

# Célula Fotovoltaica

## Laboratório de Complementos de Eletromagnetismo e Termodinâmica

### MEFT 2013/2014

Débora Barreiros, 75693 — Pedro Cal, 75699 — Tiago Costa, 75970 — Nuno Rosa, 76018  
Instituto Superior Técnico  
Turma de sexta-feira — Grupo I  
13 de Março de 2014

#### Resumo

O objetivo deste trabalho experimental foi a determinação da característica elétrica (relação tensão/corrente) da célula fotovoltaica, mostrada através dos gráficos obtidos que relacionam essas duas grandezas, para diferentes níveis de iluminação. Para além disso determinou-se a resistência de carga ótima que maximiza a potência elétrica da célula, que se revelou cada vez mais baixa à medida que se diminuía o nível de iluminação. Verificou-se ainda que a intensidade é a única grandeza que caracteriza o circuito que varia linearmente com o nível de luz. Por fim, descobriu-se um modelo para a variação da potência com a distância à fonte luminosa, em que a intensidade da luz diminui com a quarta potência da distância ao foco luminoso.

## 1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Esta experiência consiste no estudo da variação da potência elétrica cedida a um circuito por uma célula fotovoltaica, na qual se faz incidir luz proveniente de uma lâmpada. Para tal estudo faz-se variar a intensidade de luz incidente na célula.

Uma célula fotovoltaica é um dispositivo que permite a conversão direta de energia luminosa em energia elétrica. O seu funcionamento baseia-se no efeito fotovoltaico, semelhante ao efeito fotoelétrico, que resulta da luz incidente na superfície da célula, que permite o desenvolvimento de uma tensão elétrica entre dois elétrodos. A criação desta tensão permite que se dê a origem de uma corrente elétrica num circuito que esteja ligado à célula, pelo que a variação do nível de iluminação na superfície da célula pode ser avaliada através de parâmetros elétricos do circuito, como a intensidade e a potência.

Caso o circuito alimentado pela célula fotovoltaica seja um circuito resistivo, isto é, um circuito simples composto apenas por resistências elétricas, a intensidade pode ser obtida através da Lei de Ohm, uma vez conhecidas a resistência total do circuito e a tensão nos terminais da célula:

$$R = \frac{U}{I} \Leftrightarrow I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

em que  $U$  é a tensão aos terminais da célula,  $R$  é a resistência total do circuito elétrico (ver montagem) e  $I$  é a intensidade da corrente que percorre o circuito.

A potência elétrica, por sua vez, é obtida pela Lei de Joule, através de outra relação entre a resistência e a tensão:

$$P = U \cdot I \Leftrightarrow P = \frac{U^2}{R} \quad (1.2)$$

em que  $P$  é a potência elétrica do circuito.

A intensidade luminosa incidente na célula fotovoltaica depende de alguns fatores tais como a inclinação da superfície da célula em relação à fonte de luz, a distância da célula à fonte e a própria potência da fonte.

A intensidade luminosa para uma propagação com geometria esférica decai com o quadrado da distância à fonte, isto é:  $I \propto \frac{1}{d^2}$ .

## 2. MONTAGEM DA EXPERIÊNCIA

A montagem para esta experiência consiste num conjunto de dois circuitos elétricos [1]: um associado à alimentação da fonte luminosa e outro associado à célula fotovoltaica.

O circuito de alimentação da lâmpada consiste na ligação da mesma a um gerador de tensão, ligado em paralelo com um voltímetro, o que permite o controlo da diferença de potencial aos terminais da lâmpada. Esta tensão deve ser aproximadamente de 12V. O diagrama de blocos que o representa é o presente na parte superior da figura 1.

