

Painel Fotovoltaico

Manuel Santos¹, Rúben Cardoso¹, André Duarte¹, Horácio Fernandes^{1,2}

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade Lisboa

² Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade Lisboa

Resumo

Neste artigo descreve-se uma nova montagem experimental criada para a plataforma de experiências remotas online do Instituto Superior Técnico, o e-lab. A nova montagem experimental, denominada Painel Fotovoltaico, foi criada por forma a permitir o estudo das características básicas de um painel fotovoltaico. Em particular, permite a obtenção dos objectivos definidos nas metas curriculares do 10º ano da disciplina de Física e Química A.

Assim, começa-se por apresentar a montagem experimental, os seus componentes, geometria e protocolos de utilização. A montagem permite estudar como varia a potência gerada pelo painel em função do ângulo que faz com a fonte luminosa e em função da resistência de carga e permite ainda encontrar a resistência que maximiza a potência gerada para determinadas condições de ângulo de incidência e potência luminosa. Deste modo, apresentam-se também alguns resultados obtidos utilizando a montagem seguindo estes protocolos, sendo feita uma breve análise à forma como os resultados se desviam dos modelos mais simples, em particular dos comumente utilizados no ensino secundário.

Introdução

Os painéis fotovoltaicos são uma das tecnologias de energia renovável com maior destaque em termos sociais e um dos mais reconhecíveis segmentos das energias renováveis e da transição energética. Em Portugal, no ano de 2019, estava instalada potência fotovoltaica de 905 MW, tendo sido produzidos 1 342 GWh de energia eléctrica através de painéis fotovoltaicos. Este valor representa cerca de 4,6 % de toda a energia eléctrica renovável e 2,5 % de toda a energia eléctrica produzida no país nesse ano [2], sendo que o governo ambiciona ter 80 % do mix eléctrico centrado nas energias alternativas em 2030 [3].

Assim, no actual contexto de transição energética e de acordo com os objectivos do ensino obrigatório, que pretende educar cidadãos e conscientizá-los para o uso responsável e eficiente de recursos, o estudo básico da tecnologia dos painéis fotovoltaicos faz parte das metas curriculares de 10º ano da disciplina de Física e Química A, em particular a experimentação da variação da potência de saída com a carga aplicada ao painel [4].

Deste modo, e com o propósito de facilitar o estudo desta tecnologia e de cumprir os requisitos necessários para atingir

as metas curriculares definidas para a disciplina de Física e Química A, foi criada a experiência do painel fotovoltaico para o e-lab [5]. O e-lab é um laboratório de física, criado e mantido no Instituto Superior Técnico, que disponibiliza gratuitamente e remotamente, através da *internet*, mais de 40 montagens experimentais idealizadas para permitir o estudo de variadas áreas da física, organizadas em 4 laboratórios diferentes – básico, intermédio, avançado e o pêndulo mundial.

Descrição da Experiência

Do ponto de vista do utilizador, a experiência é constituída por dois blocos complementares. A montagem experimental em si, localizada no Instituto Superior Técnico e controlável remotamente, e o cliente, uma aplicação Java que constitui a “sala de controlo” e permite (i) configurar a montagem experimental, (ii) recolher em tempo real os dados gerados por esta e (iii) visualizar gráficos com a evolução temporal das variáveis relevantes (iv) bem como o vídeo em direto da mesma.

Montagem Experimental

A montagem experimental da experiência do painel fotovoltaico é constituída por 6 elementos principais:

- Um painel de LED (*Light-Emitting Diode* – Díodo Emissor de Luz) RGB (*Red-Green-Blue* – Vermelho-Verde-Azul) modelo SMD5050, dispostos numa matriz de 18x9 totalizando 486 LED e ocupando uma área de 145x90 mm²
- Um painel fotovoltaico com dimensões 150x100 mm²
- Uma placa de controlo equipada com microcontrolador dsPIC30f4013
- Uma placa de eletrónica de interface entre a placa de controlo e os painéis de LED e o painel fotovoltaico
- Um servo-motor que controla a posição angular do painel fotovoltaico
- Um computador Raspberry Pi 3 modelo B que faz de interface entre os utilizadores e o microcontrolador através da internet

Na figura 1 está exemplificada, numa foto, a montagem experimental em operação com uma mistura de diferentes intensidades RGB.



