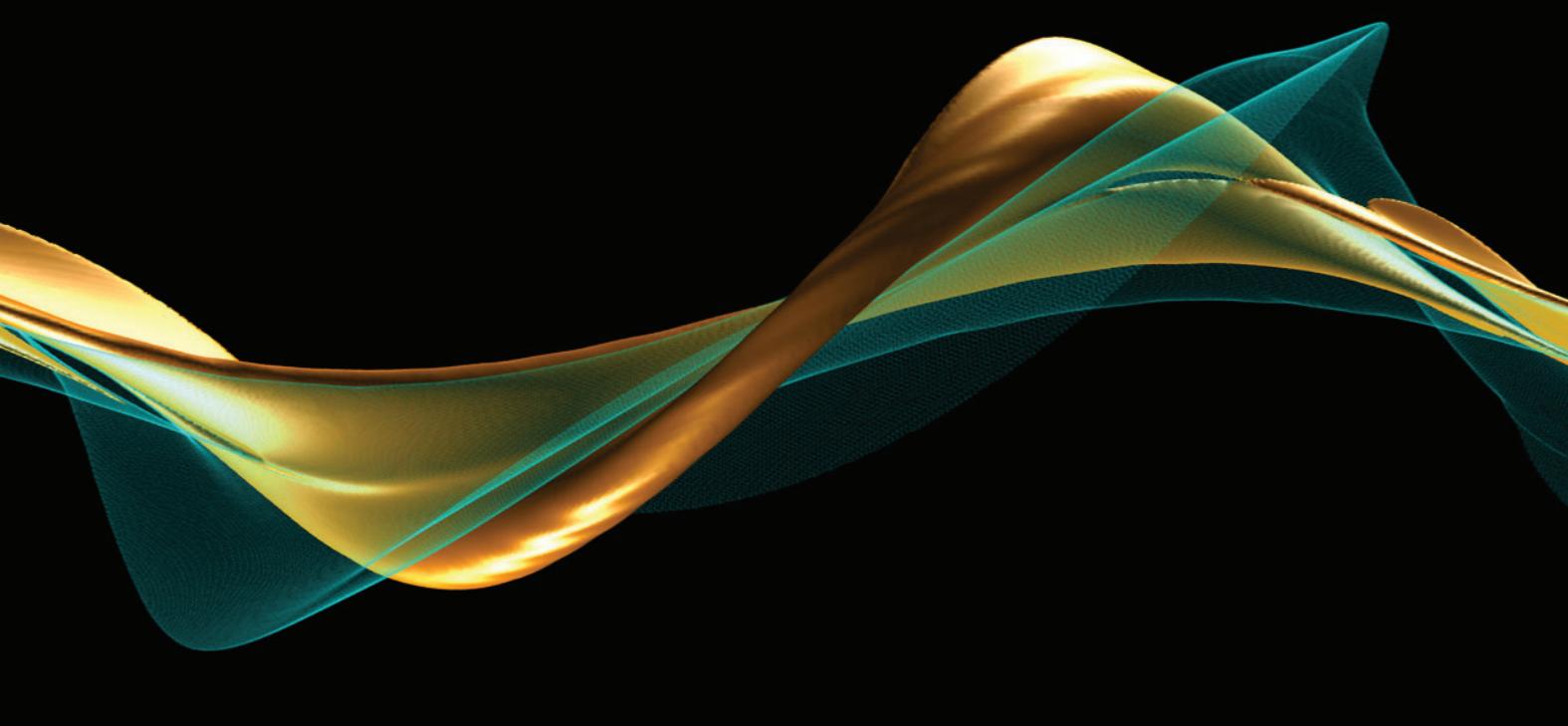


# PULSAR

| EDIÇÃO 41 | MARÇO 2021 | DISTRIBUIÇÃO GRATUITA |





**Destaque acima:** Jorge Vieira, Ricardo Fonseca, Miguel Pardal e José Tito-Mendonça descreveram um mecanismo de superradiância em plasmas que usa feixes de partículas carregadas moduladas transversalmente e não longitudinalmente [Nature Physics, 17, 99-104]

Fonte: GOLP - Group of Lasers and Plasmas (Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, IST), 2020

**Imagen de capa:** Um astronauta em Marte, visto através da janela de uma nave espacial (ilustração por Joby Harris).

Créditos: NASA/JPL-Caltech

## Apoio Financeiro



## Parceiros



## Ficha Técnica

**Direção:** Alexandre Barbosa e Inês Rainho

**Equipa:** Alexandre Barbosa, Ana Martins, Francisca Paiva, Inês Rainho e Margarida Pereira

### Redação:

Alejandro T. Forné, Ana Mourão, Anant Kumar, António Onofre, António P. Morais, Bernardo Barbosa, Carlos Couto, Dinis Rocha, Diogo Pires, Dulce Conceição, Felipe F. Freitas, Filipa Valente, Guilherme Milhano, Inês Rainho, João Dinis Álvares, João Fonseca, João Gonçalves, José A. Font, José Maria Cruz, José Sande Lemos, Luís Oliveira e Silva, Maria J. Beira, Mário Pimenta, Miguel Cunhal, Óscar Amaro, Osvaldo G. Freitas, Patrícia Gonçalves, Pedro Cosme e Silva, Pedro J. Sebastião, Solange Nunes, Teresa Peña, Vasco Guerra, Vítor Cardoso, Yasser Omar

### Comissão Científica:

Bruno Gonçalves (Fusão Nuclear), Diana C. Leitão (Nanotecnologias), Filipe Mendes (Energia), João M. Dias (Ótica e Lasers), Miguel Zilhão (Astrofísica e Gravitação), Mário Pimenta (Física de Partículas), Rui Dilão (Biofísica e Sistemas Dinâmicos), Vasco Guerra (Física de Plasmas), Vítor R. Vieira (Física da Matéria Condensada)

### Transcrição e Tradução da Entrevista:

Ana Martins e Margarida Pereira

## Arte

**Design e Montagem:** Francisca Paiva

**Cartoon (Einstein e Henri Bergson):** Francisca Paiva

## Contacto

**Site:** <http://pulsarnfist.pt>

**Facebook:** <https://www.facebook.com/pulsarmag>

**e-mail:** [pulsar.nfist@gmail.com](mailto:pulsar.nfist@gmail.com)

**Morada:** Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais 1, Edifício Ciência - Departamento de Física, 1049-001 Lisboa

**Telefone:** 218419075 **Ext:** 3075

## Índice

### 4 Breves

### 5 DIY Physics: Bolhas de Sabão Mágicas

### 6 Viver em Marte

### 10 Brilhante Grafeno

### 12 AI, O que vai ser da Física?

### 13 O Modelo de Hodgkin-Huxley

### 15 A Física e a Covid-19

### 19 Protões Contra o Cancro

### 22 Desigualdades de Bell para os Alunos Não-Quantizados

### 24 Entrevista a William Magwood

### 28 A Origem Evolutiva da Linguagem

### 30 A Filosofia e a Ciência

### 31 Deep Learning e Detecção de Ondas Gravitacionais

### 33 Agenda Científica

### 34 Jorge Dias de Deus (1941-2021)

## Editorial

Ao longo desta edição, preparada por uma equipa que nunca se reuniu presencialmente, convidamos-te a olhar para o futuro e descobrir como podemos produzir oxigénio em Marte e combustível para regressar a casa usando plasmas; a compreender a física do grafeno e as suas inúmeras aplicações; os desafios e vantagens da energia de fissão nuclear; e como os protões ajudam a tratar o cancro. A inteligência artificial permite-nos fazer coisas incríveis, como detectar ondas gravitacionais, e acreditamos que pode mesmo mudar a forma como fazemos Física.

A Física ajuda-nos a compreender a dinâmica da pandemia de COVID-19 que todos vivemos, o que nos permite construir modelos robustos e tomar melhores decisões. A propagação de sinais em neurónios ou a origem evolutiva da linguagem são outros exemplos de fenómenos que um físico curioso pode, talvez até melhor que ninguém, explicar. Através de uma experiência de pensamento, convidamos-te ainda a entender as desigualdades de Bell — não é preciso saberes Mecânica Quântica! —, a fazer bolhas de sabão mágicas e a refletir sobre a relação entre a Filosofia e a Ciência.

No dia 1 de fevereiro, recebemos a triste notícia do falecimento do Professor Jorge Dias de Deus. Embora não tenhamos tido a oportunidade de o conhecer, devemos-lhe muito: desde a possibilidade de escolher o curso que frequentamos, até, em boa parte, a existência do NFIST. Além do mais, sabemos que foi graças aos seus esforços e de uma geração de que fez parte que é hoje possível fazer ciência em Portugal. Acreditamos que é importante dar a conhecer, pela voz de alunos, colegas e amigos, os cientistas portugueses, como JDD, responsáveis pela valorização da investigação científica e de um ensino superior de qualidade no nosso país, porque lembrá-los é uma forma de não esquecer que só continuando a investir em ciência é que é possível manter aquilo que lutaram para construir.

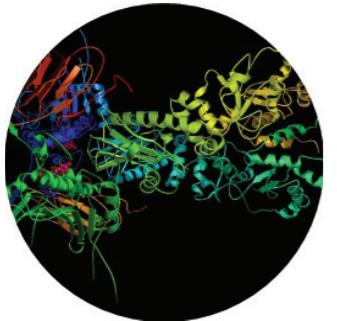
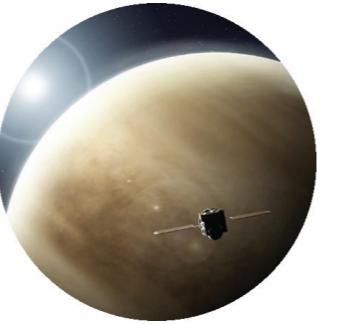
Até à próxima,

A Direção da PULSAR

## Fosfina em Vénus

Foi publicado um estudo sobre a descoberta de fosfina na atmosfera venusiana. Tanto o *Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array* no Chile, como o *James Clerk Maxwell Telescope* no Havaí, observaram que a luz estava a ser absorvida em comprimentos de onda correspondentes a uma concentração de fosfina de 20 partes por mil milhões na atmosfera. Esta surpreendente descoberta constitui um potencial indicador de vida em Vénus! A fosfina é um tóxico componente de hidrogénio e fósforo produzido por alguns organismos terrestres anaeróbicos. Clara Sousa-Silva, astrofísica molecular portuguesa, é co-autora do estudo publicado e afirma que o próximo passo será confirmar se a fosfina detetada provem, de facto, de uma fonte biológica.

[Nature 586, 182-183]



## AI e a Estrutura de Proteínas

A empresa DeepMind apresentou em 2020 o programa AlphaFold que dá um passo gigantesco para resolver um dos maiores problemas da biologia. Este programa usa técnicas de aprendizagem automática, baseadas em redes neurais, para determinar a forma 3D de uma proteína e a forma como esta se enrola sobre si mesma. Em alguns casos, as estruturas preditas pelo AlphaFold são indistinguíveis das estruturas obtidas com os métodos experimentais mais dispendiosos. Assim, a Inteligência Artificial abre portas para novas formas de estudar bioengenharia, acelerando a investigação e potenciando a produção de novos fármacos. "Muitas vezes, as discussões sobre a Inteligência Artificial focam-se nos riscos e nos problemas que a tecnologia levanta, ao criar visões distorcidas da realidade, invasões de privacidade ou desemprego. Mas é importante lembrar que a razão que levou ao desenvolvimento desta tecnologia é a esperança de que ela será útil e benéfica para a humanidade, ao permitir-nos fazer novas descobertas científicas, criar novos modelos de negócio e descobrir novas soluções para problemas que, de outra forma, não conseguíramos resolver," disse Arlindo Oliveira, professor no IST e investigador no INESC para o jornal Público.

[Nature 588, 203-204] e [Público, 7-12-2020]

## Prémio Nobel da Física para Buracos Negros

A área da Astrofísica, Gravitação e Cosmologia foi novamente distinguida pela Academia Nobel ao conceder o Prémio Nobel da Física a Roger Penrose, "pela descoberta de que a formação de buracos negros é uma previsão robusta da teoria geral da relatividade", e a Reinhardt Genzel e Andrea Ghez, "pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro de nossa galáxia". Um artigo do Comité Nobel da Física divulgado pela Academia Sueca cita vários artigos científicos, entre os quais um artigo da autoria de José Sande Lemos, professor catedrático do IST e presidente do CENTRA, e de Carlos Herdeiro, investigador coordenador do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro que já trabalhou no CENTRA. O artigo tinha sido publicado na "Gazeta de Física" em 2018 com o título "Buraco negro 50 anos depois: gênese do seu nome".

[Nature 586, 347-348] e [Gazeta da Física, 41, 2]



## Producir Energia a partir da Fusão Nuclear

SPARC foi o nome escolhido para a nova experiência de fusão nuclear que está a ser desenvolvida por uma equipa do Massachusetts Institute of Technology, em parceria com Commonwealth Fusion Systems. O objectivo atual é validar a física que está por detrás deste complexo tokamak. Depois de meses de intensa investigação foram publicados 7 artigos escritos por 47 investigadores de 12 instituições distintas. Este conjunto de artigos é fundamental para ter previsões do comportamento da experiência analizando os desafios que estão por detrás da sua construção e funcionamento. A investigação feita relativamente à física dos iões rápidos utilizou modelação numérica com o código CASTOR-K, desenvolvido pelo IPFN - Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, unidade de investigação do IST.

[Journal of Plasma Physics 86, 5]



## DIY Physics: Bolhas de Sabão Mágicas

por Bernardo Barbosa

Aluno do 4º ano de MEFT, Instituto Superior Técnico



**D**e certeza que já te cruzaste várias vezes com bolhas de sabão, quer seja a lavar as mãos (como recomendamos vivamente nos tempos que decorrem), quer seja a tomar banho, ou até mesmo a observar crianças a brincar na rua com pequenos tubos cheios de água com sabão. Em qualquer dos casos, uma das mais notáveis características destas bolhas é certamente a sua forma. Mas o que faz com que uma bolha de sabão a voar pelo ar fique com uma forma esférica essencialmente perfeita?

A resposta a esta pergunta obriga-nos a olhar para a água com mais atenção. Cada molécula de água é composta por 1 átomo de oxigénio e 2 de hidrogénio ( $H_2O$ ). Geometricamente, podemos pensar nesta molécula como uma grande bola (oxigénio) com duas bolas pequenas (hidrogénio) presas e desalinhadas, mais ou menos como a forma da cabeça do rato Mickey. Esta forma assimétrica da molécula faz com que a distribuição dos eletrões seja assimétrica também, havendo mais eletrões próximos do oxigénio (zona negativamente carregada) do que dos hidrogénios (zonas positivamente carregadas). Estas zonas sentem-se, então, atraídasumas pelas outras, isto é, os hidrogénios de uma molécula de água sentem-se atraídos pelo oxigénio de outra molécula vizinha. Existe, portanto, uma força geral que tende a aproximar as moléculas umas das outras.

Esta força, em geral, é equilibrada em todas as direções, uma vez que cada molécula de água está rodeada em todas as direções por outras moléculas, resultando numa força nula. Contudo, numa zona onde a água acabe, como a superfície de um lago, por exemplo, esta força já não é nula, resultando numa força em direção à água restante. A esta energia superficial que gera uma força na interface de líquidos dá-se o nome de tensão superficial. Esta força é a responsável por certos objetos, e até alguns seres vivos, flutuarem na água, apesar de, no geral, serem mais densos que esta. A tensão superficial é, também, a responsável pela forma das bolhas!

As moléculas de detergente possuem duas partes: uma delas é hidrófoba, isto é, tende a repelir-se da água, enquanto a outra é hidrófila, que significa exatamente o contrário, e tende, portanto, a orientar-se em direção à água. Estas moléculas permitem aprisionar água, fazendo essencialmente uma sandwich, onde o pão é o sabão e o conteúdo é a água. É esta sandwich que vemos como sendo a superfície da bolha, contudo, em princípio, esta não teria de ser esférica. A razão pela qual as bolhas tendem a ser esféricas vem da tensão superficial sentida pela água aprisionada na superfície da bolha. Cada molécula de água sente-se atraída às suas moléculas vizinhas, fenômeno em tudo análogo à força elástica que a superfície de um balão sente quando se encontra cheio. Isto faz com que a bolha procure sempre diminuir ao máximo a sua área, uma vez que essa é a configuração que diminui ao máximo a energia associada à tensão superficial. Ora, a forma que minimiza a área da superfície de um objeto com um dado volume é uma esfera. Temos, então, a explicação pela qual as bolhas de sabão tendem a ser sempre esféricas! É, nada mais, nada menos, que a sua resposta ao facto de que ter mais área superficial implica mais energia.

## O que vais precisar:

- Palhinhas (reutilizadas)
- Detergente para a loiça ou para as mãos
- Fio ou cabelo comprido
- Água

Vamos, então, parar com a conversa e ver este princípio em ação!

**Passo 1:** Com 4 palhinhas, constrói uma "moldura". Para tal, podes enfiar as extremidades das palhinhas umas dentro das outras. Podes, também, usar paus de espetada ou qualquer outro objeto semelhante, desde que seja rígido e que possas colar.

**Passo 2:** Enche uma tigela (grande o suficiente para poderes submerger a moldura) com bastante água e adiciona detergente. Mistura até veres uma quantidade razoável de espuma no topo da tigela.

**Passo 3:** Pega num fio de cabelo, ou qualquer outro tipo de fio fino (como o de costura), e dá um nó entre as pontas, de maneira a fazeres uma espira de fio.

**Passo 4:** Coloca a estrutura de palhinhas dentro da água com detergente e, cuidadosamente, volta a retirá-la. Deves ver uma película de sabão a formar-se no seu interior. Se a película rebentar, repete este passo, ou tenta adicionar mais detergente.



**Passo 5:** Molha a espira de fio na água e, de seguida, atira-a com cuidado para dentro da película. Se a estrutura rebentar, repete os passos até agora.

**Passo 6:** Com um objeto seco, rebenta a película de sabão apenas na parte interior do fio. Antes de fazeres isto, pensa no que estás à espera que aconteça!

Aconteceu o que estavas à espera? A área de película de sabão foi minimizada?



# Viver em Marte: Como Produzir Oxigénio... E Combustível para Regressar a Casa

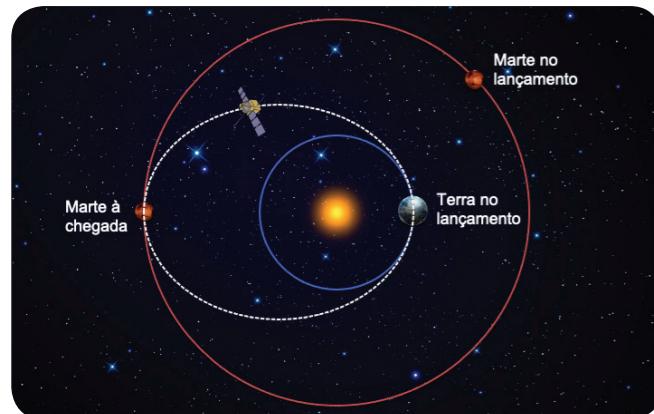
por Vasco Guerra e Tiago Silva

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico

O envio de uma missão tripulada a Marte constituirá um dos maiores avanços da aventura espacial nos próximos anos. A criação de um ambiente respirável no planeta vermelho será um dos grandes desafios a ultrapassar. Em princípio será possível obter oxigénio através da conversão do dióxido de carbono existente na atmosfera marciana. E uma nova solução para o conseguir está em desenvolvimento: baseia-se em tecnologias de plasmas.

A exploração especial está a iniciar uma nova era, com Marte na agenda. As maiores agências espaciais – como a ESA (Europa), NASA (EUA), Roscosmos (Russia) ou a JAXA (Japão) –, por vezes em parceria com companhias privadas, têm em curso ou apresentaram recentemente programas muito ambiciosos de exploração de Marte.

Uma missão a Marte será um empreendimento extraordinário. A distância entre a Terra e Marte varia entre 55 e 400 milhões de quilómetros, dependendo da posição dos planetas nas suas órbitas. A conjugação correcta das trajectórias implica que existe uma janela de lançamento óptima aproximadamente a cada dois anos, correspondente à trajectória de transferência de órbitas de Hohmann.



**Figura 1:** Trajetória da nave espacial ao longo da transferência de órbitas de Hohmann, correspondente à órbita que requer menor energia. As janelas de lançamento são periódicas, dependendo do período sinódico, que é de 780 dias no caso de Marte.

A viagem dura cerca de 6 meses. Para regressar numa órbita semelhante, os astronautas teriam que ficar cerca de um ano em Marte. Evidentemente, quaisquer recursos locais que possam ser utilizados irão reduzir a logística e os custos da missão, aumentar a auto-suficiência e reduzir os riscos para a tripulação. Daqui resulta o interesse actual na utilização de recursos in-situ (ISRU – in-situ resource utilization), a recolha de recursos no local de exploração que de outro modo teriam que ser trazidos da Terra.

A atmosfera marciana é formada por cerca de 96% de CO<sub>2</sub>, que é assim o seu principal constituinte. Conta ainda com aproximadamente 2% de Ar e 2% de N<sub>2</sub>. O abundante dióxido de carbono é o recurso de interesse, já que pode ser utilizado como matéria prima para produzir localmente oxigénio, que pode depois ser recolhido e utilizado para respirar. O processo baseia-se na decomposição do dióxido de carbono em monóxido de carbono e oxigénio e a sua concretização dará um enorme impulso ao estabelecimento de uma colónia no planeta vermelho. Este processo de decomposição vem com um bónus: para além de garantir um abastecimento regular de oxigénio, pode assegurar a produção de combustível! Com efeito, já foi proposto utilizar oxigénio e monóxido de carbono como carburantes para foguetões [1]. Pode ainda imaginar-se um processo de decomposição que vá até à produção de carbono, que poderia ser usado como elemento de construção de diferentes estruturas de carbono e de moléculas orgânicas.

A molécula de CO<sub>2</sub> é muito estável e, como tal, muito difícil de decompor. Por outras palavras, a dissociação do CO<sub>2</sub> é um processo fortemente endotérmico, que requer a utilização de uma quantidade apreciável de energia (pelo menos 5.5 eV). A tecnologia existente hoje em dia para a dissociação do CO<sub>2</sub> baseia-se em células de electrólise de óxido sólido (SOEC – Solid Oxide Electrolysis Cells), que é uma tecnologia robusta e estabelecida. No entanto, utiliza frequentemente materiais raros e caros e a sua eficiência energética é muito baixa. Apesar destes inconvenientes, a NASA enviou em 2020 uma empolgante missão a Marte que inclui uma experiência ISRU de produção de oxigénio (MOXIE) [2]. O MOXIE é transportado pelo rover Perseverance, que aterrhou em Marte em Fevereiro de 2021!

