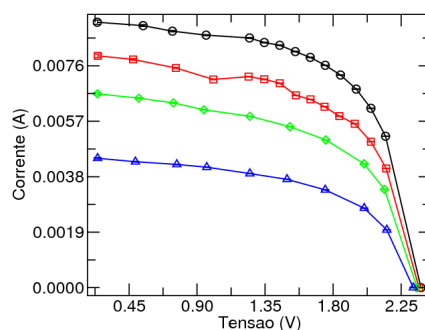


Gráfico 1: Gráfico $I(V)$ para avaliar a característica eléctrica da célula. ($\alpha = 0^\circ, \alpha = 30^\circ, \alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$).

A partir do gráfico acima é possível verificar que com o aumento da inclinação da célula fotovoltaica a intensidade de corrente diminui, uma vez que área da célula fotovoltaica que se encontra exposta é menor.

Relativamente à característica da célula (corrente-tensão), esta varia apenas segundo o eixo da corrente, conforme a luminosidade em questão. A célula fotovoltaica é tanto melhor quanto mais quadrada for a curva.

A partir do gráfico pode-se ter uma ideia da potência máxima para cada inclinação, sendo esta correspondente à transição entre o comportamento mais constante, em que a intensidade mantém-se, e o decréscimo súbito desta.

3.2 Dependência linear

Através da equação (7), calculou-se a potência luminosa e traçou-se dois gráficos $I(P_L)$ e $V(P_L)$.

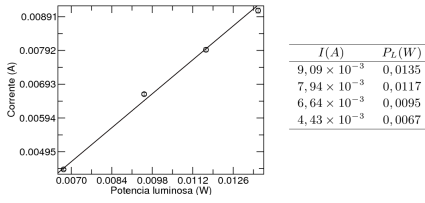


Gráfico 2: Gráfico $I(P_L)$ quando $V = (0, 240 \pm 0,003)V$.

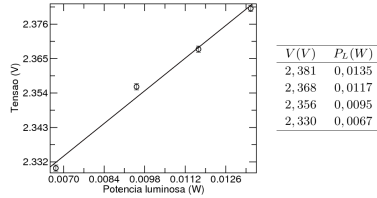


Gráfico 3: Gráfico $V(P_L)$ quando $I = 0A$ (circuito aberto).

A partir dos gráficos 2 e 3 é possível verificar que a relação mais linear é $I(P_L)$, o que mais uma vez, pode ser explicado pelo facto de a intensidade de radiação (n° fotões) por unidade de área é menor, o que faz com que a potência seja menor, uma vez que $P = VI$.

3.3 Resistência óptima ($R_{\text{Óptima}}$)

Conforme referido anteriormente, a resistência óptima, permite a obtenção da potência máxima, o que é bastante relevante aquando a produção de energia eléctrica a partir de uma fonte luminosa.

Assim, nesta secção, variou-se o valor da resistência para quatro situações distintas ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$), tendo sido determinado o valor da $R_{\text{Óptima}}$ a partir do cálculo da potência, vindo:

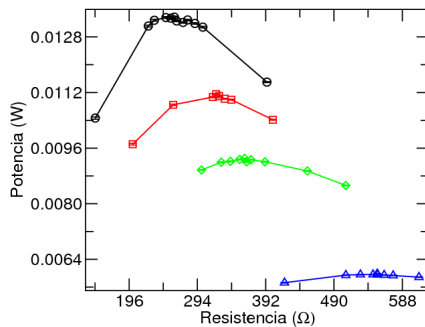


Gráfico 4: Gráfico $P(R)$. ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$).

Para os diferentes ângulos foram encontrados os seguintes valores de resistência óptima e potência máxima (pico das curvas):

$\alpha(^{\circ})$	$\epsilon\alpha(^{\circ})$	$R_{\text{Óptima}}(\Omega)$	$\epsilon R_{\text{Óptima}}(\Omega)$	$P_{\text{Óptima}}(W)$	$\epsilon P_{\text{Óptima}}(W)$
0	2	261	4	$13,37 \times 10^{-3}$	$0,03 \times 10^{-3}$
30	2	321	4	$11,15 \times 10^{-3}$	$0,02 \times 10^{-3}$
45	2	362	5	$9,30 \times 10^{-3}$	$0,01 \times 10^{-3}$
60	2	552	4	$5,98 \times 10^{-3}$	$0,01 \times 10^{-3}$

Tabela 1: Valor de resistências óptima e potência óptima para $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ e $\alpha = 60^\circ$

A partir do gráfico 4 e tabela 1, podemos verificar que a potência máxima ocorre para $\alpha = 0$, conforme analisado anteriormente.