Figura 1 - Montagem experimental da experiência do painel fotovoltaico

A montagem foi construída de forma a que fosse possível variar os seguintes parâmetros da experiência:

- A intensidade de cada uma das cores dos LED entre 0 e 255 (vermelho, verde e azul);
- O ângulo do painel fotovoltaico relativamente ao painel de LED, como apresentado na figura 2;
- O valor da resistência equivalente de carga do painel fotovoltaico, que varia de 1 ohm (na prática um curto-circuito face à impedância do painel) à situação de circuito aberto ($>1,5 \text{ k}\Omega$).

A configuração dos parâmetros da experiência não é totalmente livre, estando implementados 3 protocolos de execução:

- Variação do ângulo do painel fotovoltaico – Neste protocolo o ângulo do painel é variado de -20° a 100° , sendo possível configurar a intensidade luminosa de cada cor do painel de LEDs e o valor da resistência de carga, ambas constantes durante o desenrolar da experiência.
- Variação da resistência de carga – Neste protocolo o valor equivalente da resistência de carga é variada de 0 %, situação de quase curto circuito, a 100 %, situação em que vale cerca de $1.5 \text{ k}\Omega$, sendo possível configurar a intensidade luminosa de cada cor do painel de LED e o ângulo que o painel fotovoltaico faz com o painel de LED.
- Procura de máximo de potência – Neste protocolo é variada a resistência de carga de forma a encontrar o ponto que gera a potência de saída máxima, sendo possível configurar a intensidade luminosa de cada cor do painel de LED e o ângulo que o painel fotovoltaico faz com o painel de LED. De forma a encontrar o máximo, a resistência de carga é aumentada de 10 % em 10 %, do valor total, até que se encontre o ponto de inflexão e a potência de saída comece a diminuir. Neste momento, a resistência de carga é diminuída e parte

do intervalo é re-testado mas em segmentos de 2 % em 2 %. Por fim, o último ponto de amostragem que a experiência retorna ao utilizador é o ponto a que corresponde a carga que maximiza a potência gerada pelo painel.

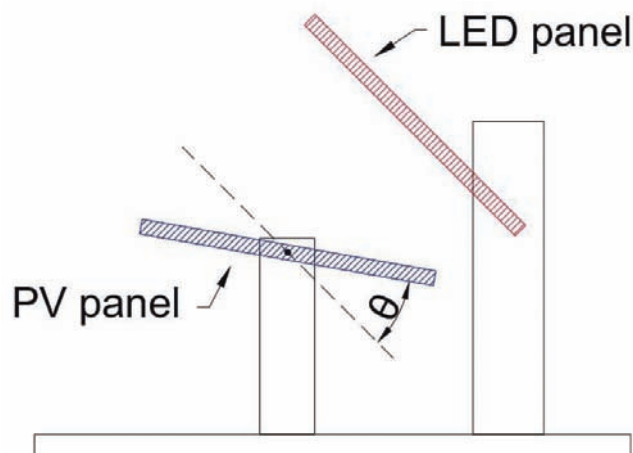


Figura 2 - Esquema da geometria da montagem experimental

É importante notar que a utilização destes protocolos experimentais permite cumprir as metas definidas para a disciplina de FQ-A [4].

Sala de controlo

A aplicação cliente do e-lab permite aos utilizadores configurarem e recolherem os dados dos vários aparatos experimentais. Apresenta-se na Figura 3 um *screenshot* do cliente do e-lab. Como se pode verificar na figura, há 4 separadores: (i) configurador, (ii) resultados, (iii) gráficos e (iv) fila de utilizadores, sendo os 3 primeiros os mais relevantes para a utilização da experiência.