Soluções biológicas, baseadas em algas ou bactérias, são de momento puramente especulativas. Uma equipa do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) do Instituto Superior Técnico (IST) propôs recentemente uma solução radicalmente diferente, baseada na utilização de plasmas de baixa temperatura [3,4].

## Porquê Plasmas?

Os plasmas de baixa temperatura são gases ionizados onde apenas uma fracção do gás está ionizada. As várias partículas – electrões, iões positivos, iões negativos, átomos e moléculas neutros e fotões – têm propriedades e energias muito diferentes. Os electrões são leves e por isso fáceis de acelerar por aplicação de campos eléctricos. Tornam-se muito energéticos e criam, por colisão com outras partículas, várias espécies químicas reactivas. Por seu lado, as moléculas e átomos neutros do gás mantêm uma temperatura suficientemente baixa para limitar as perdas



**Figura 2:** Ilustração da NASA da “amartagem” do Perseverance na superfície de Marte

por aquecimento do gás. Os plasmas de baixa temperatura são assim formidáveis conversores de energia eléctrica em energia química!

A potência requerida para criar e operar o plasma é tipicamente da ordem de 100 W, mas podem bastar 25 W, dependendo das condições de funcionamento. Estas potências são perfeitamente realizáveis em Marte. Por exemplo, os painéis solares do “Mars Exploration Rover” geram, quando totalmente iluminados, 140 W de potência durante 4 horas por Sol (um “Sol” é um dia marciano, aproximadamente 24h40'). Outros méritos da tecnologia de plasmas são a sua capacidade de iniciar e terminar a operação instantaneamente, o que se adequa perfeitamente aos ciclos de disponibilidade de energia de uma unidade de ISRU em Marte, e o seu elevado potencial de escalabilidade.



**Figura 3:** Ilustração da NASA da descida do Perseverance para a superfície de Marte.

A tecnologia pode tirar partido da natureza de não-equilíbrio e da eficiência energética dos plasmas de baixa temperatura, canalizando a energia dos electrões de modo a

dirigir selectivamente a química na direcção dos produtos desejados, O<sub>2</sub> e CO. Os electrões, por possuírem energias cinéticas elevadas, podem quebrar a ligação CO-O da molécula de CO<sub>2</sub> por impacto directo. Este passo é importante, mas pode não ser suficientemente bom. Por um lado, o processo procede por via da excitação de estados electrónicos com energias de 7 eV ou superiores, bastante acima da energia de dissociação do CO<sub>2</sub>; por outro lado, apenas uma pequena fracção dos electrões tem energia suficiente para decompor a molécula. Mas a “poção mágica” tem um ingrediente adicional: a excitação vibracional do CO<sub>2</sub>.

## A Canção das Moléculas

Na molécula de CO<sub>2</sub>, as ligações entre o carbono e os átomos de oxigénio podem fletir ou alongar e, como tal, a molécula começa a vibrar. Estas vibrações armazenam energia. Um plasma criado em condições marcianas pode facilmente produzir electrões que transferem mais de 90% da sua energia para a excitação vibracional das moléculas de CO<sub>2</sub>. Poder-se-ia pensar que esta característica seria uma desvantagem, já que a energia não é diretamente utilizada para decompor o CO<sub>2</sub>, mas na verdade acaba por ser um trunfo importante! Por um lado, pôr as moléculas a vibrar requer cerca de 10 vezes menos energia do que dissociá-las diretamente por impacto electrónico; por outro lado, é possível favorecer transferências de energia entre as moléculas vibrantes, de modo a que algumas delas aumentem a sua amplitude de vibração. Não é o mesmo fenómeno que o partir de um cristal pela ária de uma cantora de ópera, mas esta imagem simplista é suficiente para uma primeira impressão: se as moléculas vibrarem significativamente, tornam-se mais fáceis de decompor!



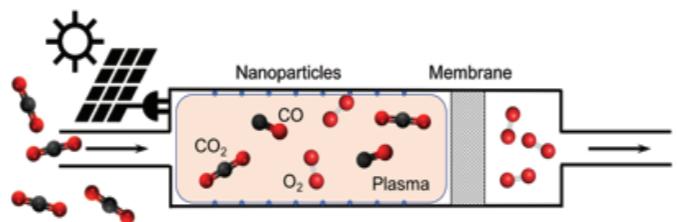
**Figura 4:** Ilustração da NASA retratando astronautas em Marte

### Marte: o ambiente ideal para os plasmas!

As ideias de como utilizar os plasmas para decompor o CO<sub>2</sub> estão a ser exploradas na Terra, em resposta aos problemas de alterações climáticas e à tentativa de produção de combustíveis verdes [5]. O desafio é perceber se e como os resultados obtidos e em estudo na Terra podem ser adaptados a Marte. A equipa do IPFN, em colaboração com investigadores do Laboratoire de Physique

dos Plasmas (LPP), Ecole Polytechnique, França, reportou recentemente, num estudo teórico e de simulação numérica, a descoberta de que Marte tem excelentes condições para a utilização de recursos in-situ (ISRU) por plasmas [3].

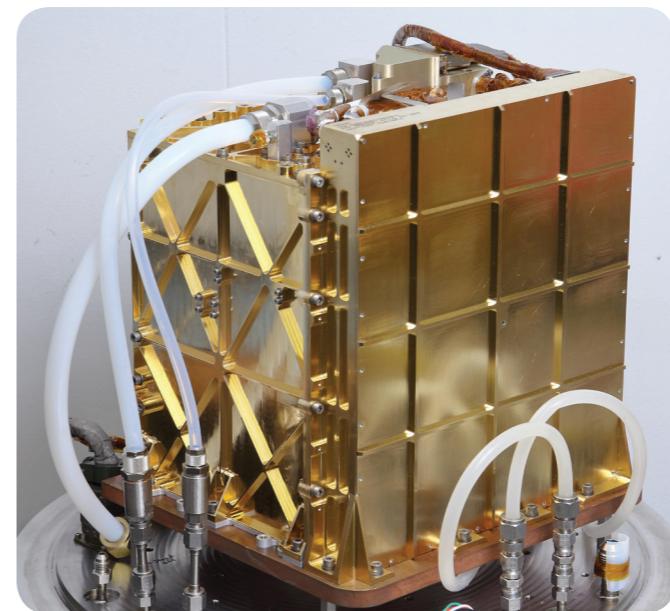
As previsões apresentadas em [3] foram confirmadas experimentalmente muito recentemente pela mesma equipa, no âmbito da tese de Doutoramento de Polina Ogloblina [6]. As medições foram realizadas numa descarga DC a pressões entre 1 e 5 Torr, correntes entre 10 e 50 mA, com temperaturas iniciais tanto de 27 °C (Terra) como de -55 °C (Marte), e atmosferas de CO<sub>2</sub> puro e de 96% CO<sub>2</sub>-2% Ar-2% N<sub>2</sub>. Para analisar os resultados foi desenvolvido um modelo detalhado cujas simulações revelaram um muito bom acordo com os dados experimentais. A investigação mostra que as baixas temperaturas de Marte aumentam o grau de não-equilíbrio vibracional – que caracteriza a fracção de energia armazenada nos níveis vibracionais – e que a composição da atmosfera marciana tem um efeito positivo na decomposição do CO<sub>2</sub>.



**Figura 5:** Esquema genérico de um reactor a plasma para produção de oxigénio em Marte.

A atmosfera é maioritariamente CO<sub>2</sub>, pelo que não é necessária a sua captura e o plasma pode iniciar-se na atmosfera ambiente. Os traços de Ar e N<sub>2</sub> existentes podem apenas ajudar: o árgon muda a distribuição da energia dos electrões para energias mais elevadas, contribuindo para um aumento da eficiência do processo; o azoto favorece a transferência de energia vibracional para o CO<sub>2</sub> (como num laser de CO<sub>2</sub>) e ajuda assim a “canção das moléculas”. A pressão em Marte – 600 Pa (4.5 Torr), cerca de 150 vezes inferior à da Terra – é próxima da ideal para a operação dum plasma, não sendo necessário utilizar bombas de vácuo nem compressores no primeiro passo do processo. Note-se que uma pressão demasiado elevada implica que os electrões colidem demasiado frequentemente, sendo por isso difíceis de acelerar. Por outro lado, a pressões demasiado baixas é fácil acelerar os electrões, mas as colisões são raras e a transferência de energia dos electrões para os neutros não é eficaz.

Finalmente, a reduzida temperatura da atmosfera marciana – que varia entre -150 °C e 20 °C, com um valor médio de -60 °C – atrasa as reacções de reconversão do CO e O em CO<sub>2</sub>, dando mais tempo para a separação dos



**Figura 6:** MOXIE, uma experiência no rover *Perseverance*, que aterrou em Marte no dia 18 de fevereiro de 2021! O objetivo é produzir oxigénio a partir do CO<sub>2</sub> da atmosfera marciana.

Posteriormente, numa colaboração entre o IST e o Dutch Institute For Fundamental Energy Research (DIFFER), Países Baixos, Gonçalo Raposo, no âmbito da sua tese de Mestrado em Engenharia Física Tecnológica (MEFT) do IST, utilizou um plasma criado por micro-ondas em condições de pressão e composição atmosférica marcianas, tendo obtido conversões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 35% para uma potência injectada de 350 W [7]. Uma visão esquemática dum possível futuro reactor a plasma é apresentada na figura 5.

Os resultados já obtidos demonstram que a tecnologia de plasmas emergente é muito promissora. Com efeito, a experiência MOXIE tem como objetivo conseguir a produção de 10 g de O<sub>2</sub> por hora, com uma potência de 300 W, num reactor de massa 15 kg e de dimensões 24×24×31 cm.

Estes números devem comparar-se com os resultados apresentados em [3,5,6], que revelam que uma produção de 14 g de O<sub>2</sub> por hora, para uma potência de 250 W, num reactor de micro-ondas compacto de massa 4 kg e dimensões 25×20×5 cm, é perfeitamente alcançável. Assim, a produção de oxigénio por hora e por quilograma pode subir de 0.7g na MOXIE para 3.5 g no reactor a plasma.

Um aumento de escala subsequente permite atingir uma produção equivalente ao consumo diário de oxigénio na Estação Espacial Internacional (ISS), que está presentemente na gama de 2-5 kg por dia. O uso de membranas de separação de produtos e de catalisadores, ativados por plasmas, trará um desenvolvimento crucial à tecnologia, mas encontra-se ainda em fase de investigação. De qualquer modo, os plasmas estão já posicionados como uma alternativa viável e muito interessante à SOEC para a produção de oxigénio e combustíveis em Marte!

### Referências:

- [1] R. L. Ash, W. L. Dowler, and G. Varsi, “Feasibility of rocket propellant production on Mars,” *Acta Astronaut.* 5 (1978) 705.
- [2] M. H. Hecht, D. R. Rapp, and J. A. Hoffman, “The Mars Oxygen ISRU experiment (MOXIE).” <https://ssed.gsfc.nasa.gov/IPM/PDF/1134.pdf>.
- [3] V. Guerra, T. Silva, P. Ogloblina, M. Grofulović, L. Terraz, M. Lino da Silva, C. D. Pintassilgo, L. L. Alves and O. Guaitella, “The case for in situ resource utilisation for oxygen production on Mars by non-equilibrium plasmas,” *Plasma Sources Sci. Technol.* 26 (2017) 11LT01.
- [4] V. Guerra, T. Silva and O. Guaitella, “Living on Mars: how to produce oxygen and fuel to get home,” *Europhysics News* 49(3) (2018) 15-18.
- [5] A. Goede and R. van de Sanden, “CO<sub>2</sub>-neutral fuels,” *Europhysics News* 47/3 (2016) 22.
- [6] P. Ogloblina, A. S. Morillo-Candas, A. F. Silva, T. Silva, A. Tejero-del-Caz, L. L. Alves, O. Guaitella, and V. Guerra, “Mars in situ oxygen and propellant production by non-equilibrium plasmas,” <https://www.essoar.org/doi/10.1002/essoar.10505142.2>
- [7] G. Raposo, “Plasma in-situ production of fuel and oxygen on Mars,” Tese de Mestrado em Eng° Física Tecnológica, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, 2021.



**Figura 7:** Ilustração da NASA: o rover *Perseverance* lança um pára-quedas supersônico do seu aeroshell enquanto diminui a velocidade antes de “amartar”.

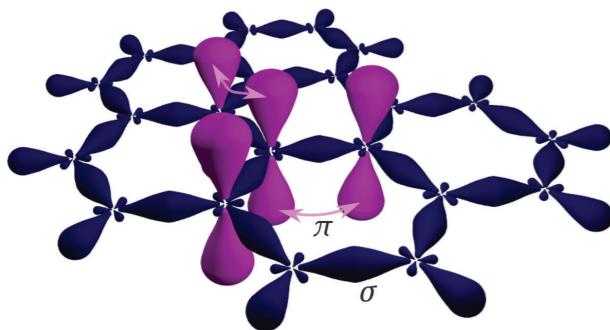
# Brilhante Grafeno

por Pedro Cosme

Alumnus MEFT e estudante de doutoramento em Física no Instituto Superior Técnico

**D**esde a sua descoberta experimental em 2004<sup>1</sup>, o grafeno tem vindo a ocupar um lugar de destaque nas mais diversas áreas da ciência e tecnologia, com usos e aplicações que vão desde o melhoramento das solas dos ténis de competição à utilização em circuitos e computadores quânticos, passando até por testes à COVID-19<sup>2</sup>. Mas, o que é, afinal, o grafeno e como podemos estudar as suas propriedades?

Designamos, no sentido lato, por grafeno os materiais constituídos por uma a algumas camadas de átomos de carbono dispostos numa rede hexagonal, podendo as camadas sobrepor-se com diferentes ângulos entre si e conter átomos de outras espécies químicas. Contudo, foquemo-nos no caso, realmente distinto, do grafeno com apenas uma camada de átomos exclusivamente de carbono. Os eletrões deste material têm um comportamento inusitado, que lhes confere, entre outras características, uma elevadíssima mobilidade.



**Figura 1:** Hibridação das orbitais dos átomos de carbono no grafeno. As orbitais  $\sigma$  ligam os átomos numa estrutura hexagonal, enquanto as orbitais  $\pi$  conduzem os eletrões livres.

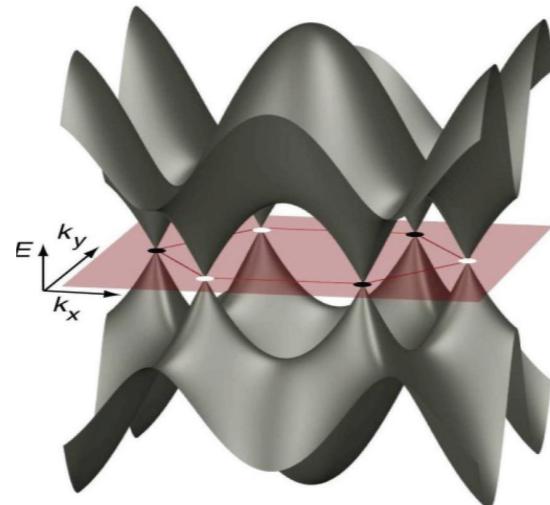
De forma a criar uma estrutura hexagonal, os átomos de carbono apresentam uma hibridação  $sp^2$ , em que as três orbitais coplanares são responsáveis pela ligação covalente aos três primeiros vizinhos. Resta, portanto, uma orbital  $p_z$ , perpendicular ao plano, que permite a condução de eletrões, ou lacunas<sup>3</sup>, ao longo do grafeno. Porém, estes eletrões não se comportam como poderíamos esperar. Recorrendo ao modelo de Tight Binding para os primeiros vizinhos, e no limite das baixas energias<sup>4</sup>, pode chegar-se à conclusão que a função de onda,  $\psi$ , dos eletrões obedece à equação

$$v_F \vec{\sigma} \cdot \nabla \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

na qual surge uma velocidade  $v_F$ , dita velocidade de Fermi, as matrizes de Pauli e a energia  $E$ . O que é extraordinário é que esta equação é análoga à equação de Dirac para partículas relativistas sem massa se substituirmos a velocidade da luz por  $v_F$ , ou seja, ao invés de se regerem pela usual equação de Schrödinger, os eletrões requerem uma

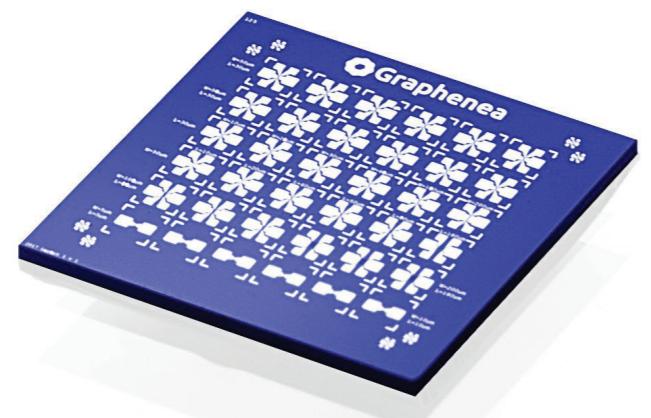
descrição relativista. Este facto torna-se ainda mais claro se analisarmos a relação entre a energia e o momento, em tudo idêntica à de um fotão

$$E = \pm v_F \hbar k = \pm v_F p$$



**Figura 2:** Estrutura de bandas no grafeno de uma folha. Em torno dos pontos K e K', a energia varia de forma linear com o momento.

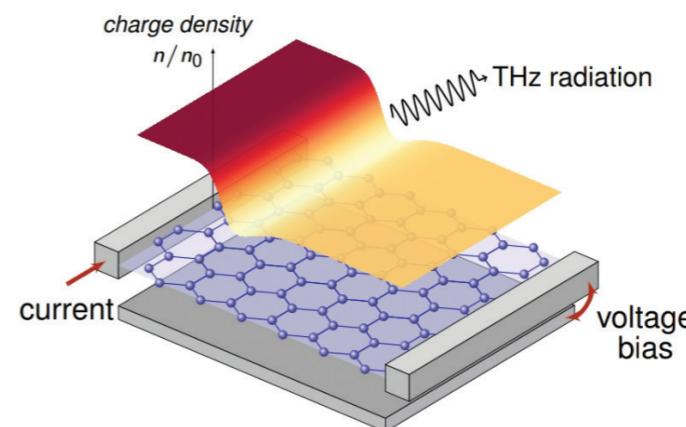
O comportamento do fermião de Dirac leva, também, a que seja difícil os eletrões interagirem com os fonões da rede hexagonal, o que explica a origem da alta mobilidade elétrica que este material apresenta, cerca de cem vezes superior ao valor encontrado no silício. Assim, a relativa ausência de perdas levou, desde cedo, à utilização do grafeno em componentes eletrónicos e hoje, os transistores de grafeno (GFET) começam já a ser presença assídua no rol de componentes à disposição de cientistas e engenheiros.



**Figura 3:** Placa comercial de transistores de grafeno.

Em particular, as tecnologias de grafeno atraem a atenção da comunidade científica no campo dos terahertz (THz). A radiação THz possui inúmeras aplicações possíveis nas áreas da medicina, imagiologia e segurança, entre outras. Todavia, é atualmente difícil gerar ou detetar THz, pelo que esta gama de radiação acaba por cair no hiato entre as radiofrequências, geradas eletronicamente, e a ótica, domínio dos lasers. É, portanto, um feliz acaso as frequências usuais das excitações no grafeno se situarem nesta zona do espectro. O trabalho de investigação que desenvolvo no laboratório de plasmas quânticos do IPFN lida precisamente com a emissão de THz em GFET. Estudamos as condições que possam gerar ondas de eletrões no grafeno e a radiação que estas emitem. Nos nossos modelos, tratamos o conjunto dos eletrões de condução como um fluido, isto porque, com grafeno, pode construir-se transistores muito maiores que a separação média entre eletrões, o que nos permite analisá-los como um contínuo: encontramo-nos no regime hidrodinâmico.

Por estranho que pareça, o mecanismo de produção e amplificação de ondas de eletrões<sup>5</sup> não é muito diferente do caso de ondas rasas a rebentar na praia. Uma barreira de potencial num dos terminais do GFET força a corrente contínua imposta a ser reflectida e a interagir com a corrente incidente, criando uma onda de choque e levando ao crescimento de oscilações. Posteriormente, os fatores não lineares do sistema impõem a saturação e o sistema entra, naturalmente, num regime estável. Ao mesmo tempo, o movimento acelerado dos eletrões nestas ondas de densidade é responsável pela emissão de radiação, de forma muito semelhante a uma antena omnidirecional.



**Figura 4:** Esquema de emissão de radiação THz num GFET

Claro que, isoladamente, uma destas microantenas não conseguirá emitir ou receber uma grande potência, mas a conjugação de várias antenas interligadas numa disposição específica permite não só aumentar a capacidade como obter padrões de radiação variados. Para além de emissores e detectores de THz alguns autores estudam também a hipótese da utilização dos canais de grafeno como guias de onda em miniatura abrindo também o caminho a possibilidades muito interessantes.

Na verdade, o grande fascínio da física do grafeno reside precisamente nas inúmeras e variadas aplicações e exóticos comportamentos físicos que nele podemos encontrar. Muito fica por contar do que se conhece já, como as “poças de carga” junto ao ponto de neutralidade; a quiralidade dos eletrões; a interação com a radiação; ou os ângulos mágicos do grafeno de duas camadas. Mas resta ainda mais por descobrir e estudar, quem sabe, por um de vós leitores.