Outro facto é a aumento da resistência óptima com o ângulo de inclinação o que é concordante com a equação (2), uma vez que a intensidade luminosa é menor, a potência é maior, logo a resistência óptima terá também de aumentar.

Com os valores de potência óptima (potência máxima) traçou-se um gráfico ($P_O(P_L)$).

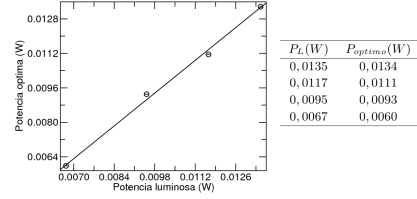


Gráfico 5: Gráfico $P_O(P_L)$.

No gráfico 5, tem-se um aumento da potência óptima com a potência luminosa, sendo esta uma relação de proporcionalidade directa, dado esta ser dada por (7), quanto maior for o $\cos(\alpha)$, maior é a potência, ou seja quanto menor for o ângulo de inclinação, maior é a potência máxima.

3.4 Variação da Potência em função da distância $P(d)$

Nesta secção, variou-se a distância entre a lâmpada e fonte, por forma a verificar o efeito da distância na potência produzida pela célula fotovoltaica.

Para isso, deixou-se a célula fotovoltaica paralela à fonte luminosa ($\alpha = 0^\circ$) e fixou-se a resistência ($R = \dots\Omega$). Posto isto, variou-se a distância à lâmpada (d) traçando-se o gráfico 6 ($\ln(P)$ em função de $\ln(d)$):

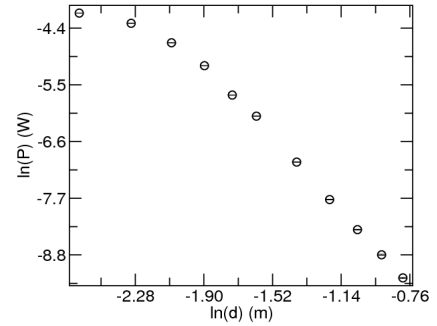


Gráfico 6: Gráfico $\ln(P)$ [$\ln(d)$].

No gráfico 6, podemos observar dois comportamentos distintos, um primeiro comportamento representado pelos cinco primeiros pontos e um segundo comportamento demarcado pelos pontos restantes.

Para o segundo comportamento, é fácil verificar a existência de uma dependência directa entre o logaritmo da potência e o logaritmo da distância, conforme é possível observar no gráfico 7, vindo:

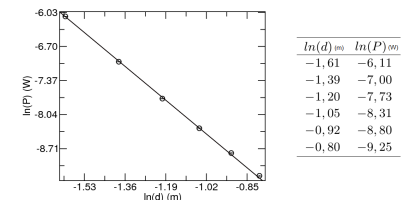


Gráfico 7: Gráfico $\ln(P)$ [$\ln(d)$] para o comportamento linear.
 $\ln(P) = 3.9\ln(d) - 6.03$.

Para verificar a causa da existência de dois comportamentos distintos, utilizou-se uma folha branca e observou-se a existência de uma zona de sombra provocada pela lâmpada que com o aumento da distância diminuía, isto porque os espelhos presentes no interior da lâmpada reflectiam os raios de luz, sendo que a uma distância reduzida da lâmpada, essa reflexão era diminuta. Com o aumento da distância a zona de sombra diminuiu, extinguindo-se, sensivelmente em $d = 10(\text{cm})$.