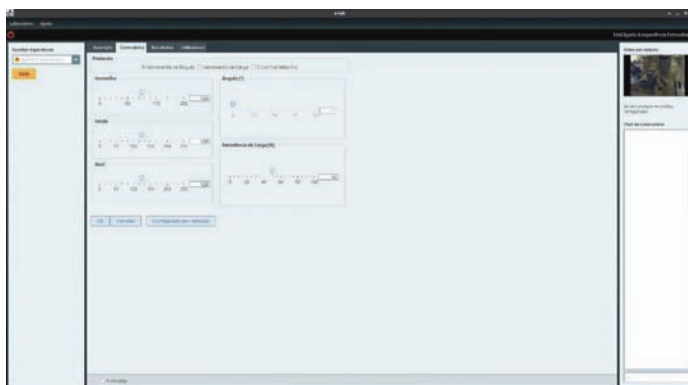


Figura 3 - *Screenshot* da aplicação cliente no e-lab. Neste ecrã, mostram-se os parâmetros que é possível controlar na experiência, bem como os separadores onde é possível recolher os resultados da execução experimental e os respectivos gráficos

No separador “configurador” é possível escolher qual o protocolo a correr e quais os valores que os diferentes parâmetros podem assumir. Em particular, no caso da cor dos LED, a sua seleção segue o modelo RGB, pelo que os valores de intensidade variam de 0, caso em que os LED dessa cor estão apagados, a 255, caso em que o brilho desse LED é máximo. É possível utilizar uma ferramenta *color picker*, facilmente encontrada num motor de busca, para verificar no computador qual a cor a que corresponde a configuração pedida.

No separador “resultados” são disponibilizados os dados experimentais obtidos durante a execução da experiência. Em particular, são recolhidos o ângulo do painel fotovoltaico e a corrente, tensão e potência produzidas, bem como as estimativas de erro a elas associadas.

No separador “gráficos” são mostrados alguns gráficos que representam os dados obtidos: (i) o gráfico da evolução do ângulo do painel, (ii) o valor percentual da resistência de carga relativamente ao seu valor máximo, (iii) o valor da corrente gerada, (iv) da tensão produzida e (v) da potência de saída, todos eles em função do tempo de execução da experiência.

Resultados experimentais

A execução dos três protocolos experimentais descritos permite a recolha de dados para a caracterização da resposta do painel fotovoltaico. Deste modo, executou-se cada um deles por forma a exemplificar os resultados que é possível obter.

Varrimento da resistência de carga

Os painéis fotovoltaicos têm uma resposta à resistência de carga que é característica deste tipo de dispositivos.

Configurando a experiência para executar o protocolo de varrimento de carga, neste caso particular realizado com ângulo 0° e com os LED na sua intensidade máxima, e fazendo o gráfico da potência gerada em função da resistência de carga, eliminando o tempo, obtém-se um gráfico que é do tipo apresentado na Figura 4.

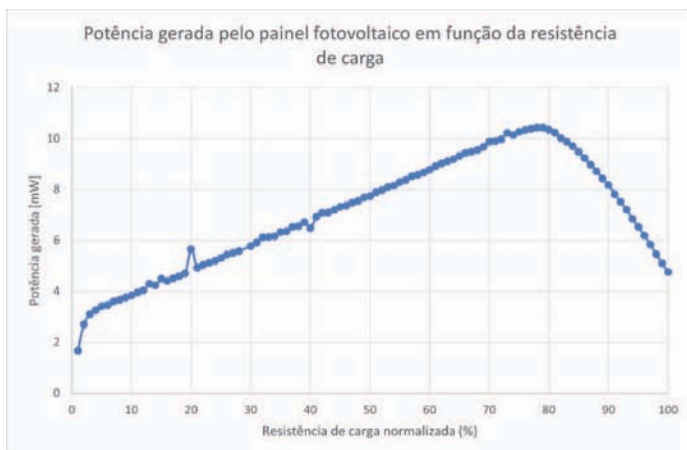


Figura 4 - Potência gerada pelo painel fotovoltaico em função da resistência da carga. Apresentam-se os valores da resistência de carga como percentagem do seu valor máximo.

Verifica-se que inicialmente a potência gerada aumenta com a resistência de carga, já que o painel mantém aproximadamente constante a corrente aos seus terminais mas a tensão gerada aumenta. No entanto, a partir de um certo valor de carga, o painel atinge o seu máximo de corrente gerada, pelo que um aumento da carga resulta numa diminuição da tensão aos terminais do painel e consequentemente numa diminuição da potência gerada pelo mesmo.

Este resultado é bastante importante para a operação de um painel fotovoltaico, já que se verifica que para obter a potência máxima, ou seja, operar o painel no ponto de eficiência máxima, é necessário adaptar a resistência de carga à impedância do painel que se relaciona diretamente com a potência luminosa incidente.