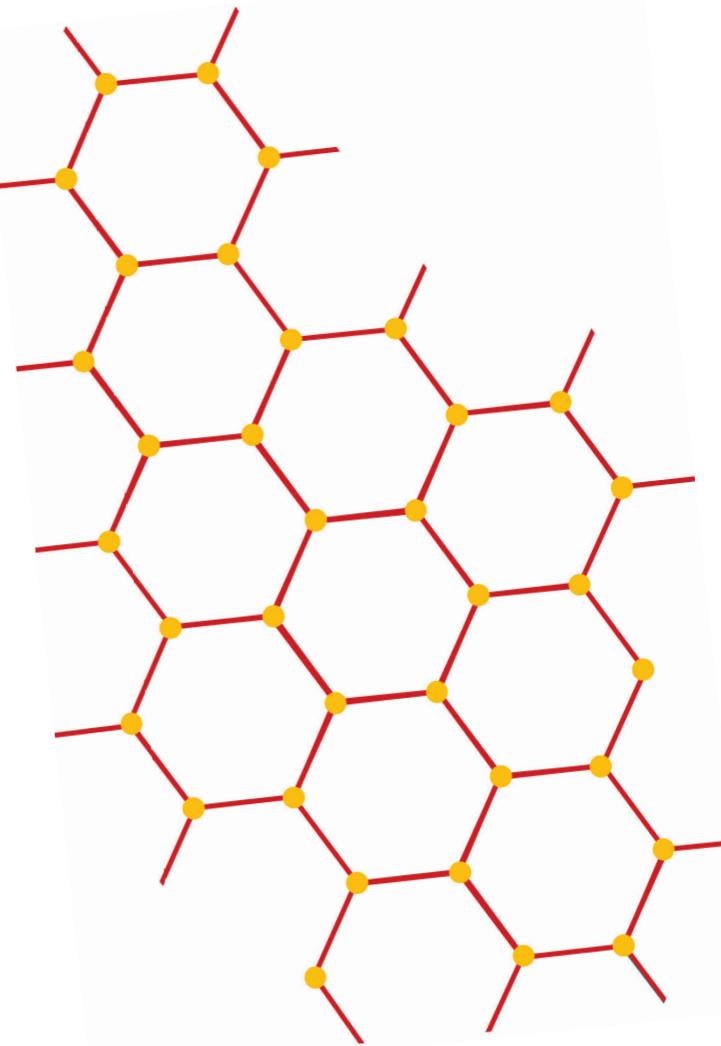
<sup>1</sup> O que valeu a Konstantin Novoselov e Andre Geim o prémio Nobel de Física em 2010, tornando Andre Geim o único físico a ter ganho, tanto o prémio Nobel, como o prémio IgNobel, atribuído em 2000 pela levitação de uma rã viva.

<sup>2</sup> Estamos em 2021 e há que convencer as agências de financiamento de alguma forma.

<sup>3</sup> A análise para a condução de lacunas é idêntica à dos eletrões, portanto, por simplicidade, iremos restringir a discussão ao caso eletrónico.

<sup>4</sup> Em física, «baixas energias» é uma expressão que, consoante a área científica, pode ter significados muito diferentes. Asseguramo-nos que, no caso do grafeno, para as aplicações usuais e a temperatura ambiente, estamos, de facto, nesse regime.

<sup>5</sup> Chamadas plasmões, mas não é preciso ficarmos demasiado técnicos agora.



# AI, o que vai ser da Física!?



por Óscar Amaro

Aluno do 5º ano de MEFT, Instituto Superior Técnico

Nunca a Humanidade esteve tão envolvida no avanço da Ciência. A cada ano que passa, o número de investigadores que publicam em revistas científicas aumenta cerca de 5% [1]. Apesar de este e outros crescimentos (quase) exponenciais não refletirem realmente o progresso feito, a verdade é que nos aproximamos cada vez mais de uma melhor compreensão do Universo nas suas diferentes escalas. Em paralelo, assiste-se à progressiva automatização de várias tarefas científicas, que, até há pouco tempo, julgávamos impensáveis de implementar em chips.

A Física é uma ciência profundamente empírica, porque o objecto de estudo é a própria Natureza! Poder-se-ia pensar que é preciso um agente consciente para a analisar; no entanto, é muito frequente os laboratórios modernos terem sistemas automáticos de calibração, alinhamento e otimização, quase dispensando a intervenção humana. Em concreto, é possível criar algoritmos de controlo que “aprendem” as correlações entre *inputs*, como a posição de espelhos e intensidade de um laser, sujeitos a flutuações, e *outputs*, como a energia dos electrões acelerados pelo laser num plasma [2]. Até recentemente, esta era uma tarefa muito penosa e sujeita a muitos erros e tinha de ser feita por alguém com uma grande dose de intuição e paciência. Mais, os próprios dados das experiências podem ser catalogados, selecionados e analisados por rotinas pré-definidas, como é feito com a quantidade abismal de eventos no CERN.

Sendo assim, é legítimo perguntar se é possível extrair leis físicas diretamente de dados experimentais? Segundo [3], parece que sim. O algoritmo que usaram há mais de uma década (e cuja área de investigação, entretanto, evoluiu significativamente) baseia-se na procura de combinações de variáveis dinâmicas (e funções delas) que reproduzam os dados experimentais. Por exemplo, para um oscilador harmônico simples, o programa encontra termos  $\sin(x)$  e  $\cos(x)$  com coeficientes apropriados, em que  $x$  é a posição do oscilador. Usando invariâncias e simetrias, o método consegue extrair as equações de movimento do sistema e até o seu Lagrangiano.

$L(x_1, x_2, v_1, v_2)$	$f(x, v, t)$
$x_1 \ x_2 \ v_1 \ v_2$	$\partial_x \ \partial_v \ \partial_t$
$x_1^2 \ x_2^2 \ v_1^2 \ v_2^2$	$x\partial_x \ x\partial_v \ x\partial_t$
$x_1x_2 \ \ \ \ v_1v_2$	$v\partial_x \ v\partial_v \ v\partial_t$
$\dots$	$\partial_x^2 \ \partial_v^2 \ \partial_t^2$

Figura 1: Dicionário de variáveis dinâmicas e operadores

Podemos pensar nisto como um “fit global” a todas as variáveis dinâmicas do sistema! Tal como noutras áreas de aprendizagem automática, surge o problema de overfitting, quando o número de termos é demasiado elevado e o poder preditivo reduzido. Nesse caso, o método pode incorporar a filosofia da navalha de Occam e procurar um equilíbrio entre a precisão e a simplicidade do alfabeto de termos usados. Apesar de tudo isto, este método funciona apenas em sistemas clássicos e simples, como massa-mola e pêndulos, que, no fundo, seguem a equação de movimento de Newton.

E se quisermos generalizar para outros sistemas físicos? Por exemplo, em [4], os autores começam por gerar dados a partir de um código partícula-em-célula, que funciona por primeiros princípios, nomeadamente as equações de Maxwell. A seguir, constroem um dicionário de operações diferenciais sobre a função de distribuição  $f(x,v,t)$ , e testam diferentes combinações destes termos até encontrarem a que melhor descreve a evolução do sistema. Neste artigo, os autores não só conseguem “destilar” a equação de Vlasov com elevada precisão, como também equações de continuidade, momento e energia. Apesar de haver um claro interesse académico em verificar a consistência entre leis micro, meso e macroscópicas já conhecidas, estes métodos poderão ser usados para desvendar novas equações diferenciais e modelos reduzidos, que poderão ser menos exigentes do ponto de vista computacional do que os códigos originais de primeiros princípios.

Rational Approximations <sup>2</sup> ( $0 \leq z < \infty$ )	7.2. Repeated Integrals of the Error Function
7.1.25 $\text{erf } z = 1 - (a_1t + a_2t^2 + a_3t^3)e^{-z^2} + \epsilon(z), \quad t = \frac{1}{1+pz}$ $ \epsilon(z)  \leq 2.5 \times 10^{-4}$ $p = .47047 \quad a_1 = .34802 \quad a_2 = -.09587 \quad a_3 = .74785 \quad 56$	7.2.1 Definition $i^n \text{erfc } z = \int_z^\infty i^{n-1} \text{erfc } t dt \quad (n=0, 1, 2, \dots)$ $i^{-1} \text{erfc } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}, \quad i^0 \text{erfc } z = \text{erfc } z$
7.1.26 $\text{erf } z = 1 - (a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4)e^{-z^2} + \epsilon(z), \quad t = \frac{1}{1+pz}$ $ \epsilon(z)  \leq 1.5 \times 10^{-7}$ $p = .32759 \quad a_1 = .25482 \quad a_2 = -.28449 \quad a_3 = 1.42141 \quad a_4 = -1.45315 \quad 5429$	7.2.2 Differential Equation $\frac{dy}{dz} + 2z \frac{dy}{dz} - 2ny = 0$ $y = A i^n \text{erfc } z + B i^n \text{erfc } (-z)$ (A and B are constants.)

Figura 2: Uma parte de uma das mais de mil de páginas de Abramowitz e Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*. Sim, os físicos teóricos decoravam muitas páginas como esta!

Falta saber, então, o que fazer com a componente puramente teórica da Física. Se antes era pedido que um investigador soubesse o Abramowitz e Stegun [5] de trás para a frente, o cálculo simbólico (como o Mathematica) tirou esse fardo pesado dos seus ombros, e permitiu-lhe focar-se na resolução de problemas físicos em vez de decorar tabelas de integrais. Mesmo assim, este software poderá um dia ser substituído por redes neurais [6] e, quem

que incorpore algum tipo de “intuição física” (por exemplo, saber quando usar o limite em que uma das variáveis é desprezável) e que usem a experiência passada (como saber que no estudo de radiação electromagnética surgem frequentemente funções de Bessel).

Em analogia, muitos matemáticos começam também a usar “proof assistants” (como o Lean [7]) para mostrar a robustez dos seus teoremas. É, por isso, fácil imaginar um cenário em que um físico teórico faça contas e prove a consistência do seu trabalho exclusivamente por software.

#### lemma Cauchy\_Schwarz\_ineq:

```
"(inner x y)2 ≤ inner x x * inner y y"
proof (cases)
  assume "y = 0"
  thus ?thesis by simp
next
  assume y: "y ≠ 0"
  let r = "inner x y / inner y y"
  have "0 ≤ inner (x - scaleR ?r y) (x - scaleR ?r y)"
    by (rule inner_ge_zero)
  also have "... = inner x x - inner y x * ?r"
    by (simp add: inner_diff)
  also have "... = inner x x - (inner x y)2 / inner y y"
    by (simp add: power2_eq_square inner_commute)
  finally have "0 ≤ inner x x - (inner x y)2 / inner y y"
    hence "(inner x y)2 / inner y y ≤ inner x x"
      by (simp add: le_diff_eq)
  thus "(inner x y)2 ≤ inner x x * inner y y"
    by (simp add: pos_divide_le_eq y)
qed
```

Figura 3: A Desigualdade de Cauchy-Schwarz,  $\|x \cdot y\| \leq \|x\| \|y\|$  provada com o Lean, um proof assistant.

Quer isto dizer que os físicos, experimentalistas, computacionais e teóricos vão perder os seus empregos?

Provavelmente não, pelo menos por agora. Embora nas próximas décadas o progresso em Machine Learning vá certamente avançar muito, há boas razões para não entrar em pânico.

Por enquanto, nenhuma máquina bate a melhor intuição humana. Ainda são pessoas que fazem o desenho das máquinas usadas nas experiências mais complexas, que escrevem os códigos de simulação e programas simbólicos e que desenvolvem teorias altamente improváveis (mas eficazes) para explicar o funcionamento do Universo. Apesar de cada uma destas tarefas estar a ser automatizada, a Física e a Ciência em geral são actividades inherentemente humanas e nenhuma máquina poderá alguma vez provar o seu contrário.

#### Referências:

- [1] International Association of Scientific, Technical and Medical Publishers, Fifth edition, October (2018)
- [2] Maier et al, Decoding Sources of Energy Variability in a Laser-Plasma Accelerator, PHYSICAL REVIEW X 10, 031039 (2020)
- [3] M Schmidt, H Lipson, Distilling free-form natural laws from experimental data, SCIENCE 324, 81 (2009)
- [4] Alves et al, Data-driven discovery of reduced plasma physics models from fully-kinetic simulations arXiv:2011.01927v1 (2020)
- [5] Abramowitz and Stegun, Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, (1964)
- [6] Lample et al, Deep Learning for Symbolic Mathematics, arXiv:1912.01412v1 (2019)
- [7] Lean, <https://leanprover.github.io/>

## O Modelo de Hodgkin-Huxley: Como se Propagam Sinais num Neurónio

por Dinis Rocha e Inês Rainho

Instituto Superior Técnico

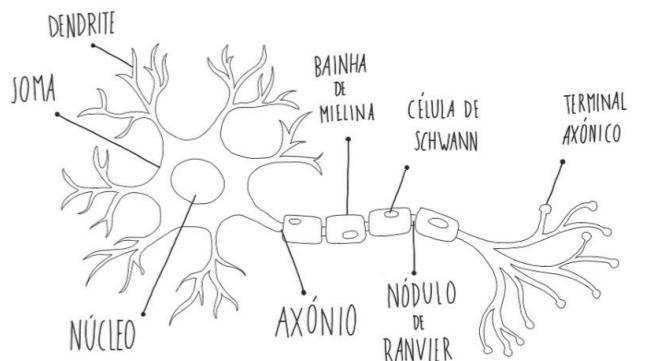


Figura 1: Esquema de uma célula nervosa e as suas estruturas principais

Sabes como se propagam as mensagens no teu cérebro? O cérebro é o órgão mais complexo do teu corpo – e, na verdade, do corpo de qualquer animal vertebrado [1]. Desde a Antiguidade que tentamos compreender como o cérebro funciona, e ainda hoje, há muito por explicar. O que é certo é que a sua função é receber, processar e transmitir informação para o resto do teu organismo.

A unidade básica do sistema nervoso é o neurónio. Os neurónios são células que podem ter formas e tamanhos muitos distintos, de acordo com a função que desempenham no sistema nervoso, mas todos são constituídos pelo soma, dendrites e axónio [2].

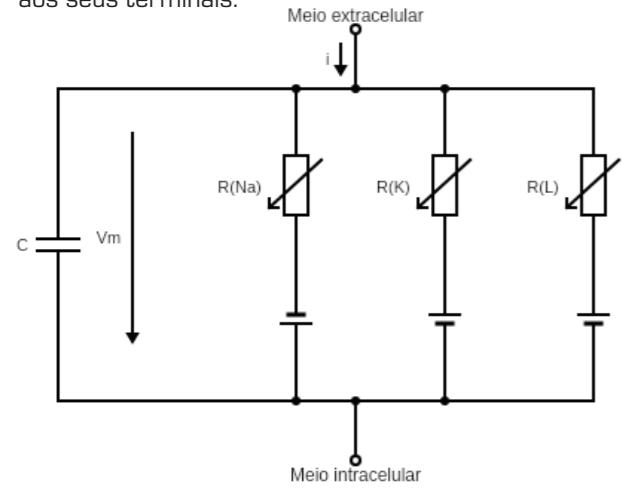
Os impulsos nervosos são conduzidos ao longo do axónio, mas que mecanismo está por trás desta propagação? Para responder a esta questão, é necessário compreender a função da membrana que delimita o neurónio.

A membrana celular é constituída por uma bicamada fosfolipídica – uma camada dupla de lípidos – que separa o meio intracelular do meio extracelular. Incrustados na membrana, há canais iônicos, proteínas especializadas que estabelecem a troca de certos iões entre o interior e o exterior da célula [3].

Estamos agora numa posição em que podemos responder à questão da propagação. Os iões, neste caso o sódio e o potássio, têm carga elétrica, e, como tal, quando em diferentes concentrações nos meios intra e extra-membranar, dão origem a diferentes potenciais elétricos. Os iões, sujeitos a estes potenciais, atravessam os canais iônicos no sentido de repor o equilíbrio. É através desta troca de iões ao longo do axónio que o sinal é propagado.

Este fenómeno é modelado pela propagação de um sinal elétrico num circuito. De acordo com o modelo Hodgkin-Huxley, a membrana funciona como um condensador, enquanto os canais iônicos são representados por resistências variáveis, que dependem da tensão entre o interior e exterior da célula.

Um condensador é um componente que armazena energia elétrica num campo elétrico. O modelo mais simples do funcionamento de um condensador é aquele que assume que até a uma determinada voltagem  $V$  não há corrente e a partir desta o condensador deixa passar corrente. Uma resistência é um componente elétrico que, embora condutor, oferece alguma resistência à passagem de corrente elétrica, estabelecendo assim uma diferença de potencial aos seus terminais.



Até agora, descrevemos um método para modelar a interface entre o meio intracelular e extracelular; todavia isso não é suficiente para descrever a propagação de um sinal no neurónio. Na melhor das hipóteses, temos uma forma de modelar uma parte do axónio. Por outro lado, acoplando várias destas partes, podemos modelar a propagação do sinal ao longo de todo o axónio. Resta-nos perceber como é que estas partes comunicam entre si. Fisicamente, não há nenhuma barreira entre estes compartimentos e o nosso modelo só precisa de capturar o facto de que a propagação do sinal não é instantânea e está sujeita a perdas, i.e. tem de existir uma resistência entre os compartimentos adjacentes. Esta resistência pode ser calculada pela lei de Ohm, sabendo a corrente que flui de um compartimento para o outro. Isto permite-nos determinar a variação do potencial da membrana de um compartimento em função do potencial dos compartimentos adjacentes.

Com o objetivo de testar este modelo, implementámo-lo computacionalmente. Começámos por estudar o comportamento de um só compartimento isolado. Nas figuras, encontram-se os resultados obtidos.

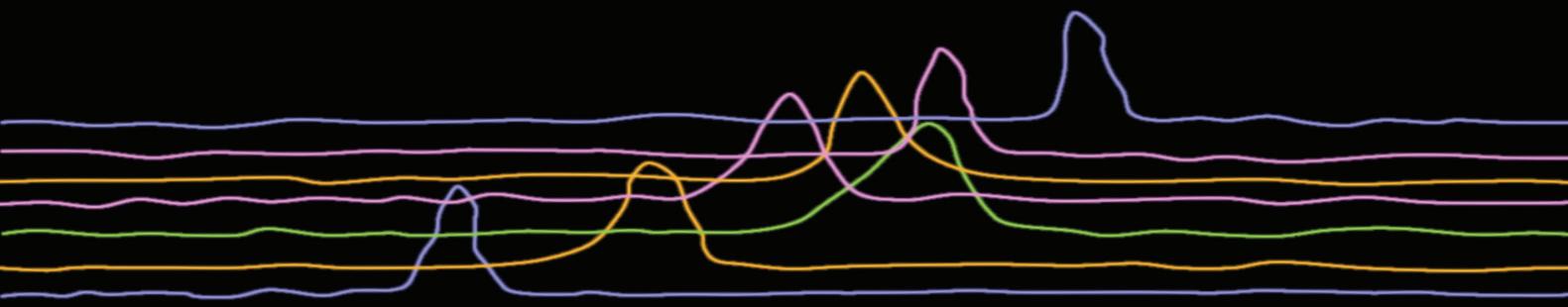
De seguida, definimos uma cadeia de compartimentos – o nosso axónio idealizado – e impusemos um sinal ao primeiro destes compartimentos. Com este modelo implementado, procurámos averiguar se este se aproximava da realidade. Determinámos que a velocidade de propagação sugerida pelo modelo é independente da intensidade do sinal.

Por fim, é importante notar que um estudo mais aprofundado poderia ter sido feito e envolveria a modelização da bainha de mielina, que poderia ser representada por uma condutância superior responsável por estabelecer a ligação entre compartimentos, e das sinapses entre neurónios.

#### Referências:

- [1] Saladin, Kenneth, Human Anatomy, 3.ª edição. Página 400
- [2] Bear, Mark F., Neuroscience: Exploring the Brain, 4.ª edição, Página 29
- [3] Bear, Mark F., Neuroscience: Exploring the Brain, 4.ª edição, Página 38

**Figura 2:** Esquema do circuito que modela o comportamento da membrana



# A Física e a COVID-19

por Pedro J. Sebastião, Maria J. Beira e Anant Kumar

Center of Physics and Engineering of Advanced Materials, Departamento de Física, Instituto Superior Técnico

No momento em que vivemos é, por demais, evidente a importância que tem a contenção da pandemia de COVID-19, causada pela propagação da infecção por SARS-CoV-2, sendo que nunca antes as sociedades humanas viveram uma pandemia num contexto de informação global. Embora não seja (ainda) possível prever todas as consequências desta pandemia, podemos ter a certeza de que a continuidade dos modelos de vida e de organização da sociedade que conhecemos depende muito da capacidade que os cidadãos e as organizações têm de antever a evolução do número de infectados e de compreender os efeitos de diferentes estratégias de mitigação na propagação da doença.

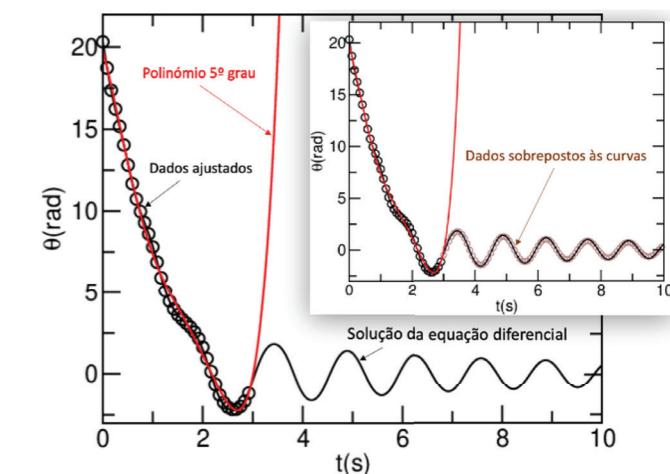
Parece ser claro que, embora a evolução de uma pandemia seja um assunto da competência dos epidemiologistas, há vários aspectos da interdisciplinaridade do problema para os quais um engenheiro físico se encontra particularmente habilitado a tratar e que, por ventura, transcendem as competências de um epidemiologista. Nomeadamente, é importante perceber e identificar os parâmetros mais relevantes na descrição de sistemas dinâmicos complexos, desenvolver modelos matemáticos capazes de integrar estes conhecimentos e descrever quantitativamente a dinâmica do sistema e, por último, validar os modelos através da análise dos dados disponíveis. Desta forma, torna-se possível fundamentar as projeções e tendências de evolução do sistema.

Um exemplo muito caro para alunos de física e que é facilmente compreendido pela população em geral é o do pêndulo rígido. Um pêndulo rígido é sobretudo um sistema que oscila, tal como um qualquer baloiço num parque de diversões. A descrição matemática deste sistema não é, contudo, assim tão trivial e fácil de compreender. De facto, para descrever um pêndulo rígido da forma mais correta e geral possível tem de se resolver um sistema de duas equações diferenciais de primeira ordem que traduzem a variação da velocidade e aceleração angulares ao longo do tempo.