O circuito da célula é composto por duas resistências variáveis ligadas em série, controladas por uma caixa de resistências, que constitui a carga do circuito. Por sua vez, estas resistências estão ligadas aos terminais da célula. De forma a medir a tensão aos terminais da célula liga-se um voltímetro em paralelo com a mesma. Para medir a resistência imposta ao circuito, recorreu-se a um interruptor que permitia a transição entre o circuito fechado e o circuito em aberto constituído por um ohmímetro. O diagrama de blocos que representa é o que se encontra na parte inferior da figura 1.

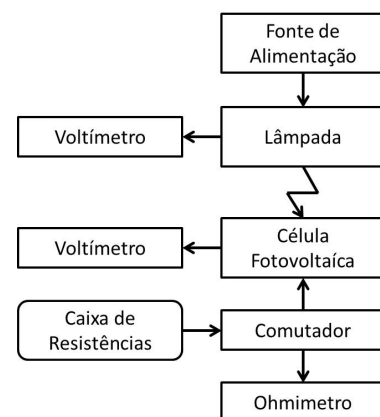


Figura 1. Diagrama de blocos da experiência

Numa primeira parte, procedeu-se à determinação da Característica Elétrica da célula fotovoltaica, medindo-se para uma vasta gama de valores de resistência (entre 200  $\Omega$  e 1500  $\Omega$ ) a tensão nos terminais da mesma. A partir desses dados, calcularam-se os valores da potência elétrica e da intensidade de corrente. Repetiu-se este procedimento para diferentes inclinações da célula, caracterizadas pelo seu ângulo  $\theta$  em relação à vertical.

Posteriormente, efetuou-se a determinação da resistência de

carga ótima, através da análise dos valores de potência elétrica do circuito. Procurou-se o valor máximo de potência para um intervalo restrito de resistências, correspondente ao valor aproximado da resistência ótima.

Numa terceira parte da experiência procedeu-se à variação da distância entre a lâmpada e a célula, medindo-se a tensão aos terminais desta última, com resistência fixa. Calculou-se depois a intensidade de corrente e potência elétrica associadas ao circuito da célula fotovoltaica para cada uma dessas distâncias.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Determinação da Caraterística Elétrica da Célula Fotovoltaica

O gráfico que contém os pares tensão/corrente obtidos na primeira parte da experiência encontra-se na figura 2.

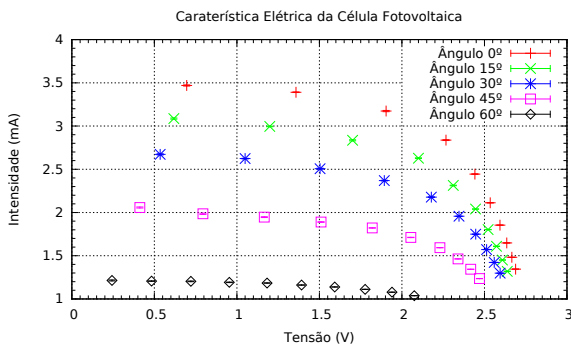


Figura 2. Plot dos valores de tensão e intensidade correspondentes

De acordo com a legenda do gráfico, podem observar-se diferentes conjuntos de pontos associados a vários níveis de iluminação.

#### 3.2. Determinação da Resistência de Carga Ótima

Representou-se graficamente a Potência Elétrica do circuito obtida nos terminais da célula em função da resistência da carga, gráfico esse que se pode ver na figura 3.

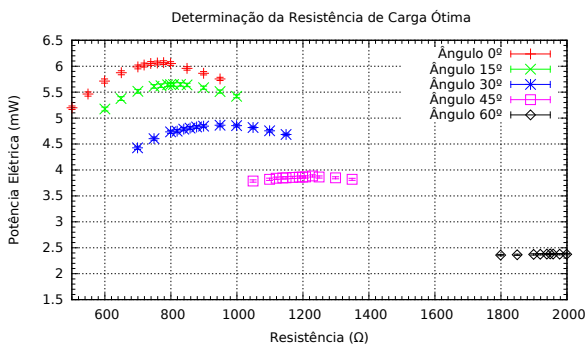


Figura 3. Plot dos valores potência elétrica em função da resistência da carga

De acordo com a legenda do gráfico, podem observar-se diferentes conjuntos de pontos associados a vários níveis de iluminação.