Adicionalmente pode ser calculada essa mesma impedância através da lei de Ohm uma vez que se dispõe da tensão e corrente geradas pelo painel.

Procura de máximo de potência

Executando o protocolo de procura de resistência de carga que gera o máximo de potência é possível obter directamente do cliente o valor que maximiza a potência para o ângulo e luminosidade configurados, lendo, como já explicado, o valor da resistência de carga do penúltimo ponto amostrado.

Utilizando os valores do protocolo anterior, verifica-se que o máximo ocorre para $\sim 80\%$, o que é consistente com o gráfico da figura 4. Aplicando a lei de Ohm aos valores de tensão e corrente gerados pela experiência, conclui-se que o valor da resistência de carga óptima é de 571.

O valor de resistência de carga que maximiza a potência gerada poderia também ser obtido lendo directamente o gráfico produzido no protocolo anterior.

Varrimento do ângulo

Variando o ângulo e mantendo constantes as condições de iluminação, é possível verificar de que forma varia a potência produzida pelo painel em função do ângulo de iluminação. Neste caso, a experiência foi executada uma vez para cada cor, com a potência máxima, de forma a evidenciar quaisquer diferenças entre cores. Apresentam-se na Figura 5 os resultados experimentais obtidos.

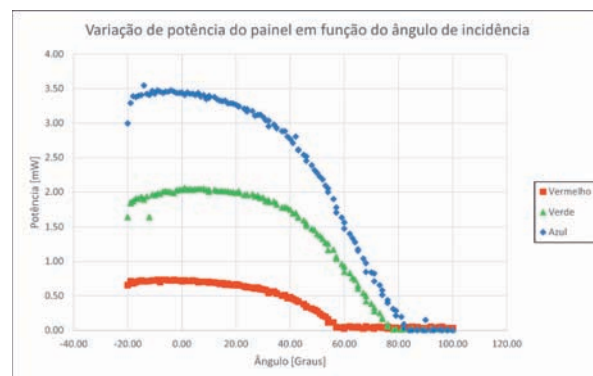


Figura 5 - Potência de saída do painel em função do ângulo de iluminação e da cor da luz.

Verifica-se que há uma grande disparidade de potências de saída, sendo que a potência produzida com a luz azul é aproximadamente seis vezes a da luz vermelha. Esta é originada por uma combinação de fatores, sendo os mais importantes (i) as diferentes potências luminosas dos LED de cada cor, (ii) a diferente eficiência do painel para diferentes comprimentos de onda e a diferente direcionalidade da luz emitida pelos LED de cada cor devido ao espalhamento.

De forma a evidenciar a variação angular, os dados obtidos foram normalizados dividindo pelo valor máximo. Apresenta-se o resultado na Figura 6.

Como é possível constatar na Figura 6, a variação angular da potência de saída do painel é semelhante para as três cores.

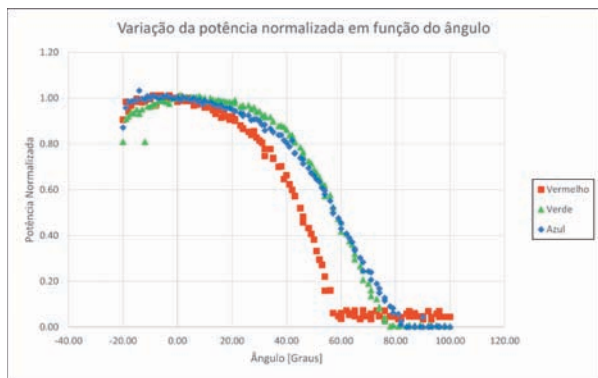


Figura 6 - Variação da potência de saída em função da cor e do ângulo de iluminação. Valores de potência normalizados valor máximo de cada cor.

Análise da potência gerada em função do ângulo de incidência

De forma a caracterizar esta variação, foram ajustados aos dados dois modelos, um mais simples outro mais complexo.