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \ddot{\omega} = -\omega_0^2 \sin \theta - A_0 \frac{\dot{\omega}}{|\dot{\omega}|} - A_1 \dot{\omega} - A_2 \dot{\omega} |\dot{\omega}| \end{cases}$$

Em geral, o ajuste de um polinómio a uma série de pontos é uma tarefa que se leva a cabo com relativa facilidade, mas o mesmo não se poderá dizer de um ajuste das soluções de um sistema de equações diferenciais. Contudo, se, nos dois casos, considerarmos o mesmo número de parâmetros a ajustar, facilmente se verifica que a solução polinomial é válida num período muito limitado de tempo e

tendência para divergir fortemente a partir do último instante considerado, como se pode observar na Figura 1. De facto, o ajuste dos dois tipos de equação aos dados obtidos a partir da observação do movimento do pêndulo nos primeiros três segundos é basicamente equivalente, mas só a partir do ajuste da solução do sistema de equações diferenciais é possível antever o verdadeiro resultado da observação dos instantes seguintes [1].

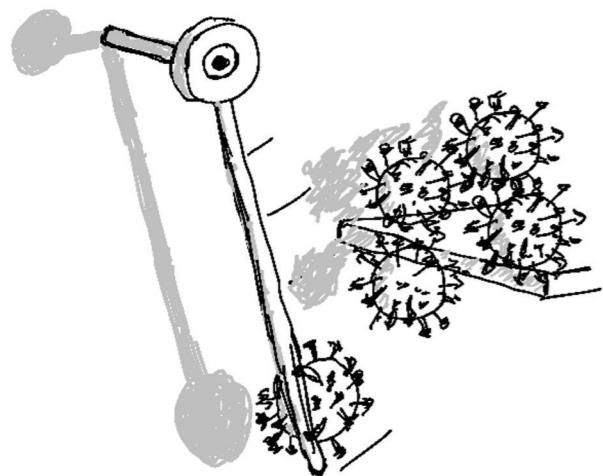


**Figura 1:** Ajuste do ângulo de rotação de um pêndulo para os três segundos iniciais

Este tipo de sobre simplificação é muitas vezes utilizado na análise da atual pandemia, onde a descrição da complexa dinâmica da doença COVID-19 se resume ao cálculo “deslizante” (onde a análise tem em conta somente um número limitado de dias anteriores) do factor de reprodução  $R(t)$  utilizando relações multilineares entre parâmetros da pandemia como sejam o numero de contactos entre pessoas, os tempos característicos de infeção, de recuperação e de morte, entre outros.

W. O. Kermack e A. G. McKendrick propuseram, em 1927, um modelo que é utilizado frequentemente para explicar como se propaga uma doença numa população fixa. Este modelo, conhecido por modelo SIR (Suscetíveis, Infectados e Retirados), é um modelo compartmental que explica como é que um infectado numa população de suscetíveis dissemina a sua infeção, extendendo-a, potencialmente, a toda a comunidade. Para além disso, tem em conta os tempos característicos de recuperação e de morte. O modelo SIR é muitas vezes utilizado para estudar a propagação de doenças em seres humanos, apesar de não conter explicitamente aspectos específicos dos seus comportamentos que possam limitar a disseminação livre da doença, como por exemplo, a utilização da máscara, o cumprimento de normas sanitárias e do distanciamento social,

cumprimentos de quarentena, ou a realização de testes. Contudo, são estes aspectos que claramente produzem as diferenças mais significativas na amplitude desta pandemia em diferentes países.



Refira-se, por exemplo, o caso do Japão, onde, apesar de não terem sido tomadas medidas severas de confinamento e de ter uma população muito superior à portuguesa, se

varam, até ao momento, um número de infetados e mortos inferiores àqueles que observamos para Portugal.

Após uma análise inicial dos dados da pandemia para vários países usando um modelo SIR simples [2], facilmente se verificou que não era possível explicar a amplitude da primeira vaga da doença assumindo a totalidade da população como suscetível, nem o desenvolvimento de vagas seguintes, como as que agora se observam.

A questão que se coloca, então, é saber se é possível incorporar num modelo os aspectos do comportamento social e o caráter oscilatório revelado pelas múltiplas vagas, de forma a descrever os dados da actual pandemia e elaborar projeções mais fundamentadas. Tal como se representa na Figura 2, é, efectivamente, possível adicionar compartimentos ao modelo SIR, de forma a traduzir mecanismos de proteção e deteção [3].

Em concreto, os mecanismos de proteção permitem, por um lado, excluir um largo conjunto de pessoas do contacto com o vírus,  $P$ , e, por outro lado, isolar uma fração,  $q$ , das pessoas infectadas,  $E_Q/I_Q$ . Neste mecanismo, considera-se não só o efeito da imposição de medidas de confinamento, mas também o efeito que o conhecimento do número de casos tem na motivação das pessoas para se auto-protecterem da infecção.

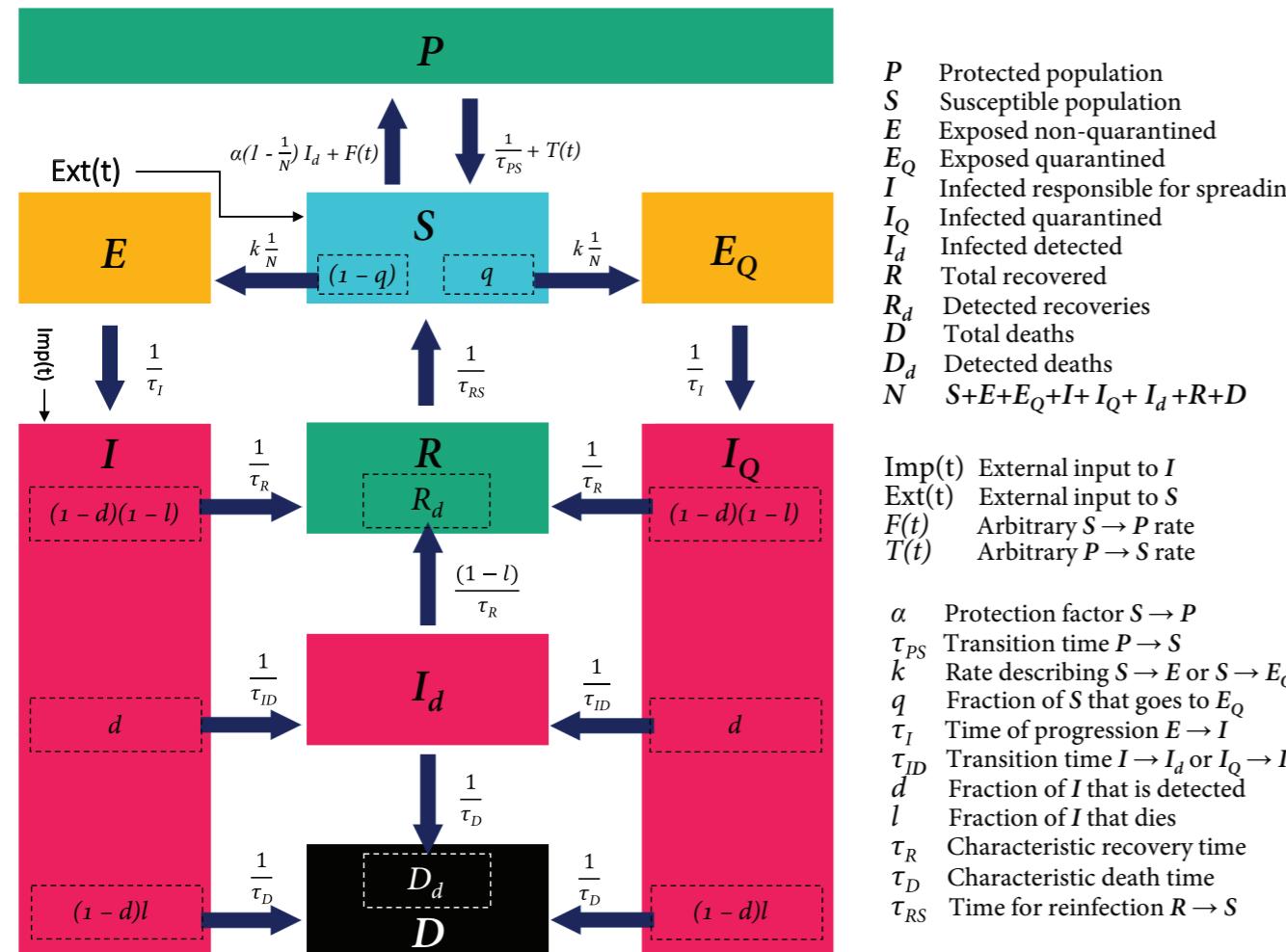


Figura 2: Diagrama de compartimentos e fluxos do modelo PSEIRD(S)

Os mecanismos de deteção permitem, através da realização de testes, identificar um conjunto de pessoas efectivamente infectadas,  $I_d$ . Infelizmente, na generalidade dos casos, não existe a possibilidade de testar toda a população de um país e, portanto, é atualmente aceite que só se detecta uma fração,  $d$ , deste conjunto. Juntamente com o compartimento  $I_q$ , o conjunto  $I_d$  não é composto por agentes propulsores da infecção. A doença propaga-se antes através do contacto entre elementos dos conjuntos  $I$  e  $S$ . Deste modo o modelo pode ser descrito por um sistema de 9 equações diferenciais para os fluxos entre os diferentes compartimentos. A partir desse sistema podem-se obter as equações que dizem respeito à evolução do número diário de novos infetados,  $Ne_d$ , do número total de casos detetados  $NT_d$  e do número de mortos detetados,  $D_d$ .

$$\frac{dNe_d}{dt} = \frac{d}{\tau_I \tau_{Id}} (E + E_Q) - \left[ \frac{d}{\tau_{Id}} + \frac{(1-d)(1-l)}{\tau_R} + \frac{(1-d)l}{\tau_D} \right] Ne_d$$

$$\frac{dNT_d}{dt} = \frac{d}{\tau_I} (I + I_Q)$$

$$\frac{dD_d}{dt} = \frac{l}{\tau_D} I_d$$

Naturalmente, a validade de um modelo deve ser aferida pela qualidade das previsões quando confrontadas com as observações. Nesse sentido, foram analisados dados para 11 países [3] que se apresentam na figura 3. Os dados foram recolhidos a partir do Johns Hopkins Coronavirus Resource Center [4] e as curvas de ajuste foram obtidas utilizando a plataforma fitteia.org [5].

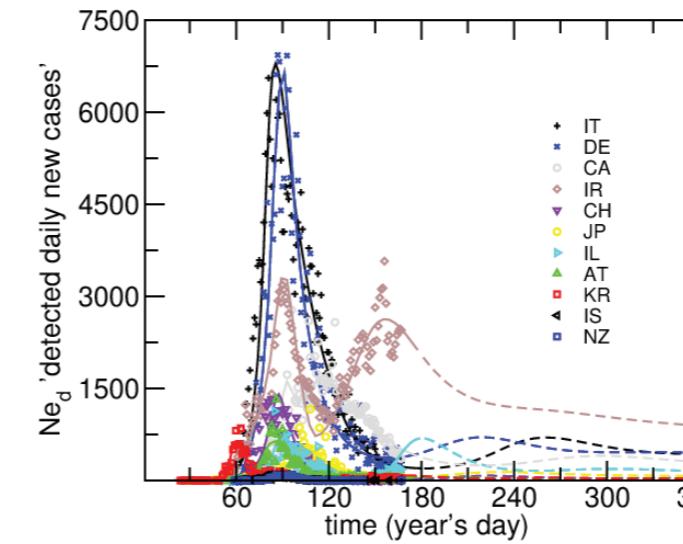


Figura 3: Ajuste dos dados recolhidos para o conjunto dos 11 países estudados e projeções até ao final do ano 2020

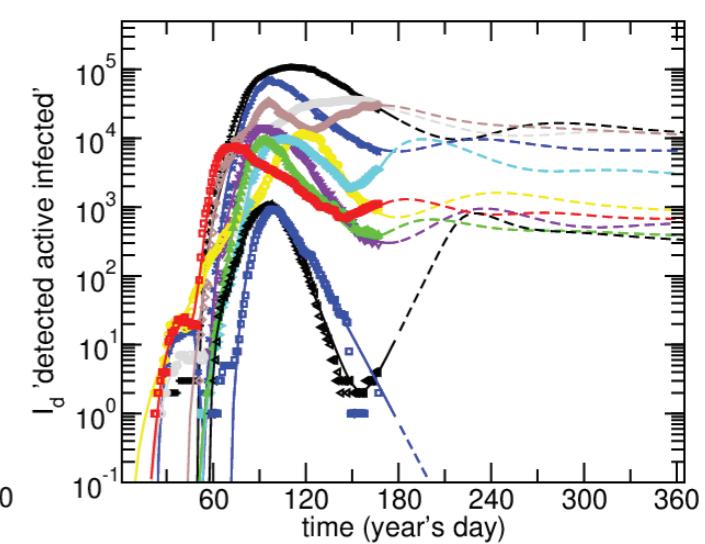
Claramente o modelo utilizado explica todos os dados até ao dia 15 de Junho, sendo que, para os países considerados, a primeira vaga estava já a evanescer e para alguns já se antevia uma segunda vaga. Os países analisados foram selecionados tendo em conta a sua diversidade geográfica, política, religiosa, e cultural, para além de incluir diferen-

diferenças entre estratégias de mitigação implementadas. Consideraram-se países para os quais foi possível obter dados consistentes para infectados e recuperados.

O caráter oscilatório da evolução pandémica é evidente, assim como a evolução das curvas do modelo, que, naturalmente, se ajustam aos dados com uma qualidade que é patente.

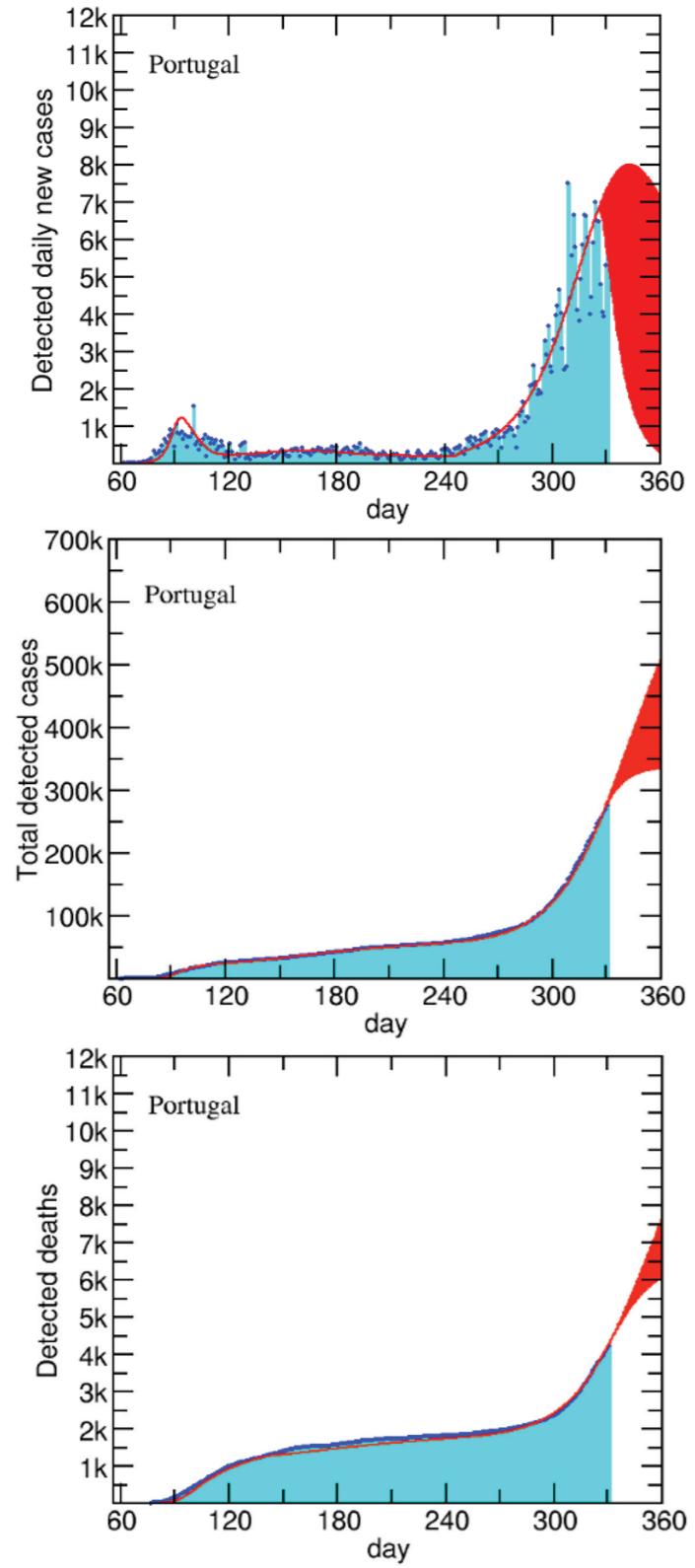
No caso de Portugal, que não disponibiliza dados de recuperados de forma consistente, (os critérios de recuperação foram sendo progressivamente revistos ao longo do ano) só pode ser analisado considerando um tempo característico de recuperação de 14 dias, que está dentro dos obtidos para outros países. Na figura 4 apresentam-se os gráficos que incluem não só os dados recolhidos para Portugal [4], mas também as curvas de ajuste e projeções da evolução da pandemia até ao final do ano.

A segunda vaga, que aflige a população portuguesa (e a generalidade dos países) é explicada pelo modelo através da passagem progressiva de pessoas do compartimento  $P$  (protegidas) para o compartimento onde são suscetíveis de contraírem a doença. O momento inicial, a taxa de evolução desse processo e o tempo durante o qual essa passagem se verifica ditam a amplitude e a duração da segunda vaga. Assim, na impossibilidade de antecipar a resposta da população às medidas impostas pelo governo para conter a pandemia, elaboraram-se dois cenários representativos. Um em que se assume que a população não respeita as medidas ou que estas se revelam insuficientes e outro em que, pelo contrário, o respeito e/ou eficácia da medidas leva a que se observe uma antecipação na redução do número diário de novos casos (regiões vermelhas da figura 4).



Nestes cenários o número de mortes por COVID-19 no final do ano poderá estar no intervalo 5500-7500. É relativamente fácil comparar estas simulações com outras disponibilizadas, por exemplo, pelo Institute for Health Metrics and Evaluation [6].

Embora a qualidade da análise e as projeções sejam en-



**Figura 4:** Ajuste dos dados da pandemia em Portugal até ao dia 26/11/2020 e projeções até ao final do ano 2020.

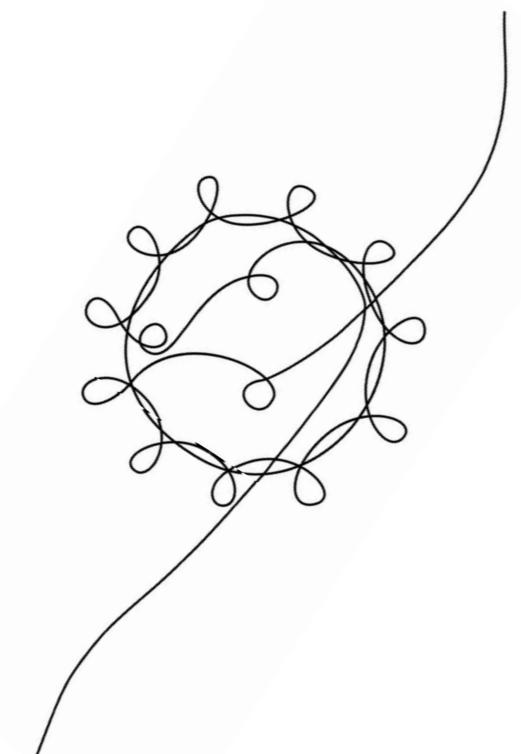
corajadoras e revelem que o modelo permite explicar a evolução da pandemia num número significativo de países julgamos que o mais importante desta análise foi demonstrar que o carácter oscilante é intrínseco ao sistema em resultado da reacção das pessoas à evolução da pandemia, ela própria oscilante.

Fica demonstrado que essas alterações de comportamento podem ser incluídas na descrição da evolução da epidemia e que o sistema de equações, necessariamente mais complexo do que o simples modelo SIR, pode ser resolvido de forma relativamente expedita e permite efectuar projeções mais fundamentadas e menos empíricas e estatísticas. Uma vez que a plataforma fitteia.org é de acesso livre, é possível a qualquer pessoa testar outros modelos, incluir outros factores que considere mais relevantes ou explorar outros aspectos da pandemia. É nesse sentido que um engenheiro físico pode também dar a sua contribuição identificando semelhanças entre sistemas aparentemente dispares (ex. oscilações num pêndulo rígido vs. sucessivas vagas numa pandemia), desenvolvendo métodos e ferramentas que permitam facilitar a análise dos dados, validar modelos e, no caso da atual pandemia, contribuir para ajudar a compreender e controlar a sua evolução.

#### Referências:

- [1] João C Fernandes, Pedro J Sebastião, Luís N. Gonçalves, António Ferreira,  
"Study of large-angle anharmonic oscillations of a physical pendulum using an acceleration sensor", Eur. J. Phys. 38, 045004 (2017) <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6404/aa6c52>
- [2] <https://sites.google.com/tecnico.ulisboa.pt/fitteia/home/covid-19>, 30/11/2020
- [3] A data-driven epidemiological model to explain the Covid-19 pandemic in multiple countries and help in choosing mitigation strategies, Maria Jardim Beira, Anant Kumar, Lília Perfeito, Joana Gonçalves-Sá, Pedro José Sebastião, MedRxiv, <https://doi.org/10.1101/2020.08.15.20175588>
- [4] <https://github.com/CSSEGISandData/COVID-19>
- [5] "The art of model fitting to experimental results", P.J. Sebastião 2014  
Eur. J. Phys. 35, 015017, DOI: 10.1088/0143-0807/35/1/015017
- [6] <https://covid19.healthdata.org/portugal>

**Nota:** As previsões da figura 4 incluem ambas os valores reais [413 678 casos e 6906 mortes detetadas devido à pandemia de Covid-19] até ao dia 31 de dezembro de 2020, segundo o relatório de situação da DGS.



# Pr+toes Contra o Cancro

por Patrícia Gonçalves

Laboratório de Instrumentação e Partículas, Instituto Superior Técnico

O uso de protões em radioterapia foi proposto em 1946 por Robert Wilson no artigo, "Radiological use of Fast Protons" e o primeiro paciente foi tratado com partículas carregadas em 1954 no Laboratório Lawrence Berkeley nos Estados Unidos. Desde então, até hoje, mais de 200 mil pacientes foram tratados com recurso a feixes de partículas carregadas em todo o mundo. Portugal está ainda fora da lista dos países que dispõem desta tecnologia, mas esperamos que por pouco tempo...