Os valores de resistência de carga ótima e respetivos valores de potência estão representados na tabela I.

Ângulo(°)	Res. Ótima (Ω)	Potência (mW)
0	778 ± 1	6.07 ± 0.03
15	829 ± 1	5.64 ± 0.03
30	949 ± 1	4.86 ± 0.03
45	1229 ± 1	3.88 ± 0.02
60	1949 ± 1	2.38 ± 0.01

Tabela I. Resistências Ótimas para cada ângulo

Representou-se também a potência elétrica máxima para cada nível de iluminação, e obteve-se o conjunto de pontos representado na figura 4.

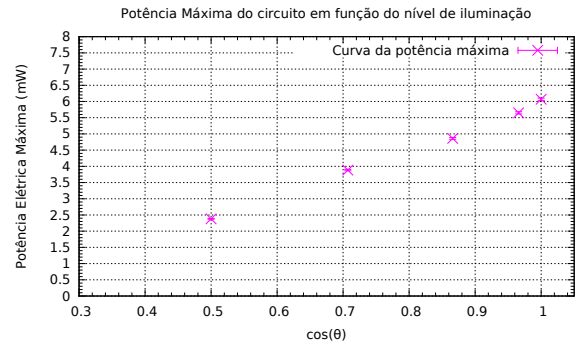


Figura 4. Plot dos valores potência elétrica máxima em função de  $\cos(\theta)$

#### 3.3. Grandezas lineares com nível de iluminação

Para cada nível de luminosidade, ou seja para diferentes valores de  $\theta$ , é possível representar a variação de diferentes grandezas, como a intensidade e a tensão.

Para a intensidade em função de  $\cos(\theta)$ , que representa a fração de potência luminosa que atinge a célula relativamente a  $\theta = 0$ , apresenta-se o gráfico 5.

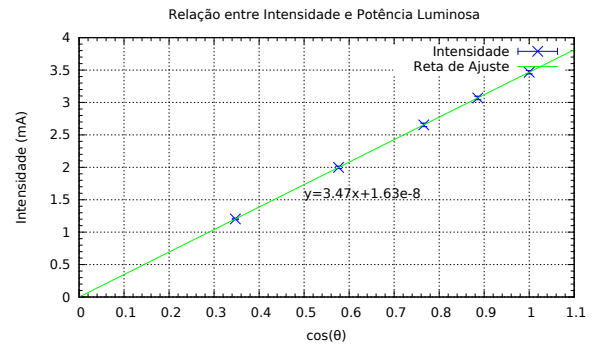


Figura 5. Plot dos valores de intensidade de corrente em função de  $\cos(\theta)$

Para a tensão em função da mesma grandeza tem-se o gráfico da figura 6.

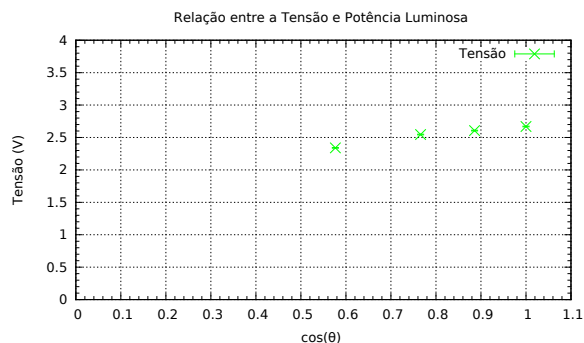


Figura 6. Plot dos valores de tensão em função de  $\cos(\theta)$

### 3.4. Lei de variação da potência com a distância à fonte luminosa

O gráfico da potência luminosa em função da distância da célula à lâmpada é dado pelo gráfico da figura 7.