O modelo mais simples que usualmente se utiliza para caracterizar este fenómeno vem do cálculo da “secção eficaz” do painel num plano paralelo ao plano dos LED e de se assumir que a radiação incidente é constituída por raios paralelos entre si e perpendiculares ao plano do painel de LED. Este modelo origina a expressão $P = A \times \cos(\theta)$. Verificou-se que o modelo não se ajusta perfeitamente aos dados, principalmente por não ser válida a assunção que os raios são paralelos entre si devido à relativa proximidade da fonte de luz e à difusividade da luz emitida. Assim, modificou-se o modelo para $P = A \times \cos(\omega \times \theta)$. Neste modelo, o parâmetro ω codifica a possibilidade de, devido aos efeitos da pouca direcionalidade da luz emitida, a variação angular efetiva da potência ser diferente da variação angular real do painel.

O modelo mais complexo procura não só contabilizar a variação “secção eficaz” do painel mas também a variação da transmissibilidade da luz na interface ar-vidro com o ângulo [6] [7], sendo a expressão associada

$$P = A \times \left(1 - \frac{e^{-\frac{\cos(\omega \times \theta)}{\alpha_\tau}} - e^{-\frac{1}{\alpha_\tau}}}{1 - e^{-\frac{1}{\alpha_\tau}}} \right)$$

onde no termo angular se inseriu o termo ω pelas razões explicadas acima. O parâmetro α_τ no modelo codifica a transmitância do painel. Neste modelo, painéis mais transmissivos têm parâmetro α_τ menor, sendo que a bibliografia [6] indica para o parâmetro α_τ valores no intervalo [0,17;0,27]. Note-se que, ainda assim, este modelo continua a assumir a existência de raios paralelos já que foi criado para modelar painéis iluminados pelo Sol, situação onde a existência de raios paralelos é uma boa aproximação.

Apresenta-se na Figura 7 os ajustes realizados para cada cor.

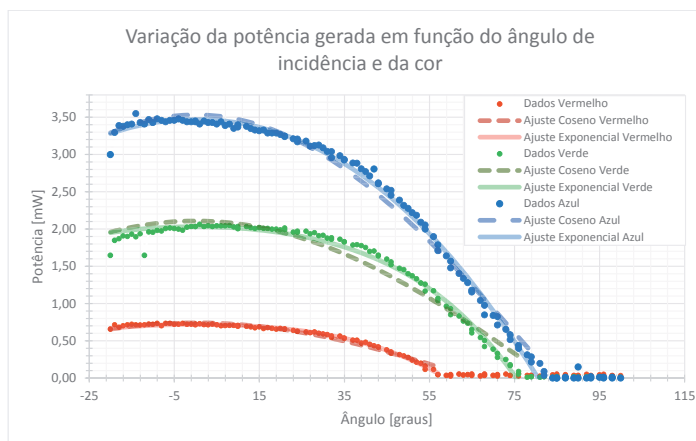


Figura 7 - Ajustes dos modelos aos pontos experimentais para cada cor. A tracejado o modelo mais simples e a cheio o mais complexo.

Para o modelo simples, legendado nos gráficos como “Cosseno”, obteve-se para parâmetros $A = [3,53; 2,11; 0,74]$, $\omega = [1,07; 1,08; 1,37]$ e $R^2 = [0,991; 0,958; 0,974]$ para as cores Azul, Verde e Vermelho, respectivamente. Verifica-se que todos os ajustes têm valores de R^2 próximos de 1, pelo que se ajustam bem aos dados recolhidos. Analisando os valores obtidos para os parâmetros, todos os valores do parâmetro A se aproximam de 1 como esperado, já que os dados experimentais foram normalizados, e os valores ω são próximos de 1, mas maiores que 1. Este resultado mostra a influencia da luz difusa como explicado na análise de resultados do modelo complexo.

Para o modelo mais complexo, legendado nos gráficos como “Exponencial”, obteve-se para parâmetros $A \in [3,47; 2,03; 0,72]$, $\omega \in [1,12; 1,19; 1,53]$, $\alpha_\tau \in [1,56; 0,68; 0,76]$ e $R^2 = [0,996; 0,987; 0,994]$ para as cores Azul, Verde e Vermelho, respectivamente. Estes valores de R^2 são também próximos de 1, mas superiores aos valores do modelo simples. Este resultado é concordante com os gráficos, onde facilmente se verifica que o modelo complexo assume em cada ponto valores mais próximos dos recolhidos experimentalmente. Escrutinando os valores obtidos para os parâmetros, é possível mais uma vez encontrar a influência da presença de luz que não se pode considerar como sendo de raios paralelos. Foram mais uma vez encontrados valores de ω superiores a 1, tal como no modelo simples, e valores de α_τ muito superiores aos da referência bibliográfica [6].