## O que é o cancro?

O cancro é um grupo de doenças em que existe uma proliferação anormal e descontrolada de células que tiveram origem numa célula "normal" que sofreu mutações dando origem a células que têm a capacidade de se continuar a multiplicar, alastrando-se a outros tecidos e órgãos para além daqueles a que pertencia a célula inicial. As mutações de células têm origem em alterações no ADN que são geralmente reparadas ou conduzem à morte celular por apoptose – que é a morte "controlada" e organizada da célula. O cancro resulta assim de uma desregulação da proliferação e da apoptose, assim como da falência dos mecanismos reguladores da diferenciação celular normal.

## Porque é que se usa radiação no combate ao cancro?

O combate ao cancro faz-se recorrendo a diversas terapêuticas, entre as quais a radioterapia. Estas terapêuticas apostam na quebra da capacidade de sobrevivência das células cancerígenas ou na indução de alterações nas células que as tornem menos perigosas. No caso da radioterapia a capacidade da radiação ionizante em penetrar nas células cancerígenas, atingindo o ADN e induzindo quebras na sua estrutura, é usada para limitar a capacidade de desenvolvimento e de multiplicação destas células.

Um parêntesis para definir "radiação". Radiação é simplesmente a propagação de energia através do espaço, e radiação ionizante, como o nome indica, é radiação com a capacidade de ionizar a matéria. O transporte da energia através do espaço é feito através de partículas carregadas (como os eletrões e os protões) ou neutras (fotões e neutrões). Assim, designamos por radiação ionizante as partículas carregadas ou neutras com energia cinética suficiente para induzir a ionização de átomos e moléculas.

Existem três tipos de radioterapia que são aplicados conforme o tipo de cancro a tratar: a radioterapia com feixes externos, que usa feixes de fotões energéticos ou de partículas carregadas; a radioterapia com fontes radioativas, como a braquiterapia, em que pequenas fontes radioativas são colocadas junto ao tumor; e o tratamento

sistémico com radiação em que drogas radioativas são injetadas ou ingeridas pelos pacientes.

No caso da radioterapia com feixes externos, em que este artigo se foca, o objetivo é que as partículas energéticas ou os fotões atinjam as células cancerígenas causando o mínimo de dano possível nos tecidos saudáveis que atravessam, existindo diversas estratégias desenvolvidas, e em desenvolvimento, para limitar os danos que a radiação pode causar aos tecidos saudáveis.

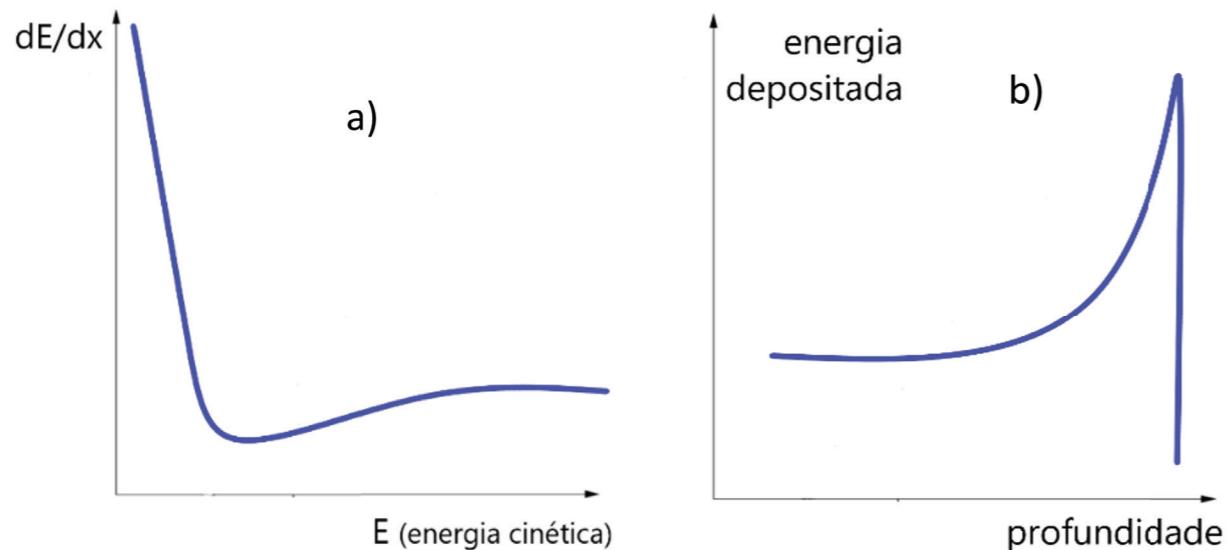
A radioterapia externa com feixes de fotões produzidos em aceleradores lineares de eletrões, LINACS, é a principal técnica de radioterapia externa utilizada atualmente em todo o mundo. Os feixes de fotões são produzidos quando os eletrões acelerados até energias tipicamente entre os 4 MeV<sup>1</sup> e os 25 MeV colidem com um alvo metálico. No caso da radioterapia com partículas carregadas, os protões (ou os iões de Carbono ou Hélio) são acelerados num ciclotrão ou num sincrotrão, utilizando combinações de campos magnéticos e elétricos, até atingirem a energia cinética suficiente para terem capacidade de penetrar os tecidos e atingir o volume que se pretende tratar. Essas energias variam entre cerca de 50 e 250 MeV, correspondendo a profundidades de penetração nos tecidos entre os poucos milímetros e cerca de 35 centímetros.

## Porquê utilizar protões e não fotões na radioterapia externa?

A grande vantagem da radioterapia com feixes de partículas carregadas face à utilização de feixes de fotões energéticos não se deve à capacidade de as partículas carregadas eliminarem mais células tumorais que os fotões, mas sim à sua capacidade de poupar mais tecidos saudáveis. Esta vantagem tem origem nas diferenças intrínsecas entre as interações de fotões com a matéria e as interações das partículas carregadas com a matéria.

Um feixe de partículas carregadas interage diretamente com a matéria através da excitação e ionização dos eletrões do meio e perde cada vez mais energia à medida que a distância percorrida aumenta - se a sua energia cinética inicial for inferior a cerca de 2.5 Mc<sup>2</sup>, em que M é a massa das partículas e c a velocidade da luz no vácuo - correspondendo ao regime à esquerda do mínimo na figura 1.a). Este regime, em que a perda de energia é tanto maior quanto menor for a energia cinética das partículas, resulta numa estrutura conhecida pelo pico de Bragg, representada na figura 1.b), que corresponde à deposição de energia máxima das partículas carregadas no material e à sua paragem efetiva - a grandeza dE/dx também é conhecida por poder de paragem do meio.

No caso de um feixe de fotões, a interação com o meio é indireta: os fotões propagam-se nos tecidos e, dependendo da sua energia, interagem com a matéria através de efeitos



**Figura 1:** a) Representação da dependência perda de energia por ionização por unidade de comprimento em função da energia cinética de partículas carregadas. b) Representação da dependência da energia depositada por partículas carregadas no meio em função da distância percorrida.

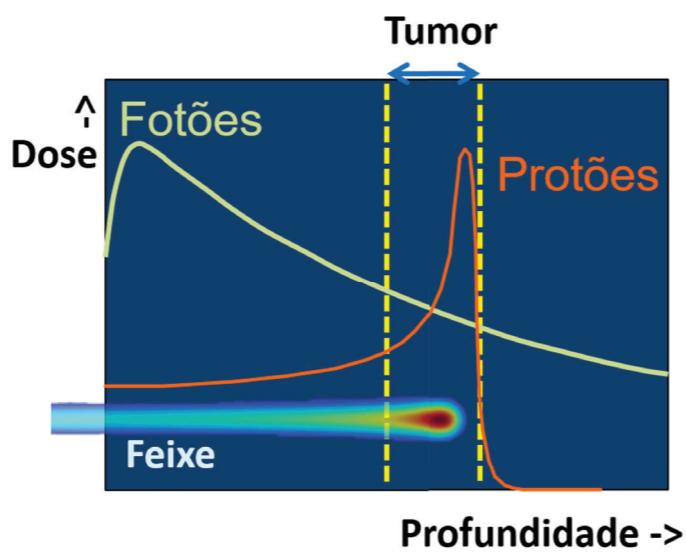
fotoelétrico, da difusão de Compton, ou originando pares eletrão-positrão. Estas interações originam eletrões (e positrões) secundários que perdem energia na matéria ionizando e excitando os átomos. No entanto, apesar da "cascata" de eletrões (e positrões), os feixes de fotões continuam a propagar-se através dos tecidos até atingirem as células tumorais, mas também para além delas, de acordo com a lei de Beer-Lambert [1]. Esta lei descreve a atenuação exponencial de um feixe de fotões de determinada energia ao atravessar uma distância  $x$  num material, sendo o coeficiente de atenuação dos fotões por unidade de comprimento,  $\mu$ , a probabilidade de interação dos fotões por unidade de comprimento, que corresponde ao inverso da distância média percorrida pelos fotões entre duas interações sucessivas.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

A energia depositada por um feixe de partículas carregadas após o pico de Bragg, cuja localização depende da energia inicial das partículas, diminui abruptamente com a paragem das partículas, ao passo que um feixe de fotões, à mesma profundidade, muito embora atenuado, continua a depositar energia nos tecidos. A figura 2. ilustra este efeito, mostrando que a denominada dose de saída de um feixe de fotões é essencialmente nula, ao passo que num feixe de fotões a dose de saída é significativa, sendo a dose a energia depositada por unidade de massa, que se mede em Gray ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ ).

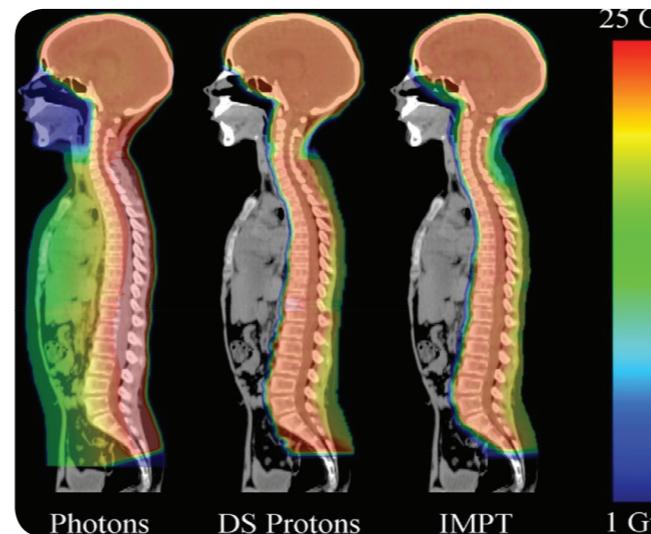
A terapia com partículas carregadas é assim particularmente indicada face à radioterapia com fotões nos casos em que é especialmente importante poupar os tecidos saudáveis. São exemplos importantes os cancros pediátricos, em que os efeitos da irradiação de tecidos saudáveis podem ser nefastos a longo termo, ou os tumores localiza-

dos perto de tecidos ou órgãos sensíveis, para os quais a terapia com partículas carregadas pode ser a única terapia viável.



**Figura 2:** Representação esquemática da deposição de dose para protões e fotões em tecidos. A curva laranja representa um feixe mono-energético de protões (pico de Bragg). A curva de amarelo representa a deposição de dose de fotões.

A figura 3. mostra a comparação simulada da distribuição de dose recebida na irradiação de um paciente pediátrico com fotões e usando duas técnicas diferentes de irradiação com feixes de protões, correspondendo a irradiações ao longo do eixo da coluna vertebral. É claramente visível que a dose em órgãos críticos é praticamente nula no caso das irradiações com protões, ao passo que no caso dos fotões o tórax e abdómen são atingidos.



**Figura 3:** Comparação simulada da distribuição de dose recebida na irradiação de um paciente pediátrico com fotões e usando duas técnicas diferentes de irradiação com feixes de protões, ao longo do eixo da coluna vertebral (Stokkevåg et al., (2014) Acta Oncol. 53:8 1051-2)

### Onde se localizam os centros de radioterapia com partículas carregadas em funcionamento no mundo? E em Portugal?

Atualmente existem cerca de 110 centros de terapia com partículas carregadas em todo o mundo, que se distribuem por 20 países<sup>3</sup>. Destes centros 38 localizam-se na Europa, a grande maioria utilizando protões e uma minoria iões de carbono. Portugal não faz ainda parte destes países, no entanto, em março de 2018 o Conselho Ministro aprovou uma orientação estratégica para a criação de em Portugal de uma unidade de saúde para tratamento do cancro com feixes de partículas carregadas.

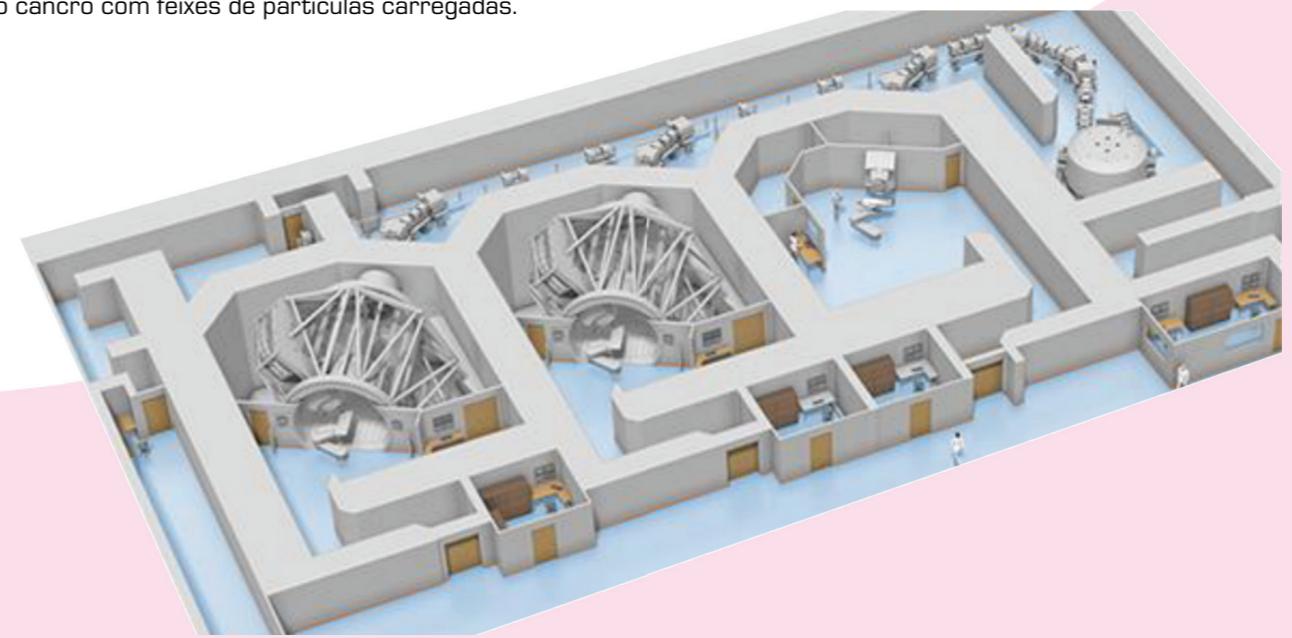
Em dezembro de 2019, com o objetivo de instalar e operar a futura rede de terapia com protões em Portugal, foi criada a Associação Portuguesa de Proto-Terapia e Tecnologias Avançadas para a Prevenção e Tratamento do Cancro, a ProtoTera, da qual fazem, parte o Grupo Hospitalar Instituto Português de Oncologia, o Instituto Superior Técnico (IST), a Universidade de Coimbra (UC) e o Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, o LIP. A rede prevê a instalação no Campus Tecnológico Nuclear do IST de uma unidade de tratamento, investigação e ensino baseada num ciclotrão de 250 MeV, com salas de tratamento e de investigação, com uma instalação típica como a ilustrada na figura 4.

Prevê-se também a instalação de um ciclotrão de 70 MeV em Coimbra, no Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saúde da UC, com uma sala de tratamento de tumores oculares e capacidade de produção de radiofármacos para diagnóstico e terapia, assegurando a independência nacional nesta área. Espera-se que ambas as unidades planeadas entrem em funcionamento na segunda metade desta década. Esta é uma área que previsivelmente virá a ter um crescimento significativo em Portugal nos próximos anos, e, para além do avanço significativo no tratamento oncológico que representa, poderá vir a ser uma fonte de colaboração multidisciplinar, de desenvolvimento de investigação aplicada e de formação de profissionais.

<sup>1</sup> 1 MeV =  $10^6$  eV. Onde eV é o símbolo para electrãoVolt, a energia que um electrão adquire quando é acelerado por uma diferença de potencial de 1 Volt e que corresponde a  $1.602 \times 10^{-19}$ J

<sup>2</sup> DS: Double Scattering  
IMPT: Intensity Modulated Proton Therapy

<sup>3</sup> Particle Therapy Co-operative Group (<https://www.ptcog.ch/>)



**Figura 4:** Exemplo de uma planta de um centro de terapia com protões com duas salas de tratamento e uma sala de investigação. No sentido da direita para a esquerda da imagem podemos observar a sala do ciclotrão, uma sala de tratamento com feixes fixos e duas salas de tratamento com gântrias. As gântrias são estruturas eletromecânicas com cerca de 3 pisos de altura e permitem curvar e rodar o feixe de protões 360° em torno do paciente. (<https://iba-worldwide.com/proton-therapy/proton-therapy-solutions/proteus-plus>).

# Desigualdades de Bell para os Alunos Não-Quantizados

por Carlos Couto

Alumnus de MEFT, Instituto Superior Técnico

**A**s desigualdades de Bell são simples desigualdades estatísticas que Bell derivou em 1964 (Bell, 1964) em resposta ao famoso paradoxo EPR (Einstein et al., 1935). Nesse artigo de Bell, ele argumenta que a Mecânica Quântica não é compatível com uma teoria de variáveis ocultas locais. Aqui, iremos introduzir uma desigualdade de Bell simples sem conhecimento prévio de Mecânica Quântica, adaptando uma exposição feita em (Maccone, 2013) e nas referências lá contidas. Posteriormente, analisaremos um sistema quântico equivalente e mostraremos que ele infringe a desigualdade de Bell que foi derivada, levando-nos às mesmas conclusões que Bell tirou em 1964.

## Uma desigualdade de Bell clássica

Imagine duas pessoas, a Alice e o Bob. O Bob vive longe da Alice e a ambos são dados dois aparelhos estranhos. Cada aparelho tem três botões (botão A, B e C) e um ecrã vazio. Quando um botão é pressionado aparece um 0 ou um 1 no ecrã. Contudo, depois de pressionar um dado botão, pressionar os outros não causa qualquer mudança no aparelho até este ser reiniciado. Depois de experimentarem com os aparelhos eles repararam que a probabilidade de um dado botão dar 0 ou 1 era a mesma, para qualquer um dos três botões. Ainda mais estranho, eles repararam que se um deles pressionar um botão então se a outra pessoa também pressionar o mesmo botão no seu outro aparelho **vai sempre obter o mesmo número que a primeira pessoa obteve**. Isto significa que, quando a Alice pressiona um dado botão, ela sabe com toda a certeza que número o Bob vai obter se ele carregar no mesmo botão e vice-versa. É possível então argumentar que poderão haver variáveis ocultas que são desconhecidas à Alice e ao Bob e que governam o comportamento de ambos os aparelhos. Se essas variáveis fossem conhecidas então eles poderiam prever com toda a certeza qual a resposta do aparelho. Neste sentido, podemos assumir que quando o aparelho é reiniciado existe uma distribuição de probabilidade conjunta que governa a resposta do aparelho no ecrã, tal que

$$\sum_{a,b,c \in \{0,1\}} P(a,b,c) = 1 ,$$

onde a,b,c são os valores que aparecem no ecrã quando premido um dos três botões, A, B, C, respectivamente. Agora, reparem que nem a Alice nem o Bob conseguem medir diretamente  $P(a,b,c)$ , no máximo conseguem encontrar o valor de dois dos três botões em cada ensaio que fizerem. Então, a probabilidade de que o valor do botão A é o mesmo que o valor do botão B,  $P_{igual}(A,B)$ , é dado por

$$P_{igual}(A,B) = P(0,0,0) + P(0,0,1) + P(1,1,0) + P(1,1,1) ,$$

e, pelo mesmo raciocínio, obtêm-se expressões para os outros dois casos. Somando essas três expressões e usando o facto de que a soma sobre todos os outputs possíveis tem de dar um, permite-nos chegar à seguinte desigualdade

$$P_{igual}(A,B) + P_{igual}(A,C) + P_{igual}(B,C) \geq 1 .$$

A equação acima basicamente diz-nos que temos **sempre dois dos botões com o mesmo valor**. Este é um exemplo simples de uma **desigualdade de Bell**.

Antes de tentarmos introduzir o caso quântico deste exemplo devemos analisar com cuidado as hipóteses que fizemos. Estamos a assumir que o aparelho é governado por uma distribuição de probabilidade conjunta, o que se costuma chamar de **hipótese de variável oculta**. Também assumimos que uma medição feita pela Alice não perturba qualquer medição que o Bob faça depois, isto é, as variáveis ocultas são locais, o que se costuma chamar de **hipótese de localidade**. Tomando ambas as hipóteses leva-nos à desigualdade de Bell que obtivemos. Isto também significa que, se por alguma razão nós medirmos as probabilidades e descobrirmos que a desigualdade de Bell não é respeitada, então uma das nossas hipóteses não é válida e tem de estar **errada**.

## Uma realização quântica do aparelho

Podemos traduzir o sistema anterior para o formalismo de mecânica quântica para vermos o concluirmos no contexto da teoria quântica. Para o fazermos, dizemos que o aparelho efetua a medição do estado de um bit quântico (qubit) numa dada direção. Para esta análise funcionar então o estado tem de ser dado, por exemplo, por

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( (1\ 0)^T \otimes (0\ 1)^T - (0\ 1)^T \otimes (1\ 0)^T \right) ,$$

onde devemos olhar para |.) como uma representação de um vetor e para a operação  $\otimes$  como uma notação para representar quer o qubit da Alice como o qubit do Bob no mesmo estado quântico, com o qubit da Alice sendo o primeiro, dado antes do  $\otimes$ , e o qubit do Bob sendo o que aparece depois do símbolo.