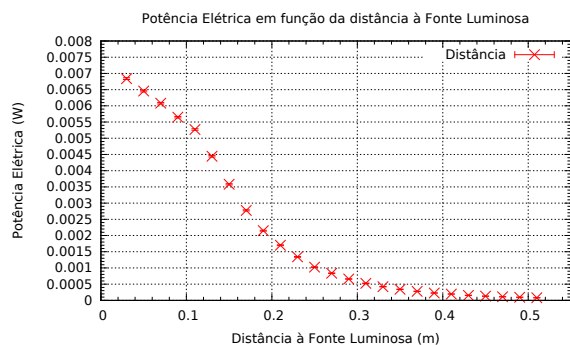


Figura 7. Plot dos valores de potencia elétrica em função da Distância

Representou-se também o logaritmo de base  $e$  da potência em função do logaritmo da distância, para os pontos situados depois do foco da lâmpada, e obteve-se o gráfico da figura 8.

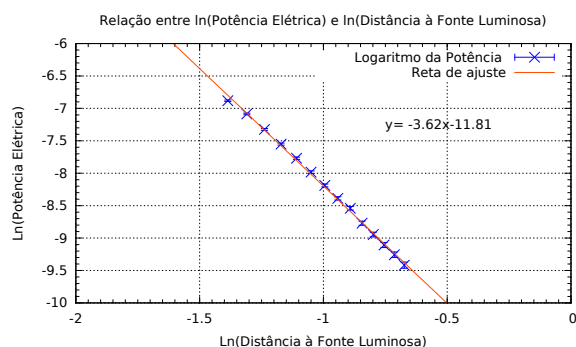


Figura 8. Plot dos valores do logaritmo da potencia elétrica em função da distância

Ajustando o foco da experiência, obteve-se o gráfico da figura 9.

## 4. ANÁLISE, CRÍTICAS E CONCLUSÃO

Esta experiência baseou-se essencialmente na recolha de dados e não tanto na adaptação dos mesmos a expressões

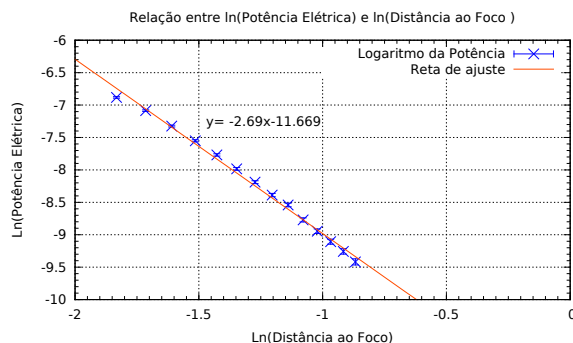


Figura 9. Plot dos valores do logaritmo da potencia elétrica em função da distância para o foco ajustado

teóricas, pelo que as conclusões que se tiram resultam puramente da análise dos gráficos que foram sendo obtidos ao longo da experiência.

Na obtenção da característica elétrica da célula fotovoltaica, na primeira parte da experiência, foi obtido o gráfico da figura 2. Neste gráfico podemos ver cinco curvas de intensidade que decresce à medida que a tensão e a resistência aumentam. Podemos ver que para inclinações da célula maiores a intensidade de corrente que percorre o circuito, para uma mesma tensão, é menor. Isto acontece pois o fluxo de eletrões na superfície da célula diminui, à medida que a luz incidente diminui, o que faz com que a corrente elétrica seja menor. Deste modo, pode concluir-se que quanto maior é a percentagem de luz que chega à célula, maior é a potência elétrica da mesma. O mesmo aconteceria num painel solar que estivesse sempre com a mesma posição ao longo do dia. A sua potência seria sempre maior quando a luz do sol cobrisse uma grande área das suas células fotovoltaicas.