A explicação encontrada para os resultados obtidos no parâmetro ω em ambos os modelos e em α_τ no caso do modelo mais complexo, pode ser facilmente entendida com recurso à Figura 8. Nesta representa-se a fonte luminosa a iluminar o painel. Este encontra-se representado pelo retângulo branco num ângulo de 0° e num outro ângulo diferente de 0° . No caso de a radiação ser constituída por raios paralelos, a iluminação do painel poderia ser representada como o somatório de N fontes só a emitirem o raio directo, identificado com o número 1. No caso de radiação dispersa, a iluminação do painel pode ser representada como o somatório de N fontes a radiarem com uma certa distribuição angular, como ilustrado pela presença dos raios 2 e 3. No entanto, verifica-se que, à medida que o ângulo do painel aumenta, a luz dispersa sofre 2 fenómenos não encontrados no caso de raios directos

(como no caso solar): o primeiro deriva de alguns raios que antes iluminavam o painel deixarem de o fazer como representando pelo raio 3. Este fenómeno explica o parâmetro ser superior à unidade, já que estes raios extra mais depressa deixam de iluminar o painel que os paralelos, em particular os que se situam no extremo da zona iluminada. Quanto ao facto do parâmetro ser muito maior que o indicado na referência bibliográfica, este pode ser explicado por raios como o representado por 2: verifica-se com o aumento do ângulo do painel, existir uma incidência cada vez mais tangente no painel, o que faz com que a sua transmissibilidade diminua [6]. Este fenómeno acontece para um conjunto grande de raios para cada uma das fontes, o que leva ao ângulo de incidência “médio” ser superior no caso de luz dispersa do que se forem raios paralelos, em que todos os raios têm ângulo de incidência igual ao do painel. Consequentemente, o modelo acaba por representar o painel como sendo mais refletivo que para os valores nominais. Verifica-se que não é o painel que tem refletividade extraordinária. A iluminação é que, por ser dispersa em relação aos esperados raios paralelos do sol, atingem o painel com um ângulo médio superior ao ângulo do painel e, por isso, é mais reflectida do que aconteceria apenas com raios paralelos.

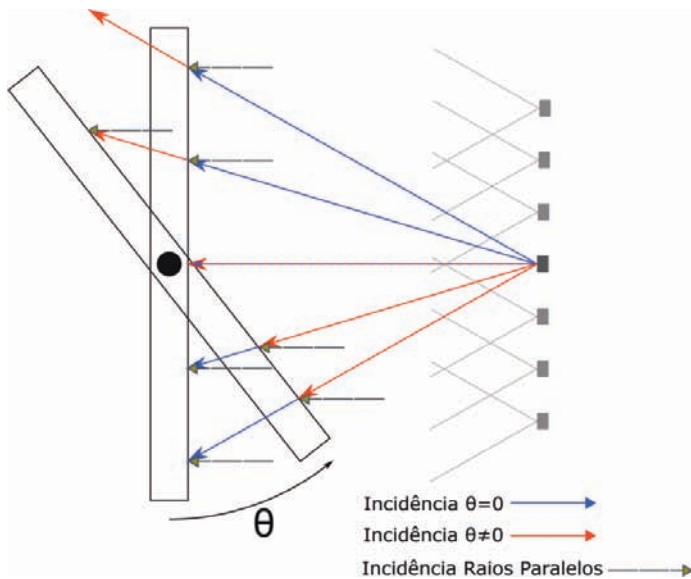


Figura 8 - Esquema da incidência dos raios luminosos: este caso distingue-se dos raios solares porque devido à sua geometria os mesmos não são paralelos. Evidencia-se na figura os vários ângulos possíveis de incidência dum led particular em duas situações distintas de posicionamento do painel.

Os diferentes valores de ω e α_{τ} encontrados para as diferentes cores podem ser explicados por diferentes construções nos LED de cada cor, nomeadamente a nível da direção do máximo e da direcionalidade da luz emitida.