4 Conclusão e Crítica

Numa primeira fase, foi analisada a característica da célula. A característica (relação tensão-corrente) resulta num gráfico que relaciona a intensidade de corrente com a tensão da célula. Este gráfico é útil para avaliar a qualidade da célula: a situação ideal seria obter uma curva da característica que fosse quase quadrada (uma função constante e uma recta quase vertical) visto que isto maximizaria a potência obtida. Esta fase incluía também a análise da característica para diferentes níveis de iluminação, ou seja, para diferentes ângulos de incidência da luz na célula. Como é facilmente observável por análise do gráfico obtido, o valor de intensidade máximo é afectado pela inclinação, atingindo níveis mais baixos quanto mais inclinada for a incidência. Desta forma, os níveis máximos de potência são vistos para uma incidência frontal na célula fotovoltaica, o que nos permite confirmar a noção intuitiva que uma incidência directa na célula fotovoltaica irá maximizar o aproveitamento desta.

Também se analisou se existia uma dependência linear entre a potência luminosa e algumas grandezas, sendo que para tal se usaram as medidas efectuadas para a característica. Inicialmente, de modo a avaliar se a intensidade variava linearmente com a potência luminosa, fixou-se a tensão a um nível baixo (entre 0,240 e 0,243 V) e mediu-se a intensidade tendo-se comparado com a potência luminosa, verificando-se que a relação entre as duas era linear. Contudo, as pequenas discrepâncias (desvios) encontradas no gráfico podem ser explicadas visto que o controlo da resistência para encontrar valores de tensão baixos como 0,240 V era extremamente complicado, não se tendo obtido sempre esse valor mas sim valores no intervalo entre 0,240 e 0,243 Volts. Analogamente, para verificar a variação linear da tensão com a potência luminosa mediu-se a tensão em circuito aberto ($I = 0A$) para as diferentes inclinações, tendo-se também verificado a sua dependência linear.

Através da lei de Ohm, sabemos que a resistência está intimamente relacionada com a tensão e a intensidade. Adi-

cionalmente, através da análise do gráfico da característica, sabemos que a tensão e a intensidade não são inversamente proporcionais, o que provoca uma variação da potência para diferentes pontos na curva da característica. Deste modo, é possível encontrar uma resistência - denominada de resistência óptima - que originará um valor de tensão e de intensidade que são responsáveis pelo máximo da potência obtida pela célula fotovoltaica. No entanto, ainda permanece uma questão: Será essa resistência óptima constante para as características encontradas para diferentes ângulos de incidência? Para tal efeito, repetiu-se a experiência da obtenção da resistência óptima para os diferentes ângulos e obtiveram-se diferentes valores de resistência.

Por análise do gráfico 5, podemos também reparar que a potência óptima (valor máximo de potência) varia linearmente com a inclinação da célula.

Por último, verificou-se o comportamento da potência com a distância à fonte luminosa. Por análise dos resultados obtidos, foram encontrados dois regimes diferentes. Isto acontece devido às características de fabrico da lâmpada, que fazem com o feixe luminoso não tenha o mesmo comportamento ao longo do percurso. De facto, nota-se que antes do ponto de foco da luz (sensivelmente a 10cm de distância da lâmpada) existe uma zona de sombra, que causa o aparecimento do primeiro regime. Passando o ponto de foco da luz, nota-se o aparecimento do segundo regime, descrito no gráfico 7.

Ao analisar este percebe-se que a potência é inversamente proporcional à quarta potência da distância. Isto deve-se ao facto da potência ser função do quadrado da intensidade ($P = RI^2$), grandeza que decresce proporcionalmente com o quadrado da distância. Contudo, analisando o declive do gráfico 7 é de notar um ligeiro desvio do valor esperado (3,9 ao invés de 4). Isto pode ser explicado por erros sistemáticos na realização da experiência como ruído eléctrico mas principalmente ruído luminoso (luz proveniente de outras fontes que não a lâmpada usada na experiência) que pode ter afectado as medições de forma a atenuar o decréscimo da intensidade luminosa sentida na célula.

5 Referências

- WIKIPEDIA, "Teorema de máxima potencia", http://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_m%C3%A1xima_potencia (Março 2014)
- WIKIPEDIA, "Célula solar", http://pt.wikipedia.org/wiki/C%C3%A9lula_solar (Março 2014)