A propagação de erros feita para o cálculo da intensidade é representada pelas pequenas barras verticais em cada ponto do gráfico. Os erros considerados para cada uma das grandezas relacionam-se com as incertezas associadas aos aparelhos de medida respetivos.

Analisando os gráficos da segunda parte da experiência, podemos concluir que a resistência de carga ótima aumenta com o nível de iluminação, e a potência correspondente, por sua vez, diminui à medida que o nível de iluminação diminui.

No gráfico da figura 3, podemos ver que para cada nível de iluminação, ou seja, para cada inclinação da célula, à medida que se varia a resistência da carga, a potência vai variando, atingindo um pico na resistência ótima. Esta é então a resistência que maximiza a energia do circuito da célula, e que a torna mais eficiente.

Outro aspeto que maximiza o funcionamento da célula é a mesma estar perfeitamente paralela com a direção vertical, para que um maior número de fótons lhe incida. Podemos concluir isto uma vez que, a partir do gráfico 4, obtivemos uma potência máxima de resistência ótima para um ângulo de  $0^\circ$ .

Podemos concluir ainda, pelo gráfico da figura 3, que à medida que a inclinação da célula fotovoltaica à vertical aumenta, a potência varia menos o seu valor em relação à variação da resistência, ou seja, o pico da potência para a resistência de carga ótima é mais dificilmente encontrado. Isto poderá ter que ver com a diminuição acentuada da intensidade de corrente que percorre o circuito para níveis baixos de iluminação.

Para descobrir qual das grandezas, tensão ou intensidade, varia linearmente com o nível de iluminação, temos de proceder à análise dos gráficos das figuras 5 e 6.

Para o gráfico da intensidade, foram escolhidos cinco pontos do gráfico 2, todos à mesma tensão (0.720 V). Pode verificar-se que à medida que o coseno do ângulo de inclinação com a vertical aumenta a intensidade aumenta linearmente, sendo que os pontos estão dispostos numa reta de declive 3.47 mA aproximadamente. Este declive representa a taxa de variação da intensidade com o nível de intensidade. A ordenada na origem representa a intensidade no circuito quando a célula não recebe luz. Esta ordenada é muito próxima de zero, o que sugere que a luz recebida pela célula, sem ser a que vem da fonte luminosa é quase nula. Podemos concluir então que a experiência estava bem isolada de ruído luminoso.

Por outro lado, para o gráfico da tensão em função do nível de luminosidade, para uma intensidade constante de 1.46 mA, foi possível chegar-se a um conjunto de pontos, mas desta vez apenas para quatro valores de inclinação. Os valores de tensão correspondentes à inclinação de  $60^\circ$ , tinham intensidades mais baixas que todos os pontos recolhidos para os outros ângulos, pelo que foi impossível a representação desse nível de iluminação. Mais uma vez aqui se vê que à medida que o coseno do ângulo aumenta, a tensão aumenta também, para uma resistência fixa. Isto acontece porque, quando o nível de luminosidade é maior, existe uma maior intensidade de eletrões aos terminais da célula. Pela Lei de *Ohm*, sabemos que para que a resistência se mantenha, a tensão tem de aumentar para acompanhar o crescimento da intensidade. No entanto, este crescimento não é linear, ao contrário do que acontece com a intensidade de corrente.

Para estes gráficos foram usados valores de tensão e intensidade baixos, uma vez que correspondem a zonas do gráfico 2 de pequena variação dessas mesmas grandezas entre os diferentes ângulos.

Finalmente para a última parte da experiência, pretendia-se chegar a uma lei para a variação da potência em função da distância. Teoricamente, sendo a lâmpada aproximadamente uma secção cónica de uma esfera, a intensidade de luz que irradia deveria decair com o quadrado da distância à fonte. Por sua vez, a intensidade luminosa é linear com a intensidade de corrente, tal como do verificado anteriormente. Como a potência elétrica do circuito da célula é proporcional ao quadrado da intensidade ( $P = RI^2$ ), então seria de esperar que a potência elétrica medida fosse decaindo com a potência quarta da distância.