Conclusão

A experiência do painel fotovoltaico do e-lab permite o estudo das características básicas de um painel fotovoltaico, sendo possível, em particular, atingir as metas definidas no plano curricular de FQ-A[4]. Para além deste estudo básico, verificou-se também que as particularidades da experiência possibilitam estu-

dos mais profundos relativamente (i) à validade da aproximação de raios paralelos frequentemente utilizada, (ii) a influência da luz dispersa na experiência e nos resultados obtidos, (iii) a compreensão do funcionamento dos controladores de carga solares (MPPT) e (iv) por último a influência do comprimento de onda na eficiência das células fotovoltaicas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto PTDC/CED-EDG/31480/2017.

Bibliografia

- [1] Renewable Capacity Statistics 2021, International Renewable Energy Agency (IRENA), IRENA 2021, <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>, acessado 4/05/2021
- [2] Produção de energia eléctrica: total e a partir de fontes renováveis, PORDATA - Base de Dados Portugal Contemporâneo, Fundação Francisco Manuel dos Santos, <https://www.pordata.pt/Portugal/Produ%C3%A7%C3%A3o+de+energia+el%C3%A9ctrica+total+e+a+partir+de+fontes+renov%C3%A1veis-1127>, acessado 4/05/2021
- [3] Matos Fernandes: “Em 2030 teremos 80% da eletricidade produzida em Portugal vinda de renováveis”, Rosália Amorim, Diário de Notícias, <https://www.dn.pt/edicao-do-dia/12-dez-2020/matos-fernandes-em-2030-teremos-80-da-eletricidade-prodizada-em-portugal-vinda-de-renovaveis-13130755.html>, acessado 13/12/2020
- [4] Aprendizagens Essenciais – 10ºAno Física e Química A, Direção-Geral da Educação, Ministério da Educação, https://www.dge.mec.pt/sites/default/files/Curriculo/Aprendizagens_Essenciais/10_fq_a.pdf, acessado 16/12/2020
- [5] e-lab: o laboratório online, Horácio Fernandes, SC Leal, João Paulo Leal (2010), Gazeta de Física, vol. 33
- [6] Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Antonio Luque; Steven Hegedus (editors), 2011, 2 Edition John Wiley & Sons
- [7] Fresnel Equations, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations#Power_\(intensity\)_reflection_and_transmission_coefficients](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations#Power_(intensity)_reflection_and_transmission_coefficients), acessado a 11/9/2020



Manuel Santos, é aluno de 5º ano do Mestrado de Engenharia Aeroespacial no Instituto Superior Técnico.

Colaborador no projecto e-lab, tendo contribuído no desenvolvimento de experiências, na criação de conteúdo para a wiki do projecto e na manutenção dia-a-dia das experiências e da infraestrutura IT do laboratório. As suas principais áreas de interesse são a física experimental e a computação.



André Duarte, completou o mestrado em Engenharia Física Tecnológica no IST e é desde 2007 investigador júnior no IPFN, inserido no grupo de engenharia e na equipa de informática.

Para além do tokamak ISTTOK, trabalhou também em projetos internacionais de investigação de fusão nuclear, como o tokamak Compass e atualmente o acelerador LIPAc. Tem igualmente colaborado, desde 2005, no projeto do e-lab, inicialmente criando uma das experiências e mais recentemente integrando experiências novas na plataforma. As suas principais áreas de interesse são programação, controlo de diagnósticos, aquisição e partilha de dados experimentais.



Rúben Cardoso, foi aluno de Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico.

Desenvolveu a plataforma informática AskTec, que tem por objetivo principal a aproximação dos alunos do secundário ao ensino no IST. Dedicase também a ações de divulgação científica, das quais se destacam a participação na Semana da Física no IST. Interessa-se pela Física enquanto ciência experimental, com particular ênfase na resolução de problemas através da aplicação de tecnologias.



Horácio Fernandes, é professor associado do departamento de física do IST e investigador no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear onde coordena a atividade do tokamak ISTTOK. Em 1999 criou o e-lab, laboratório remoto do IST, com acesso livre. Mantém igualmente uma regular participação em divulgação científica. Foi

membro do "Technical Advisor Panel" da agência europeia para o ITER (F4E) e é investigador coordenador duma atividade de pesquisa da IAEA