O botão premido diz ao aparelho em que direção no espaço tridimensional é que deve ser medido o valor do qubit. Para os mais interessados, estes qubits podem ser realizados fisicamente usando, por exemplo, eletrões como qubits e o seu spin para cima ou para baixo numa dada direção como os valores para o qubit.

Para além disso, nós dizemos que os dois qubits, um em cada um dos aparelhos, foram preparados de tal modo que, se a Alice medir o seu valor numa dada direção, então

o Bob irá obter o mesmo valor se medir na direção oposta. Formalmente, em Mecânica Quântica para medirmos algo nós atuamos com um operador no estado  $|\psi\rangle$ . Aqui, nós usamos a notação  $(\hat{a} \cdot \vec{\sigma}^{(A)})$  para representar o operador que mede o valor do qubit da Alice na direção  $\hat{a}$ . Assim sendo, podemos então atuar com este operador no estado da Alice para medir o valor do respectivo qubit. Este operador tem uma forma matricial dada por:

$$\hat{n} \cdot \vec{\sigma} = \vec{\sigma} \cdot \hat{n} = \begin{pmatrix} \cos \theta & e^{-i\phi} \sin \theta \\ e^{i\phi} \sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} ,$$

com  $\hat{n} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ . Portanto, para medirmos um dado qubit apenas temos de multiplicar a matriz acima pelo vetor correspondente, dependendo se queremos medir o qubit da Alice ou do Bob. A nossa condição de eles obterem o mesmo valor quando medem em direções opostas implica que

$$(\vec{\sigma}^{(A)} \cdot \hat{a}) |\psi\rangle = -(\vec{\sigma}^{(B)} \cdot \hat{a}) |\psi\rangle \Leftrightarrow (\vec{\sigma}^{(A)} + \vec{\sigma}^{(B)}) |\psi\rangle = 0 ,$$

onde os índices A e B indicam se os operadores atuam nos vetores da Alice ou do Bob. A equação acima diz-nos que podemos simplesmente substituir o operador que atua no estado do Bob pelo simétrico do que atua no estado da Alice.

Em Mecânica Quântica, o valor esperado de um dado operador  $O$  é dado pelo produto  $\langle \psi | O | \psi \rangle$  onde  $\langle \psi |$  no nosso caso é simplesmente igual à equação que tínhamos para mas com os vetores coluna substituídos por vetores linha. Então, se fizermos a multiplicação podemos mostrar que o valor esperado para a medição do qubit da Alice na direção  $\hat{a}$  e do qubit do Bob na direção  $\hat{b}$  é

$$\langle \psi | (\vec{\sigma}^{(A)} \cdot \hat{a}) (\vec{\sigma}^{(B)} \cdot \hat{b}) | \psi \rangle = -\hat{a} \cdot \hat{b} = -\cos \theta ,$$

onde agora  $\theta$  é o ângulo entre os vetores unitários  $\hat{a}$  e  $\hat{b}$ . Podemos confirmar que se a Alice medir numa dada direção e o Bob medir na direção oposta, isto é se  $\theta = \pi$  então vemos que o valor esperado é 1. Isto implica que os valores obtidos pela Alice e pelo Bob estão completamente correlacionados, como esperado.

Caso o qubit fosse realizado com um electrão, este operador de medir o spin do qubit quando atua num vetor próprio dá o valor +1 no caso de o spin apontar para cima e -1 no caso de o spin apontar para baixo. Podemos então construir um operador que dê o valor zero quando o spin aponta para baixo e o valor um quando o spin aponta para cima, utilizando a matriz identidade,  $\mathbb{I}$ , que tem valor próprio 1 para qualquer vetor não nulo. Tal operador pode ser escrito da seguinte forma

$$V(\hat{n}, \pm) = \frac{1}{2} (\mathbb{I} \pm \vec{\sigma} \cdot \hat{n}) .$$

Portanto,  $V(\hat{n}, +)$  dá zero se o qubit na direção  $\hat{n}$  não apontar para cima e dá um se sim. O mesmo é válido para o operador com o sinal de menos e na direção para baixo. Usando as três equações anteriores podemos calcular o valor esperado de a Alice medir 1 na direção  $\hat{a}$  e de o Bob também medir 1 na direção  $\hat{b}$ . Este valor esperado é representado por:

$$P(++) = \langle \psi | V^{(A)} (\hat{a}, +) V^{(B)} (\hat{b}, +) | \psi \rangle = \frac{1}{4} (1 - \cos \theta) .$$

De maneira semelhante, obtemos:

$$P(--) = \langle \psi | V^{(A)} (\hat{a}, -) V^{(B)} (\hat{b}, -) | \psi \rangle = \frac{1}{4} (1 - \cos \theta) .$$

E portanto concluímos que

$$P_{igual} = P(++) + P(--) = \frac{1}{2} (1 - \cos \theta) .$$

Agora, imaginemos que os três botões do aparelho da Alice medem em três direções que estejam separadas umas das outras por um ângulo de  $120^\circ$  e que os do aparelho do Bob medem nas três direções opostas a estas. Isto é, todas estas direções estão nos vértices de um hexágono. Então, como dito anteriormente, se eles escolherem o mesmo botão teremos que  $\theta = \pi$  e obtemos  $P_{igual} = 1$ . Contudo, se eles não escolherem o mesmo botão então teremos sempre que o ângulo entre eles é  $\theta = \pm \frac{\pi}{3}$ , devido às direções escolhidas, e com este ângulo obtemos sempre  $P_{igual} = \frac{1}{4}$ .

Analizando então a nossa desigualdade, temos que

$$P_{igual}(A, B) = P_{igual}(A, C) = P_{igual}(B, C) = \frac{1}{4} .$$

E, portanto, se somarmos as três contribuições obtemos  $\frac{3}{4}$  que não é maior do que um! A nossa desigualdade de Bell foi então **infringida**!

## Conclusão

O facto acima exposto de que a Mecânica Quântica infringe a desigualdade de Bell significa que uma das nossas hipóteses tem de estar errada. Isto é, a Mecânica Quântica não é compatível com uma teoria de variáveis ocultas locais. Portanto, é **impossível** que a Mecânica Quântica possa ser trocada por uma teoria mais completa que englobe algumas variáveis ocultas locais. As predições de tal teoria **não seriam compatíveis** com as predições fornecidas pela Mecânica Quântica.

Foi assim que Bell descontruiu o sonho de Einstein de que a teoria quântica poderia ser mais bem explicada por uma versão local mais completa da Natureza. Se quisermos manter a hipótese da localidade temos que abandonar a hipótese das variáveis ocultas e, do mesmo modo, se quisermos ter uma teoria com variáveis ocultas então teremos de permitir que as mesmas não sejam locais e possam causar "ações assustadoras à distância" <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Tradução da expressão inglesa "spooky action at a distance", originalmente dita por Einstein quando se referia ao fenômeno de entrelaçamento quântico.

### Referências:

- Bell, J. S. (1964, November). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. Physics Physique Fizika, 195-200.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935, May). Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? Phys. Rev. 777-780.
- Maccone, L. (2013, November). A simple proof of Bell's inequality. American Journal of Physics, 854-859.

# Entrevista a William Magwood

por Ana Filipa Valente e José Maria Cruz

Alunos do 4º ano de MEFT, Instituto Superior Técnico

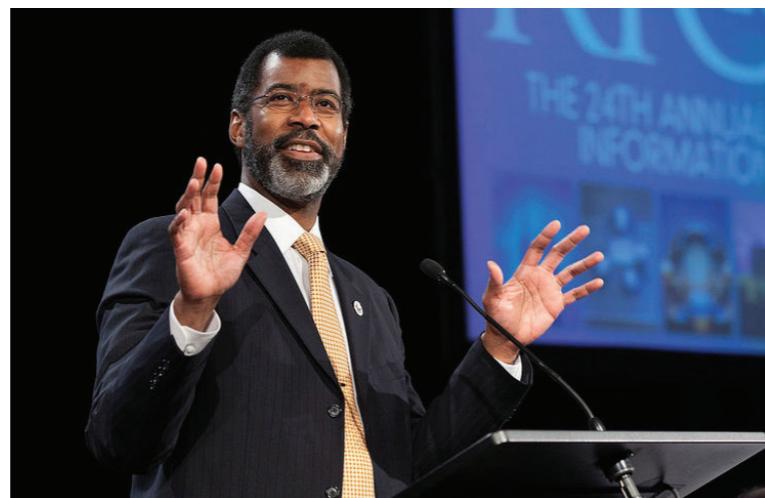
William D. Magwood, responsável pela Agência de Energia Nuclear (NEA) da OCDE visitou o Instituto Superior Técnico no dia 7 de Outubro de 2020, onde conversou com alunos de Engenharia Física Tecnológica, discutindo o papel da energia nuclear no combate às alterações climáticas, a igualdade de género em ciência e o futuro das tecnologias nucleares.

**Olá, podia apresentar-se aos nossos leitores?**

Claro! O meu nome é Will Magwood, sou o Diretor-Geral da Agência para a Energia Nuclear (NEA), que é parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), sediada em Paris, e eu dirijo a organização, composta por 33 países. Temos uma estrutura de trabalho que reúne países através de uma variedade de grupos de trabalho e comités. Temos à volta de 80 grupos de trabalho dentro da NEA e estes produzem todos

**Poderia agora dizer-nos um pouco mais sobre o seu percurso profissional e académico? Não parecem muito comuns!**

Não, é um pouco fora do comum. Eu era Físico na Universidade de Carnegie Mellon e, quando eu estava lá, pensava que queria ser um investigador científico e tive a oportunidade de trabalhar em laboratórios de investigação durante os verões. Descobri algo interessante. O que eu descobri foi que os investigadores de ciência são todos brilhantes, pessoas fantásticas, mas que afinal não tinham controlo nenhum sobre o tema da sua investigação. Eu decidi que preferia ser uma das pessoas que diz aos investigadores o que fazer do que ser um investigador e que me digam o que fazer. Quando mais ou menos o decidi, já tinha tirado uma licenciatura em Inglês na Universidade de Carnegie Mellon, era o meu segundo diploma. Depois, tirei também um mestrado em Belas-Artes. E esta foi um pouco uma manobra de diversão, porque eu não tinha a certeza de que queria fazer. Mas quando decidi "Bem, vamos ficar-nos por uma carreira técnica", terminei isso e simplesmente fui para Washington e isso levou-me, eventualmente, à posição de chefe do programa nuclear de investigação dos Estados Unidos da América (EUA), que exercei durante sete anos e apreciei muito. Finalmente, depois de uma pausa curta, tornei-me comissário para a Comissão Regulamentar Nuclear dos Estados Unidos. Assim, já trabalhei em Física Nuclear da perspetiva da indústria, da investigação governamental e também na perspetiva da segurança. De certa forma, percorri todos esses caminhos e agora estou aqui, em Paris, a trabalhar na Europa há cinco anos com a NEA. E tem sido uma experiência muito interessante!



**Figura 1:** William D. Magwood na 24ª Conferência de Informação Regulatória anual do NRC, realizada em Rockville, Maryland, em 2012

**O que faz um físico deixar um emprego em física por um cargo político?**

Eu gosto de controlo. Para mim a parte mesmo interessante do que eu faço é poder estabelecer uma visão, fazer as coisas acontecer e, depois, executar. Eu queria poder ter uma visão geral e fazer as coisas acontecer. Então quando eu estava no Departamento de Energia, desenvolvi a ideia de criar o Fórum Internacional de IV Geração. A minha ideia era que, talvez, países a trabalharem juntos podem adiantar estas novas tecnologias mais depressa do que se trabalhassem separados. E toda a gente pareceu concordar com isto! Então juntámos toda a gente e acabámos por ter doze países a aceitar assinar o tratado no Fórum Internacional de IV Geração. E eles continuam por cá! Ironicamente, está agora debaixo dos auspícios da NEA, por isso, ainda consigo ir às reuniões e ver o que se vai passando. É uma atividade muito vibrante e técnica ver todos os tipos de tecnologia de reatores e problemas de material. É muito interessante mas, para mim, a possibilidade de criar algo assim era mais importante do que ver os detalhes da tecnologia. Por isso, sou mais uma pessoa de visão geral, acho eu. Quer dizer, como não fiquei no caminho da investigação, não sou a pessoa certa para ir desenvolver o próximo campo de tecnologia, mas posso criar os ambientes para as pessoas o poderem fazer. E é isso que gosto de fazer!

**Falou da NEA, podia dizer aos nossos leitores o que é e descrever o que representa?**

A NEA é uma associação de trinta e três governos, que, juntos, operam à volta de 85 a 90% de todo o potencial energético nuclear. Assim, têm mais experiência com segurança nuclear, proteção de radiação, tecnologia e investigação do que a maioria do resto do mundo. Estes países criaram um contexto de trabalho da NEA para poderem trabalhar juntos para resolver problemas de interesse comum. Somos, então, um quadro de cooperação e fazemos também parcerias com países chave, como por exemplo a China, a Índia e o Brasil, e esperamos criar novos compromissos para podermos fazer investigação juntas. Queremos avançar a tecnologia de ponta, avançar a nossa compreensão de um leque abrangente de coisas.

**Passando para outro tópico, porque é que está aqui hoje? Porque é que os alunos de física lhe interessam?**

Bem, eu sou um ex-aluno de Física e quando estava a falar com vocês, hoje, encorajei-vos a fazer o esforço de falarem com miúdos do ensino secundário, a ir encorajá-los também. E é isso um pouco o que estou a fazer aqui. Eu estive onde estão agora a certa altura e queria vir aqui dizer que têm uma ótima carreira pela vossa frente, têm um ótimo futuro e devem continuar, vão fazer coisas fantás-

ticas porque o mundo precisa de vocês, precisa de novas soluções. E acho que esta geração vai herdar uma série de problemas no mundo que vos vamos deixar que vão ter de resolver, desejo-vos boa sorte! E façam um bom trabalho!

**Porque é que acha importante para os físicos trabalharem, por exemplo, no Departamento de Energia Nuclear, ou na NEA?**

Os físicos são diferentes dos profissionais do resto das áreas. São pessoas que têm uma visão geral, percebem como as coisas funcionam. Eu acho que um físico pode trabalhar em quase qualquer área, tem as ferramentas para perceber quase tudo. Mesmo como físico, eu acabei por liderar uma organização composta maioritariamente por engenheiros. Eu não sou um engenheiro, não finjo que sou. Mas percebo o que eles estão a tentar atingir e, quando me explicam coisas, eu percebo. Físicos são muito bons a ver este tipo de coisas, a perceber como é que as coisas funcionam juntas, percebem estes sistemas e são muitas vezes pessoas que podem ser um pouco mais criativas do que engenheiros, pois estes estão treinados a resolver problemas muito específicos. Os físicos estão treinados a olhar para o sistema no geral, o que é algo muito útil fazendo com que se possam inserir em muitas áreas diferentes. Talvez ao ir mais longe na carreira académica possam querer focar-se mais numa área do que noutra, talvez te queiras focar mais em radiação, oncologia, talvez em ótica ou algo assim, mas como físico podes fazer esse tipo de escolhas e é muito giro.



**Figura 2:** Willian D. Magwood veio ao Técnico conversar com 60 alunos de Engenharia Física Tecnológica.



**Figura 3:** William D. Magwood com os alunos de Engenharia Física Tecnológica

**Outra vez no tópico de energia nuclear, quais são as perspectivas para esta energia, especialmente na Europa, por exemplo daqui a 20 anos? Onde é que a vê?**

Bem, acho que é uma pergunta em aberto. Na minha opinião, para os países que estão mesmo empenhados na luta contra as alterações climáticas, a energia nuclear faz, pelo menos, parte da conversa. Penso que, se não estiveres orientado para pelo menos ter energia nuclear como uma opção, como pelo menos parte da solução, então não estás assim tão preocupado com as alterações climáticas. Temos de ter um plano muito racional para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. E, se tens um plano porque tens recursos solares e hídricos extraordinários ou algo assim que vá funcionar, isso é bom, mas tirar energia nuclear fora de consideração universalmente não faz sentido nenhum. Acho que é por isso que a energia nuclear continua a voltar às conversas. Por isso, acho que, durante os próximos cinco ou dez anos, os países vão ter de ver se o que estão a fazer hoje tem sucesso. Estão a conseguir reduzir as suas emissões? Estão a fornecer fontes de energia fáceis? Têm segurança nas suas fontes de energia? Vão ter de analisar bem esses problemas durante os próximos cinco ou dez anos e, em alguns casos, a resposta será "não, não o estão a fazer", e acho que para a maioria dos países vai ser uma oportunidade para a energia nuclear fazer um regresso em grande escala na Europa. Eu já tive várias conversas com Ministros de diversos países Europeus que disseram "vamos ter de voltar a olhar para isto, isto vai regressar pois estamos empenhados no problema das alterações climáticas e achamos que o que está a acontecer agora não está a funcionar". Em alguns casos, acho que estas conversas irão abrir as portas à energia nuclear. A questão é: estaremos nós prontos para a tecnologia nuclear necessária? E é aí que o setor nuclear tem de entrar na conversa.

**Disse, antes, que a energia nuclear é muito particular, muito complicada, muito cara. Acha que o desenvolvimento sustentável pode ser obtido para a energia nuclear?**

Eventualmente, sim, mas apenas se uma de duas coisas acontecer: ou melhoramos muito a nossa capacidade para construir os planos que existem hoje em dia com a tecnologia atual ou encontramos novas tecnologias mais fáceis de introduzir. Neste momento, eu acredito que será mais fácil seguir o caminho das novas tecnologias. Por exemplo, com algumas das tecnologias de reator novas que estão a ser investigadas, saíramos de um modelo onde construímos estas estruturas muito grandes e complicadas, que é mais como construir um arranha céus ou uma ponte, e passamos a ter algo que seria mais como construir um avião, onde produzimos, porque somos bons a produzir, e sabemos fazer isso: sabemos construir aviões e sabemos construir carros. Podemos usar esse tipo de abordagem para criar reatores. E, se fizermos isso e o fizermos bem, então, a energia nuclear passa a ser algo, não só viável, mas a alternativa preferida por muitos países para fornecer energia sustentável.

**No tópico da percepção do público, existem muitas pessoas com medo da energia nuclear, medo das suas consequências, especialmente se for algo mal implementado. Acredita que esta percepção pode ser alterada? E como?**

Existem pessoas que discordam comigo, mas a minha opinião é que a percepção do público pode ser alterada. Se houver centrais nucleares que operam de forma segura, eficiente e por longos períodos de tempo sem problemas

sérios então as pessoas eventualmente tornar-se-ão mais confortáveis e estes problemas serão história. Vimos isto nos EUA depois da Three Mile Island; levou anos, mas, eventualmente, as pessoas ultrapassaram-no. Esta indústria tem operado muito bem nos últimos 20 anos, não tem sido um problema, então com o que é que nos preoccupamos? E acho, particularmente, que, se tivermos êxito em implementar estas novas tecnologias, então, as pessoas irão ver que são incrivelmente seguras, que nunca se terão de preocupar com evacuar as suas casas, e acho que isso irá mudar a imagem. Mas vai levar o seu tempo e acho que não há problema. Não espero que países, como por exemplo a Itália, construam centrais nucleares atualmente. Não é necessário, eles chegarão a essa conclusão. Daqui a dez ou quinze anos veremos onde eles estão.

Assim, não o vejo como um problema a longo curso, não me preocupa. A única altura em que isto se torna um problema é quando os políticos se tentam aproveitar desses momentos. Já vimos isto acontecer com outros países, em que um filme sai e as pessoas ficam com medo pois o filme é levado como algo do género 'temos de nos livrar das pessoas no poder antes que eles começem algo'. Isso não aconteceu com a série sobre Chernobyl, felizmente, e, mesmo quando acontece é apenas num país, não é numa onda do mundo, onde uma má decisão é feita e as pessoas têm de viver com isso. Acho que cada país tem de decidir o que fazer para a sua energia e se quiserem reduzir gradualmente o poder nuclear, estão à vontade para o fazer. Mas têm de reconhecer que as consequências serão grandes e, desde que as reconheçam, então não tenho problemas



**Figuras 4 e 5:** Ana Filipa Valente e José Maria Cruz durante e após a conversa com William D. Magwood



**Conhece a série Chernobyl? Qual é que acha que foi o seu impacto na opinião pública?**

Certamente criou muito interesse e as pessoas acompanharam muito de perto essa série. Acho que muitas pessoas saíram a dizer "Ó meu deus, a energia nuclear é tão perigosa, não podemos ter nada isso!". A série, claro, tem muitas falhas técnicas, mas não vale a pena dizer isso às pessoas, elas não estão interessadas. Eu acho que, como muitas coisas que aconteceram, não é algo que vá ficar na consciência do público; por esta altura no próximo ano, as pessoas terão esquecido isto e avançado para a próxima coisa. Vemos isto a acontecer, lembro-me quando o filme do Al Gore, 'Uma Verdade Inconveniente', saiu. Houve um grande destaque ao filme meses após ter saído, as pessoas estavam a falar de ursos polares e da crise climática, assim como toda a gente esteve a falar de Chernobyl. E depois, seis meses mais tarde, já nem se lembravam do nome do filme, pois, da mesma forma que veio, também foi e as pessoas continuaram a sua vida. É assim que funciona a consciência pública.

com isso. Cada país deve tomar a sua decisão baseada na sua situação e nas suas opiniões públicas. Se quiserem energia nuclear, nós podemos ajudar; mas, se não a quiserem, podemos ajudar de outras formas.

**Para acabar, o que tem a dizer às pessoas mais jovens sobre a energia nuclear, qual é o seu papel nesta área?**

Eu acho que o papel dos mais jovens é o papel que sempre tiveram na história humana, que é continuar, avançar para a próxima geração, tomar o próximo passo, ter um olhar novo para as coisas. Não oícam os vossos pais, não oícam os vossos professores, tenham a vossa própria ideia de onde o mundo deve ir. Peguem em todos os factos e tomem decisões sobre o futuro, porque são o futuro, são vocês que lá vão estar, a liderar o mundo, na próxima metade do século, dependemos de vocês para continuarem a experiência humana. Eu acho que os jovens farão a coisa certa, vão tomar boas decisões, tenho plena confiança que o mundo será um melhor lugar por causa disso.