No primeiro gráfico obtido, da figura 7, conseguem distinguir-se, claramente, duas zonas de variação dos dados: a curva formada pelos pontos registados tem, até aos 11 cm de distância concavidade voltada para baixo e depois dessa distância, concavidade voltada para cima. Isto indica uma variação no tipo de curva teórica que se adaptaria aos pontos.

Apenas a segunda parte pode corresponder a uma lei potencial, devido à forma do próprio gráfico.

A explicação para esta hipótese pode ser feita através da análise do logaritmo dos dados, cujo gráfico está na figura

8. Este conjunto de pontos é bem ajustável por uma reta de declive de módulo 3.62, o que queria dizer que a potência elétrica variaria com  $d^{-3.6}$  o que é uma boa aproximação ao modelo teórico.

No entanto, pela presença de dois regimes no gráfico, podemos também assumir a presença de um foco cerca de 9 cm à frente da fonte luminosa. Esta distância foi medida através do posicionamento de uma folha branca nas diferentes distâncias analisadas. A presença deste foco tem que ver com a natureza da lâmpada, uma vez que a sua superfície interior é espelhada e côncava. Assim, é como se à distância do foco tivessemos uma nova lâmpada que irradiasse luz a partir daí. Surgiu então a necessidade de fazer um *shift* nas medições da distância anteriores, feitas depois do foco, para que o comprimento medido fosse, efetivamente, o do foco à célula fotovoltaica.

O gráfico obtido, na figura 9, mostra uma nova lei de potencial, mas desta vez com a potência elétrica a ser proporcional a  $d^{-2.69}$ . Ora esta hipótese portanto, não funciona.

A explicação que arranjam para este problema é a de que a lâmpada não emite apenas feixes de luz na direção do espelho. Deste modo, nem todos os feixes são direcionados para um foco gerado por esse espelho. Uma grande parte destes feixes são diretamente projetados para a frente e para todas as direções radiais da frente da lâmpada. Isto foi visível quando se colocou uma folha branca no local do foco, uma vez que não houve uma zona em que a luz se anulasse completamente. Apesar de ser visível o foco, era possível também ver luz proveniente imediatamente da lâmpada.

Essa porção de luz que não converge para o foco gera uma potência elétrica que decai com  $d^{-4}$  a partir do centro da lâmpada. Esta componente da luz é então somada à componente que decai a esse mesmo ritmo, mas vinda do foco da lâmpada.

Pela altura em que a luz vinda diretamente da lâmpada passa pelo foco, a variação da potência elétrica que provoca na célula é já mais lenta, por se encontrar longe da lâmpada. Como a variação da intensidade da luz que sai do foco é maior nessa mesma posição, e a componente que vem da lâmpada é somada à que vem do foco, acontece que o decaimento da intensidade total da luz é mais lento.

A soma destas duas componentes (desfasadas da distância da lâmpada ao foco) dá origem a um decaimento mais lento da potência elétrica, justificado pelos resultados obtidos no gráfico 8, em que o declive dá ligeiramente menor que quatro (cerca de 3.6).

Podemos então chegar à conclusão que a inclusão de um foco absoluto não é a melhor solução, pelo que a lei obtida no gráfico da figura 9 não será válida.

A lei proposta é então  $P_{eletrica}(d) = \frac{e^{-11.81}}{d^{3.62}}$  (W).

As principais fontes de erro neste trabalho tiveram como principal causa a montagem em si da experiência. Em primeiro lugar, temos a escala dos ângulos que era pouco móvel e a lâmpada que não estava totalmente direita. Estes fatores influenciaram a direção dos feixes de luz e os ângulos considerados para os gráficos apresentados. Temos ainda os saltos dos valores do voltímetro que, para valores próximos de resistência, são grandes.