# A Origem Evolutiva da Linguagem



por Diogo Pires

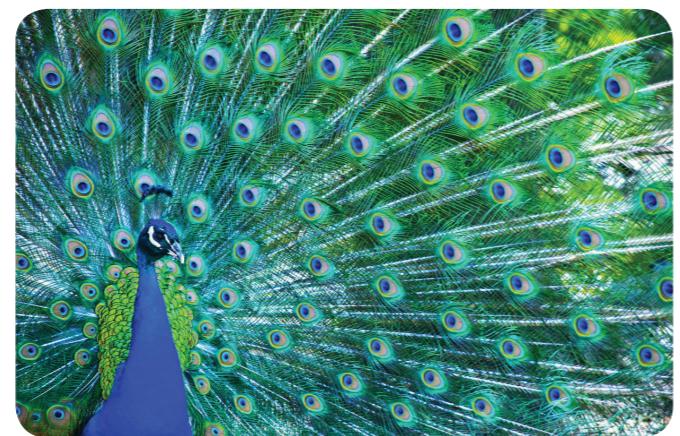
Alumnus de MEFT, Instituto Superior Técnico

**A** realidade humana e biológica está permeada a todas as escalas por sistemas de troca de informação, cada um deles requerendo a existência de uma linguagem comum entre os agentes que nele participam. Visando a compreensão fundamental da origem de linguagem, biólogos, físicos, economistas e filósofos juntam-se e enfrentam a questão recorrendo a modelos evolutivos.

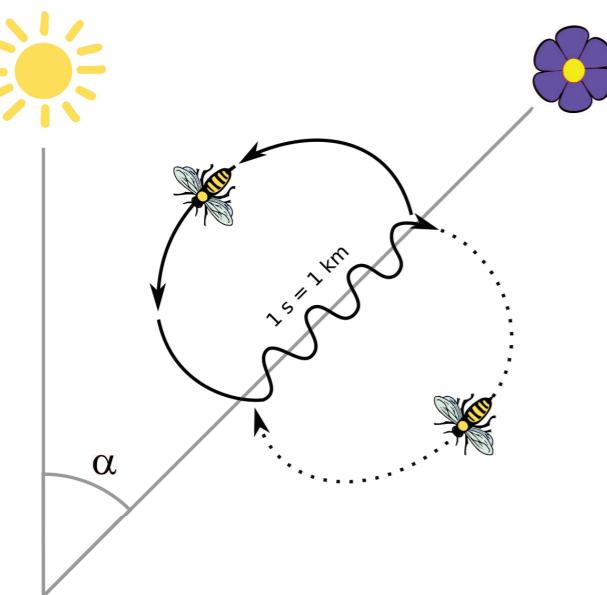
De entre os sistemas de linguagem que encontramos à nossa volta, aqueles usados entre humanos são, com certeza, os mais familiares. Debruçando-nos sobre a nossa língua materna, conseguimos identificar instintivamente o significado de cada construção que nos é apresentada. Apesar destas estarem formalmente definidas através de gramáticas e dicionários, são esse uso e compreensão intuitivos da língua que a caracterizam. Como este sistema de linguagem, há tantos outros que usamos com igual frequência, como as nossas expressões faciais, gestos, ou tom de voz. Em todos os nossos encontros, estes são alguns dos sinais que temos ao nosso dispor para transmitirmos diferentes tipos de informação aos indivíduos com os quais interagimos.

Ainda assim, deve deixar-se claro que a existência de sistemas de linguagem não se cinge à interação entre humanos. Temos vindo a identificá-los nos mais diversos estratos do reino animal, sendo que um dos exemplos mais proeminentes é o sistema usado pelas abelhas, cujo estudo

valera o prémio Nobel da Fisiologia ou Medicina a Karl von Frisch, em 1973 [em conjunto com dois outros etólogos, num prémio dedicado ao estudo da comunicação animal]. O sinal, designado de dança trémula [1 Originalmente *Waggle Dance*], é executado por abelhas no interior da colmeia, e sinaliza, simultaneamente, a direção e a distância à qual foi encontrada uma fonte de recursos. Outro sistema de sinalização animal estudado em detalhe é o desenvolvimento de cantos e plumagens de cores vibrantes como sinais informativos da qualidade de espécimes, relevantes no processo de seleção sexual. Desvendamos, ainda, os si-



**Figura 2:** A taxa de sucesso da cópula de um pavão depende das cores das suas manchas oculares (ocelos) e do ângulo em que são exibidas. Este último é mais importante na escolha de machos por uma fêmea do que o tamanho da cauda ou o número de ocelos.



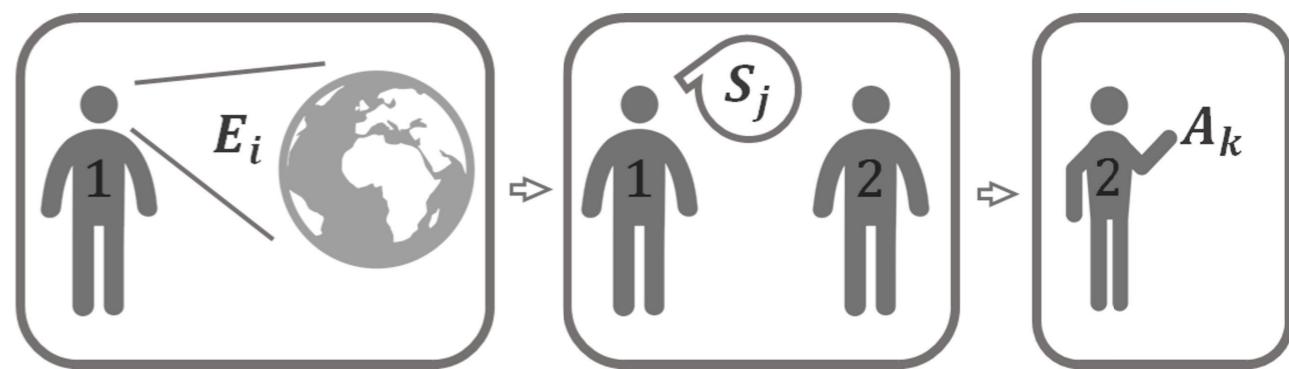
**Figura 1:** A dança trémula - a direção do movimento e a duração da dança estão intimamente relacionadas com a direção e distância do recurso anunciado pela abelha dançarina. Este pode incluir a localização de uma fonte de alimento ou um potencial local de nidificação.

nais de alarme usados por diversas espécies de pássaros e primatas, que, por vezes, distinguem entre predadores terrestres, aéreos e trepadores, cada um representativo de um tipo distinto de fuga eficaz. A lista de sistemas de sinalização conhecidos prossegue transgredindo os limites do reino animal. Estão incluídas bactérias, como a *Myxococcus xanthus*, que usa sinais químicos para coletivamente transitar de um estado predatório para a auto-organização de um corpo frutífero. Podem, ainda, encontrar-se inúmeros casos de sinalização celular, caracterizada como todo e qualquer tipo de sistema de sinalização que governa atividades celulares e, derradeiramente, permite a coordenação coletiva essencial à existência de corpos vivos macroscópicos.

Torna-se, então, essencial questionarmos a pervasividade destes sistemas. Porque é que os observamos em escalas tão distintas de complexidade biológica? Qual a sua origem? Como pode ser expectável que agentes – animais ou não – consigam atribuir significado a sinais de forma espontânea, sem supormos a existência de uma linguagem

prévia? Dada a transversalidade destas questões a sistemas complexos de naturezas distintas, somos motivados a realizar uma abordagem transdisciplinar das mesmas.

É neste quadro que surge a formalização de uma base interativa geral para sistemas de sinalização, e a resultante interpretação destes no contexto de Teoria de Jogos [2]. Esta abordagem foi iniciada pelo filósofo David Lewis em *Convention: A Philosophical Study* (1969)]. Em Teoria de Jogos, agentes (e.g. bactérias, animais, humanos, instituições) têm encontros que são caracterizados como um jogo onde cada um(a) tem de tomar decisões quanto às ações a realizar. Consequentemente, o conjunto de comportamentos tomados impacta o desfecho do encontro para todos os agentes presentes na forma de um ganho/perda de pontuação. Sinalização é, neste âmbito, definida pelo jogo sequencial entre dois agentes identificado na Figura 3.



**Figura 3:** Jogo de Sinalização. O jogo é iniciado com um dos agentes (1) a ter acesso privilegiado ao estado do mundo  $E_i$ . Esse mesmo agente decidirá que sinal  $S_j$  emitir, condicionado pelo estado  $E_i$  observado. Finalmente, o segundo agente (2), condicionado apenas pelo sinal  $S_j$  recebido do primeiro agente (1), opta por executar a ação  $A_k$ , que impactará a pontuação de ambos.

Dado que os sistemas reais de interesse são compostos por populações de agentes, biológicos ou humanos, podemos considerar a extensão deste modelo que inclui dinâmicas evolutivas: Teoria de Jogos Evolutiva. Esta permite-nos compreender em que condições é expectável que certos comportamentos sociais sejam adotados por populações. Para tal, são adicionamente integrados no modelo elementos característicos destas dinâmicas: a determinação da aptidão evolutiva de cada agente da população, que advém das pontuações recebidas nos encontros com todos os outros agentes; a reprodução do comportamento de cada agente em função da sua aptidão; e a ocorrência de variações (ou mutações) dos comportamentos optados. Em sistemas evolutivos, estes fatores são comuns, tanto a fenótipos sujeitos a Seleção Natural, como a ações sujeitas a dinâmicas de Imitação Social [3]. Esta alternativa é descrita por Richard Dawkins em *The Selfish Gene* (1976), no capítulo 11. Memes: The new replicators]. Isto leva a que os resultados sejam semelhantes, independentemente dos comportamentos estarem a ser gravados geneticamente, ou apenas adotados culturalmente. Esta ferramenta é particularmente útil ao explicar cooperação [4 Ver artigo "A Evolução da Cooperação" na 40ª edição da Pulsar], mutualismo, reciprocidade, ou mesmo o estabelecimento de

normas sociais. Mas o que é que ela nos pode dizer sobre a origem de linguagem?

Brian Skyrms fornece-nos, em *Signals: Evolution, Learning & Information*, uma descrição dos sucessos de Teoria de Jogos Evolutiva na explicação da evolução de sistemas de linguagem em cenários onde todos os agentes beneficiam da transmissão e uso correto de informação. Mostra-nos que, partindo de uma base interativa onde sinais não têm qualquer significado prévio, é expectável que qualquer população sujeita a seleção os adote evolutivamente, usando cada um deles num estado do mundo diferente, e extraíndo informação dos mesmos - é isto que significa evoluir para um sistema de linguagem. No entanto, nem todas as populações reais estão integradas em cenários tão promissores. Algumas são constituídas por agentes que beneficiam de desfechos diferentes dos mesmos en-

# A Filosofia e a Ciência

por João Gonçalves

Aluno do 4º ano de MEFT, Instituto Superior Técnico

**A**Filosofia e a Ciência aparecam ser duas áreas muito distintas do saber humano. É frequente entre os cientistas considerá-las até de certo modo independentes, optando por focar-se apenas na sua e ignorando os eventuais contributos que os filósofos possam dar às suas investigações. Contudo, ao fazer isso estão a ignorar a ligação profunda que une estas duas disciplinas e que não pode ser descurada.

A importância da Filosofia na sociedade em geral é difícil de refutar, não só em termos históricos como também na atualidade. A Ciência Política e a História devem muito a esta disciplina, que continua também a ser terreno fértil para discussões e desenvolvimentos sociais à medida que o avanço científico e tecnológico vai levantando incessantemente questões éticas e morais. A ligação Filosofia-Ciência parece, à primeira vista, ser mais ténue. Grande parte dos cientistas não tem uma educação profunda em Filosofia e consegue, mesmo assim, realizar o seu trabalho. Os cursos do Técnico, por exemplo, não possuem cadeiras de Filosofia. O MIT, no entanto, tem um departamento dedicado a esta disciplina e o Técnico acolheu inclusive, o ano passado, um debate sobre o porquê da falta de um organismo semelhante na nossa faculdade. Talvez seja um sinal de que a relação entre a Ciência e a Filosofia, embora subtil, não seja totalmente inexistente.

A influência da primeira sobre a segunda é evidente. Os filósofos procuram a verdade e como tal recebem tipicamente de braços abertos as conclusões alcançadas pelos novos avanços científicos, deixando-as influenciar o rumo da discussão filosófica. A influência da segunda sobre a primeira também é um facto historicamente comprovado. Durante muito tempo as figuras do filósofo e do cientista sobrepuzeram-se [pensemos em Pitágoras, em Descartes ou em Leibnitz] e ideias como o método científico ou a refutabilidade como critério para a aceitação ou rejeição de teorias científicas foram importantes contribuições que a Ciência deve à Filosofia. Os cientistas atuais, contudo, poderão argumentar que estes progressos já foram alcançados, tendo constituído para a Ciência um sólido ponto de partida mas nada mais do que isso. Com um processo



sistemático e rigoroso de progresso em vigor, não é impensável que a Ciência seja agora livre de continuar o seu avanço através dos seus próprios métodos, indiferente às conclusões que a Filosofia retire das suas descobertas.

Esta visão talvez seja comum entre os cientistas e não podemos censurá-los: a verdade é que na generalidade do tempo ela funciona. No entanto, isso não significa que não haja também casos pontuais em que a Filosofia possa fornecer ainda novas contribuições práticas à Ciência. Um dos aspetos nos quais isso acontece é no que toca a clarificação conceptual.

A Matemática, por exemplo, oferece-nos um rigor classificativo de conceitos muito mais elevado do que a linguagem habitual e esse rigor é cobiçado por todas as ciências, com diferentes níveis de sucesso. Na Física é alcançado com bastante; na Biologia, até agora, não tanto. A falta de rigor na classificação de conceitos dificulta a compreensão e leva a deficiências comunicativas e falta de consenso, o que pode constituir um entrave grave ao progresso das chamadas "ciências moles". No seu livro *Cancer Stem Cells*, por exemplo, a filósofa da Ciência Lucie Laplane expõe um esforço de seis anos e muitas entrevistas com alguns dos principais investigadores da área para organizar de maneira sistemática classificações conceptuais relativas ao estudo de células estaminais. A sua análise rigorosa e, em particular, a sua definição de quatro tipos diferentes daquilo a que chama "estaminalidade" são, na opinião do biólogo e imunologista Hans Clevers, a solução para problemas

semânticos profundos na área e criam uma estrutura sólida a partir da qual começar a experimentação. A Filosofia é assim importante na medida em que estabelece conceitos e relações organizadas entre ideias de uma forma comprehensível para a mente humana, permitindo à Ciência aplicar o seu método sistemático e continuar a construir o edifício do conhecimento. Esta contribuição não pode, portanto, ser resumida à mera criação do método científico e do princípio da falseabilidade.

Ela é uma análise e reavaliação constante do paradigma em vigor. A Ciência analisa a Natureza e nesse sentido pode ser extremamente informativa, mas só a Filosofia tem o poder de analisar a própria Ciência.

É evidente que a Filosofia por si só

dificilmente será capaz de gerar novo conhecimento científico. Heisenberg, embora reconhecesse a importância da Filosofia para a Ciência e para o progresso da sociedade, acreditava que a manipulação abstrata de ideias era incapaz de alcançar verdades fundamentais sobre o Universo sem a aplicação de experimentação. Talvez o caso mais gritante de conflito direto entre a Filosofia e a Ciência se tenha dado nas discussões de 1922 entre Henri Bergson e Albert Einstein sobre a Teoria da Relatividade. O primeiro destes homens, um dos maiores nomes da Filosofia da Era Moderna e Prémio Nobel da Literatura, tinha sérias contestações em relação à teoria do segundo, um gigante equivalente na sua área laureado com a mesma distinção, mas na categoria da Física. No seu livro *Durée et Simultanéité*, Bergson analisa a Teoria da Relatividade e eventuais erros em que nos possa induzir em relação à compreensão do conceito de "tempo" no Universo. A comunidade científica teceu duras críticas a esta obra, tendo Bergson sido acusado de não compreender a Física por detrás da teoria de Einstein. O filósofo francês, no entanto, era também um dotado matemático e nunca negou a teoria de um ponto de vista físico, sentindo sempre que o seu desejo de a analisar de um ponto de vista filosófico estava a ser injustamente menosprezado. Haverá espaço para a análise da Física sob a lente da Filosofia? Certamente que sim, mas a pergunta que devemos fazer é: haverá necessidade?

Alguns dos mais importantes físicos do século XX responderiam afirmativamente a esta pergunta, com especial destaque para Heisenberg. A e os quântica, pela natureza contra-intuitiva das suas asserções, presta-se particular-

mente a interpretações filosóficas. No seu livro *Physics and Philosophy*, Heisenberg procura explicar algumas das conclusões que esta teoria permite retirar sobre o Universo, bem como novas questões por ela levantadas. A aceitação de mudanças radicais de paradigma como as apresentadas pela mecânica quântica pode ser difícil sem uma reflexão filosófica sobre as suas implicações. Não de um ponto de vista verdadeiramente físico, mas sim de um ponto de vista pessoal e humano. Uma teoria física faz previsões sobre o Universo que se podem revelar certas ou erradas, mas não nos diz o que concluir dos resultados nem para onde prosseguir. O físico é, portanto, limitado na sua criatividade no momento de criação de modelos teóricos pelos preconceitos que adquire ao longo da vida sobre a natureza da existência. O próprio Heisenberg, que admirava a Filosofia Oriental, cita conversas com o filósofo indiano Rabindranath Tagore como uma grande influência no seu trabalho, além de se mostrar em total concordância com o livro *The Tao of Physics*, uma tentativa de estabelecimento de um paralelo entre as suas teorias e a Filosofia asiática do Taoísmo.

O cientista e o filósofo são movidos por um desejo comum de alcançar a verdade. Embora os seus métodos em muito difiram e apesar do desprezo que os pensadores de uma destas áreas possam ter pela outra, a verdade é que ambos beneficiam do que o outro tem para oferecer. A História mostrou e continua a mostrar que a Ciência precisa da Filosofia, tal como a Filosofia precisa da Ciência, mas acima de tudo é preciso nunca esquecer o seguinte: o ser humano necessita das duas.

## Deep Learning e Detecção de Ondas Gravitacionais

por João D. Álvares (1), José A. Font (2,3), Felipe F. Freitas (4), Osvaldo G. Freitas (1), António P. Morais (4), Solange Nunes (1), António Onofre (1) e Alejandro Torres Forné (5)

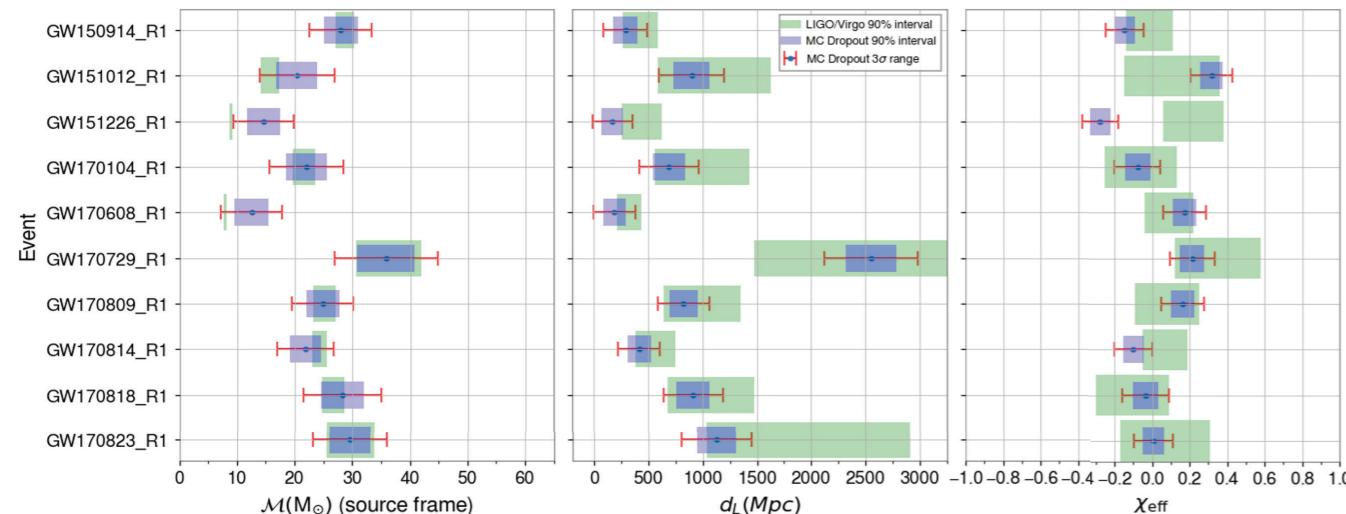
1 - Centro de Física das Universidades do Minho e do Porto (CF-UM-UP), Universidade do Minho, Portugal; 2 - Departamento de Astronomia y Astrofísica, Universitat de València, Spain; 3 - Observatori Astronòmic, Universitat de València, Spain; 4 - Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Centre for Research and Development in Mathematics and Applications (CIDMA), Portugal; 5 - Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), Germany

**O**s algoritmos de machine learning têm sido cada vez mais utilizados num número crescente de domínios científicos, desde a Astronomia, à Cosmologia, Biologia, Física dos Plasmas ou das Altas Energias. Estes algoritmos têm-se provado eficientes na identificação de padrões e capazes de diferenciar potenciais sinais de fundo indesejáveis, muito para além das capacidades de um ser humano. Apesar de estes algoritmos já estarem a ser utilizados na deteção de Ondas Gravitacionais, o espaço que existe para melhorar a sua utilização é muito amplo.

A razão pela qual isto acontece prende-se, por um lado, com a descoberta das ondas gravitacionais produzidas pela colisão de dois buracos negros em 2015 (o evento GW150914) e, por outro lado, com a necessidade de

combinar várias fontes de informação provenientes de vários detectores, como no caso da deteção das ondas gravitacionais produzidas pela colisão de duas estrelas de neutrões (detetadas por LIGO/Virgo), que foi acompanhada pela emissão de ondas eletromagnéticas detetadas por outros detectores (Fermi e INTEGRAL). A necessidade de combinar as respostas dos vários detectores faz nascer, deste modo, a necessidade de utilizar algoritmos de machine learning para estudar as propriedades destes fenômenos numa escala cosmológica. Como os sinais produzidos por estes eventos podem ter amplitudes muito pequenas, a identificação dos padrões associados a eles torna-se particularmente importante.

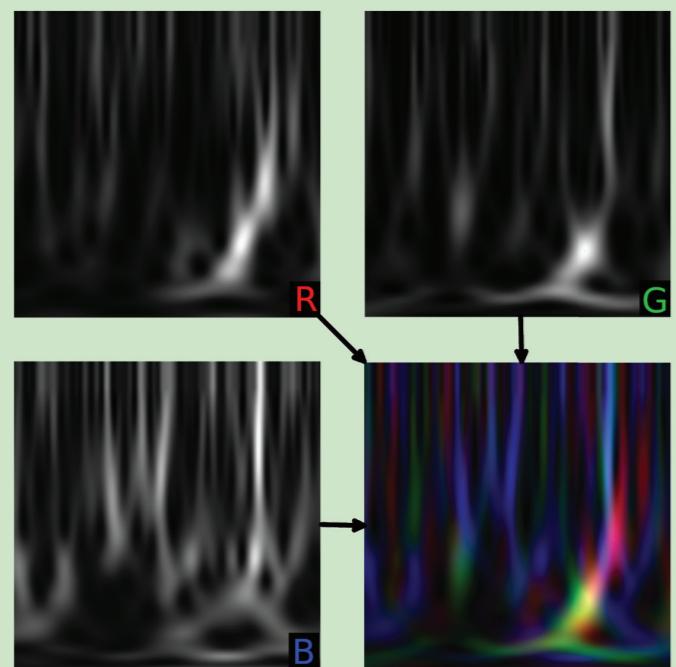
Neste artigo, para o primeiro catálogo, GWTC-1, obtive-



**Figura 1:** Comparação das previsões de vários parâmetros cosmológicos com os propostos pela colaboração LIGO-Virgo

mos valores de distância aos eventos concordantes com os propostos pela *LIGO-Virgo Collaboration* (LVC). Em termos de chirp mass e spin efetivo, as estimativas estão dentro do intervalo de 90% de confiança proposto pela LVC, até uma incerteza de 3 $\sigma$ . Para o segundo catálogo, GWTC-2, com a mesma rede, obtivemos uma performance semelhante. Isto resulta numa previsão correta de 33 dos 37 eventos detetados pela LVC.

As limitações das redes neurais treinadas que se registaram ao longo do trabalho devem-se ao facto de esta ter sido treinada especialmente para tratamento de colisões de buracos negros, ou seja, colisões de buracos negros com massas pequenas ( $< 6$  massas solares) e estrelas de neutrões irão ter uma pior performance com esta rede neuronal, mas já estamos a trabalhar noutros modelos que se adaptem a estas situações também. Todo este trabalho foi feito utilizando apenas computadores normais, sem acesso a clusters ou hardware avançado!



Apresentamos aqui um resumo do nosso artigo:

**1.** Geração de conjuntos de dados de ondas gravitacionais para cada um dos detetores de LIGO e Virgo, na forma de ondas geradas em Python (pycbc) que utilizam vários modelos teóricos designados por aproximatantes (SEOBNRv4HM\_ROM, IMRPhenomPv2 e IMRPhenomD). A partir destas ondas criam-se imagens, uma por cada detetor de LVC que, depois, são combinadas numa imagem RGB, como numa fotografia normal a cores - esta combinação permitiu uma performance melhor dos algoritmos ML do que aquela que conseguia obter tratando as imagens individualmente;

**2.** Utilização de uma ResNet (CNN - Convolutional Neural Network) de classificação, i.e., para detetar se o sinal associado à fotografia é realmente um evento produzido por uma onda gravitacional que teve origem na colisão de dois corpos massivos;

**3.** Utilização de uma xResNet (CNN) para regressão de parâmetros (chirp mass, luminosity distance, network antenna power e effective inspiral spin);

**4.** Com as CNN treinadas, passa-se então à análise de eventos reais dos dois catálogos disponíveis: GWTC-1, GWTC-2.

**Figura 2:** Geração do mesmo evento para os três detetores da colaboração LIGO-Virgo, a preto e branco, combinados, através dos três canais RGB, na imagem em baixo à direita.

## Agenda Científica



### Escola de Verão de Astronomia (3ª Edição)

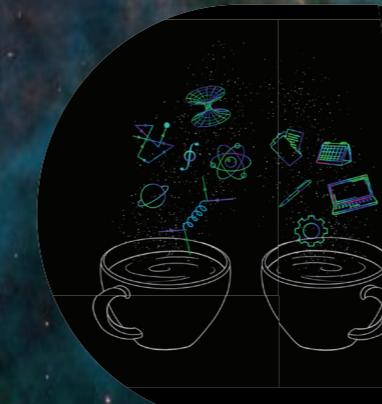
28, 29, 30 e 31 de julho de 2021, Lisboa

A Escola de Verão de Astronomia (EVA) é uma iniciativa do NFIST destinada a promover a Astronomia e Astrofísica junto de alunos do secundário (10º, 11º e 12º ano) com motivação e curiosidade para aprender e descobrir o mundo da ciência. Ao longo de quatro dias propomos discutir assuntos como: Gravitação, Evolução Estelar, Astronomia Observacional, Cosmologia e a Estrutura e História do Universo em palestras, workshops e sessões de resolução de problemas.

Mais informações em <https://nfist.pt/eventos/eva>.

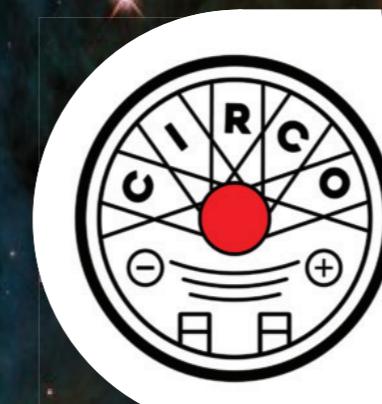
### Engenharia Física Tecnológica: Histórias de Alumni

Março a Junho de 2021, Facebook Live (NFIST)



Num ambiente descontraído, professores do Departamento de Física entrevistam *alumni* dos cursos de Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico que tiveram percursos profissionais distintos. A conversa é transmitida em direto e os entrevistados respondem a perguntas da audiência.

Esta série de entrevistas é uma iniciativa conjunta do NFIST e da coordenação do curso de Engenharia Física Tecnológica que tem por objetivo dar a conhecer o que fazem atualmente os ex-alunos do curso.



### XXIV Semana da Física

25 a 31 de Maio de 2021, Lisboa

A Semana da Física é um projeto desenvolvido pelo NFIST há 23 anos: é uma semana totalmente dedicada à divulgação da Física a alunos do ensino básico e secundário. Nesta edição, em consequência das limitações impostas pelo atual contexto pandémico, a Semana da Física é transmitida virtualmente para salas de aula de todo o país, a partir das quais os alunos observam experiências, participam em workshops, visitam laboratórios e assistem a palestras.

Mais informações em: <http://sf.nfst.pt/>

# Jorge Dias de Deus (1941-2021)

Faleceu, no passado dia 1 de fevereiro, o Professor Jorge Dias de Deus, físico, líder estudantil, presidente do Instituto Superior Técnico e divulgador de ciência. Um professor que marcou várias gerações de alunos, fundou o Centro de Astrofísica e Gravitação (CENTRA) e contribuiu muito para a definição da política pública em ciência e tecnologia em Portugal.

Convidámos alguns dos seus colegas, alunos e amigos a partilhar as suas recordações de Jorge Dias de Deus.

O professor Dias de Deus é uma parte fundamental do Departamento de Física, do Técnico e do país. Era difícil ser de outra forma, porque ele criou a estrutura na qual nós assentamos hoje.

O professor Dias de Deus deixou connosco, bem firmes, os alicerces da ciência em todas as vertentes. A curiosidade pelo saber, o humanismo e a candura com que temos que interrogar e tentar entender o mundo.

É sempre raro conhecer alguém maior do que a vida, o DD era certamente uma dessas pessoas. As sementes da ciência, que ele plantou, felizmente germinaram e bem. Temos hoje uma sociedade que percebe e gosta de ciência, em larga medida devido ao seu talento e amor pela reflexão, pela divulgação, e pelo ensino.

**VÍTOR CARDOSO**, Professor Catedrático e Presidente do Departamento de Física do IST

O JDD foi muitas coisas diferentes e importantes para muita gente diferente. Ter-me convencido num encontro por acaso a concorrer a uma bolsa de pós-doutoramento para voltar a Portugal foi o início de uma amizade de quase 20 anos, mais de 10 de colaboração científica. Foram também conversas longas, longuíssimas, sobre tudo e mais alguma coisa.

Foi ajuda desapegada em muito. Foi, pelo menos visto agora com alguma distância, quem com uma aparentemente simples pergunta me fez começar a pensar em Física como o tento fazer hoje. Pouco tempo depois do meu regresso ao IST, o tal plano da bolsa funcionou, mostrava-lhe umas contas longas e algo complexas, hediondas, que então me ocupavam. Saíu então pergunta: "Qual é o boneco disto?". Julgo que mostrei uns diagramas. Obviamente não o pretendido.

É a procura do boneco — de uma previsão ou no pior dos casos de uma explicação para um fenômeno, uma medição — que fui aprendendo com o Jorge a tomar como o fundamental em Física. Espero conseguir fazer continuar um pouco dessa visão.

Até sempre, Jorge.

**GUILHERME MILHANO**, Professor Associado do Departamento de Física do IST e Investigador no LIP

Conheci o Jorge Dias de Deus, o DD como os amigos o tratam, antes de o conhecer. Conheci-o através do livro "Ciência, Curiosidade e Maldição" que li quando estava a fazer doutoramento. Nesse livro o DD mostra que a ciência, através das aplicações, da tecnologia e da engenharia, nunca é neutra. O livro expõe a contradição profunda da ciência, em particular no impacto através da tecnologia que gera, na vida de todos. A ciência liberta, resolve problemas humanos e cria problemas humanos: "é a fada boa [...] por outro lado, [...] é a fada má [...] que manipula, que corrompe, que destrói".

O livro é ainda uma obra prima de humor. O último capítulo, a "Ceia dos Catedráticos" é uma paródia à "Ceia dos Cardeais" de Júlio Dantas. É uma verdadeira jóia de imaginação: três catedráticos juntam-se numa ceia. Mas em vez de "rememorarem" com saudade os amores proibidos da juventude, como faziam os Cardeais do Dantas, rememoram a "instigação" - leia-se investigação - que tanto os entusiasmou em jovens, e que é apresentada como foco de subversão.

Esta recriação à Dias de Deus da peça do Júlio Dantas era a crítica aos sistemas ditoriais e burocráticos, como o que se tinha vivido em Portugal, e que viam na ciência e no conhecimento um perigo. Mas estes sistemas também sabem usar a tecnologia para se fortalecerem. Ontem como hoje.

Eu e o DD escrevemos várias coisas juntos, incluindo textos de divulgação na Gazeta de Física e fizemos vídeos de animação de Física para a RTP2. Também escrevemos um artigo científico enquadrado em Fenomenologia de Física Nuclear e de Partículas. Poucos como o Dias de Deus compreendiam o papel fundamental da Fenomenologia para o avanço da Física. E esta visão inspirou muitos de nós, os mais jovens. A fenomenologia define o que se deve medir, provoca a experiência e provoca também o pensamento para as grandes mudanças. Não é um mero ajuste de curvas a dados experimentais - veja-se a Lei de Planck e a Catástrofe do Ultra-Violeta.

Trabalhar com o DD era uma alegria, não era trabalho. A liberdade e a imaginação eram os princípios de base da colaboração com ele. "A Luta Continua". Nas derrotas e nos sucessos, era com esta frase que ele fechava os "dossiers". Nunca desistir ou parar.

**TERESA PEÑA**, Professora Catedrática do IST



Várias décadas atrás, Jorge, "encomendaste-me" um obituário, lembras-te? Tinha morrido um conceituado professor de Física, e a Associação de Estudantes pedia-te umas linhas alusivas. Percebi por que motivo deflectias para mim o pedido: não porque o homenageado fosse falho de génio, ou de loucura, mas uma ou outra não tinham chegado para que o herói superasse as suas circunstâncias. E nisso, tu eras exigente.

Hoje, Jorge, posso dizer-te que fizeste o pleno como Professor. Que estrada luminosa ajudaste a abrir para o desabrochar de tantos espíritos! Essa loucura de romper caminhos, resta esperar que outros te a tomem, com o que nela ia.

Que falta nos fazem Homens assim...

**JOÃO FONSECA**, Professor Auxiliar do Departamento de Física do IST e Investigador no CERENA

Conheci o professor Dias de Deus em 1990 e desde aí para além de "chefe" passou a ser um amigo. As memórias de tudo o que passámos são muitas. Trabalhámos juntos durante 20 anos e sinto-me privilegiada por ter privado com ele, e família, durante todos estes anos.

**DULCE CONCEIÇÃO**, Técnica Superior do Departamento de Física do IST e do CENTRA

O Jorge teve uma carreira científica muito relevante na área da fenomenologia da física de partículas, tendo marcado muitas gerações de estudantes e investigadores em Portugal após o 25 de Abril. Teve sempre uma atenção particular e constante pela divulgação científica, sendo autor de muitos livros que cativam públicos de muitas idades e formações.

Quando comecei a trabalhar com o professor Mariano Gago, e por não ter uma formação estruturada em Física - uma vez que me tinha licenciado em eletricidade, ele disse-me que tratava de mim na parte experimental e que a parte teórica ficava a cargo do Dias de Deus. Enquanto o professor Mariano Gago me dava livros para estudar, o DD dava-me artigos científicos.

Havia poucos teóricos em Portugal, ainda hoje não há muitos, que gostassem de experiência, de dados, que percebessem que a Física é experimental. Ele era muito atento aos resultados experimentais. Para ele, o grande desafio eram os resultados experimentais e gostava de ser confrontado com algo que ninguém percebia e de tentar explicá-lo num modelo com poucos parâmetros. Divertia-se a fazer e a divulgar a Física.

Até sempre, Jorge.

**MÁRIO PIMENTA**, Professor Catedrático do IST e Presidente do LIP - Laboratório de Instrumentação e Partículas

Todos reconhecemos professores que nos marcam profundamente e que recordamos ao longo de toda a vida. Os mais extraordinários destes professores conseguem unanimidade entre os alunos que se tornam seus devotos, repetem exaustivamente os seus chavões e, passados muitos anos, recordam episódios das suas aulas ou tentam reinventar; agora como professores, muito do que aprenderam. Jorge Dias de Deus, conhecido por muitos como DD, líder estudantil, físico, professor do Instituto Superior Técnico, líder académico e divulgador de ciência foi um desses professores marcantes para várias gerações de alunos da licenciatura em Engenharia Física Tecnológica (LEFT).

Atrevo-me, no entanto, a arriscar que o seu maior impacto, e o seu maior legado, é a LEFT, que sintetizava como "a engenharia daquilo que ainda não existe" e o seu mais de um milhar de licenciados e, pelo menos, outros tantos alunos de outros cursos no IST que DD inspirou, como Engenharia Biomédica, Engenharia Informática ou Engenharia Aeroespacial.

Sempre disponível para apoiar as iniciativas dos alunos (incluindo as mais reivindicativas), foi durante o seu período de maior ligação à LEFT que se lançaram as primeiras iniciativas de divulgação da física por alunos do Técnico e que foi criado o NFIST, um dos núcleos de estudantes mais ativos do país, em particular na divulgação de ciência. Também acreditava no poder dos eventos sociais, estando sempre disposto para participar nas confraternizações com os alunos, sendo memoráveis os jantares na Casa do Alentejo, região de onde era orgulhosamente originário.

Com as suas características únicas, tocou a vida de vários milhares de alunos que, com certeza, irão lembrá-lo para sempre nas suas idiossincrasias, mas principalmente como fonte de inspiração e como modelo. Que maior legado pode um professor e cientista deixar às gerações vindouras?

LUÍS OLIVEIRA E SILVA, Professor Catedrático do IST

Conheci o Prof. Jorge Dias de Deus num café que existiu no piso -1 do DF, penso que só durante um ano. Tinha uma mesa de snooker e bancos altos. Nós discutíamos política e ele sentou-se connosco e perguntou porque é que tínhamos escolhido o curso de física. Quis saber de que é que estávamos a gostar menos. Falou e perguntou sobre tudo, até sobre as finanças do departamento. Ouviu opiniões, contou anedotas. Mandou vir uma rodada de cerveja e passou a tarde connosco. E outras depois dessa. Sempre que nos encontrava perguntava como corria a vida aos perigosos radicais de esquerda (ou algo igualmente elogioso).

Nunca tinha tido um professor assim, que tratasse os estudantes como colegas desde o primeiro dia.

JOANA GONÇALVES DE SÁ, Professora Associada Convidada do DF - IST e Investigadora no LIP

Jorge Dias de Deus percebeu a ligação da física de partículas à astrofísica, a ligação entre o muito pequeno e o muito grande. Precisamos do muito pequeno para explicar o muito grande e precisamos do muito grande para explicar o muito pequeno.

Como professor, mostrou que era um verdadeiro físico ao proferir cursos em diversas áreas da física. Quando havia uma lacuna que ninguém conseguia preencher, o Jorge estava lá para dar aquele curso.

Esteve na génese de três licenciaturas fortíssimas do Técnico: Engenharia Física Tecnológica, Aeroespacial e Biomédica. Isto mostra bem a sua versatilidade. Gostava do multidisciplinar. Era todo multidisciplinar.

Deu uma palestra pública à noite em Santa Cruz das Flores, o ponto mais ocidental de Portugal, com a mensagem de que é preciso ultrapassar barreiras: nós ultrapassamos as barreiras que havia e o oceano para nós é pequeno.

Isso mostra bem quem ele era. Ele alinhava em tudo e apoiava todos os projectos por mais doidos que fossem aparentemente.



**Figura 1:** Fotografia tirada na Escola Básica e Secundária das Flores em Abril de 2009, Ano Internacional de Astronomia. Da esquerda para a direita: Jorge Dias de Deus, Miguel Cunhal, aluno MEFT e membro da ASTRO (NFIST), Ilídio Lopes (Coordenador do MEFT), Ana Mourão (organizadora da "Tournee" pelos grupos Central e Ocidental dos Açores) e Dário Passos, aluno de doutoramento do CENTRA. Participámos na iniciativa 100 Horas de Astronomia, levando a Astronomia aos Açores.

Eu chegava ao Técnico e oferecia-lhe um café. E, durante o tempo em que demorávamos a beber uma bica, planeávamos o mundo.

ANA MOURÃO, Professora Associada do Departamento de Física do IST e Investigadora no CENTRA

O Professor Jorge Dias de Deus, ou JDD como carinhosamente era referido no curso de física, foi um Professor que marcou a minha passagem pelo curso de LEFT/MEFT. Tive não só oportunidade de frequentar várias cadeiras com ele, mas também de o ver naquele que sempre considerei o seu habitat natural - a divulgação científica. Foi sempre alguém que teve a porta aberta para os alunos e especialmente para o Núcleo de Física. No discurso de atribuição de membro honorário do NFIST em 2011, escrevi que era dos poucos (talvez o único) a ter participado em todas as 14 Semanas da Física até à data.

Não mantive conta entretanto, mas tenho a certeza que se tivesse a possibilidade, teria participado em todas as outras, tal era o seu amor pela divulgação. Um bem haja professor e até sempre!

MIGUEL CUNHAL, *Alumnus MEFT e ex-Diretor da ASTRO (NFIST), atualmente Technical Architect na Privitar*

Eu entrei para o IST pela mão do professor Jorge Dias de Deus, que nessa época era presidente do Departamento de Física. Por isto estou-lhe muito grato.

Jorge Dias de Deus cursou Engenharia Química no IST, foi para o Imperial College em Londres e para Copenhaga especializando-se em física de partículas e voltou para o IST para fazer trabalho de primeiro nível em várias frentes. Ele tinha inúmeras facetas: era muito ativo, tinha constantemente ideias para empreender, tinha vontade de inovar, e amava a física. Em física, em 1973 em Copenhaga, ele desenvolveu a ideia de escala geométrica que deu novas pistas para as leis de escala de partões, ou seja, quarks e gluões, os constituintes principais dos protões e neutrões.

Como professor ele demonstrou ser um físico a sério pois dava cursos em áreas muito diferentes da física. Quando havia uma lacuna que ninguém podia preencher, lá estava Jorge Dias de Deus para dar esse curso a partir do nada. Nas suas palestras ou seminários percebia-se que ele pensava a física tentando apreender os seus profundos mistérios, como por exemplo, em que nível conceptual as forças de interação fraca, eletromagnética e forte entre partículas elementares devem ser unificadas.

Jorge Dias de Deus foi o fundador e primeiro presidente do CENTRA, o Centro de Astrofísica e Gravitação do IST, em 1994. Embora ele fosse um físico de partículas elementares, percebeu que o futuro estava em astrofísica, gravitação e cosmologia. Começou então a fomentar um grupo interdisciplinar, que se tornaria um centro, que pudesse admirar e investigar estas coisas. Ele mostrou estar cem por cento certo.

Certamente, a memória deste professor distinto e fundador do CENTRA ficará em todos nós.

JOSÉ SANDE LEMOS, Professor Catedrático do IST e Presidente do CENTRA - Centro de Astrofísica e Gravitação.



Os alunos do Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico compartilham da tristeza dos amigos e família do Professor Jorge Dias de Deus, que será sempre entre nós lembrado, e apresentam também as suas sinceras condolências nesta hora de despedida.

As homenagens ao Professor Jorge Dias de Deus foram múltiplas, uma vez que a sua falta é sentida por muitos, pelo que reproduzimos aqui, com permissão dos autores, testemunhos e recordações publicadas em diferentes meios de comunicação:

Teresa Firmino, "Morreu Jorge Dias de Deus, o físico que gostava de ser multidisciplinar", Público, 1 de fevereiro de 2021 [Ana Mourão]

Luís Oliveira e Silva, "Jorge Dias de Deus e a engenharia daquilo que ainda não existe", Jornal i, 9 de fevereiro de 2021, Online. [Luís Oliveira e Silva]

"Jorge Dias de Deus (1941-2021), o professor mobilizador que se divertia a fazer e divulgar a Física", Campus e Comunidade | Instituto Superior Técnico, 3 de fevereiro de 2021 [Ana Mourão, José Sande Lemos, Mário Pimenta, Teresa Peña, Vitor Cardoso]

"Jorge Dias de Deus (1941-2021)", Notícias LIP, 1 de fevereiro de 2021. [Mário Pimenta]

# CONCURSO PULSAR JOVENS INVESTIGADORES

2<sup>a</sup> EDIÇÃO

**Submissões até 8 de Maio**

Para mais informações sobre o concurso, visita  
<http://nfist.pt/pulsar/concurso-pulsar/>

Avalia-nos!

