



8-10 Setembro
Universidade do Minho

20ª Conferência Nacional de Física
26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física



Livro de Atas

8-10 Setembro de 2016
Universidade do Minho



Universidade do Minho

ATAS



20ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE
FÍSICA
26º ENCONTRO IBÉRICO PARA O
ENSINO DA FÍSICA

8 a 10 de Setembro
2016

Editores:

Joaquim Agostinho Moreira (Univ. Porto)

Bernardo Gonçalves Almeida (Univ. Minho)

Manuel Joaquim Marques (Univ. Porto)

COMISSÃO ORGANIZADORA

20ª Conferência Nacional de Física

António Onofre (Univ. Minho)
António Queirós (Univ. Minho)
Bernardo Almeida (Univ. Minho)
Carlos Tavares (Univ. Minho)
Luís Rebouta (Univ. Minho)
Luís Vieira (Univ. Minho)
Nuno Peres (Univ. Minho)
Manuel Joaquim Marques (Univ. Porto)
J. Agostinho Moreira (Univ. Porto)

26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

Carlos Portela (ESJC) - Presidente DE-SPF
Bernardo Almeida (Univ. Minho)
J. Agostinho Moreira (Univ. Porto)
Luís Cunha (Univ. Minho)
Filipe Lima (ES Padre Benjamim Salgado - Joane)
Rui Baptista (ES de Barcelinhos)
Manuel Cardoso (ES Carlos Amarante)
João Vieira (Associação Orion)
Fernanda Miguélez Pose (Univ. de A Coruña)
Miguel Ángel Queiruga Dios (Col. Jesús María de Burgos)

COMISSÃO CIENTÍFICA

20ª Conferência Nacional de Física

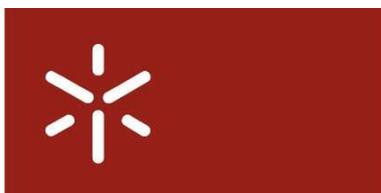
Maria da Conceição Abreu - Presidente SPF
Teresa Peña (IST, ULisboa)
João Miguel Dias – (UA)
Marco Paulo Duarte Naia – (UTAD)
Manuel Pereira dos Santos (Univ. Evora)
Manuel Joaquim Marques (Univ. Porto)
Luís José Maia Amoreira (Univ. Beira Interior)
José António Paixão (Univ. Coimbra)
Nuno Peres (Univ. Minho)
Pedro Abreu (IST, ULisboa)
Rui Travasso – (Univ Coimbra)
João Rosa – (Univ. Porto/Univ. Aveiro)
Jorge Páramos - (Univ. Porto)
João Ventura - (Univ. Porto)
José Luís Ribeiro (Univ. Minho)
Vitor Bras Amaral (Univ. Aveiro)
António Onofre (Univ. Minho)
Michael Belsey (Univ. Minho)
José Manuel Meijome (Univ. Minho)
Paulo Marques - (Univ. Porto)
Helder Crespo – (Univ. Porto)
Manuel Filipe Costa - (UMinho)
Ana Rita Figueira (Centro Hosp. S. João)
Teresa Maria Fernandes Rodrigues Cabral
Monteiro (Univ. Aveiro)
Armando José Trindade das Neves (Univ. Aveiro)
Mário João Monteiro – (Univ. Porto)

26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

Carlos Portela (ESJC) - Presidente DE-SPF
José António Paixão (Univ. Coimbra) -
Décio Martins (Univ. Coimbra)
Paulo Simeão Carvalho (Univ. Porto)
Ana Rita Lopes Mota (Univ. Porto)
Laurinda Leite (Univ. Minho)
Marta Ramos (Univ. Minho)
Isabel Malaquias (Univ. Aveiro)
Carla Quintão (FCT, UNLisboa)
Filipe Lima (ES Padre Benjamim Salgado)
Verónica Trício (RSEF)
Julia Gil Llinás (Univ.de Badajoz)



PATROCÍNIOS



Universidade do Minho



ÍNDICE

PARTE I - INTRODUÇÃO À FÍSICA 2016

PREFÁCIO..... III

NOTA DE ABERTURA V

PARTE II - 20ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE FÍSICA

THE SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY: OBSERVATION OF FLAVOR CHANGE FOR SOLAR NEUTRINOS 3
A. B. McDonald

FROM SNO TO SNO+ AND THE SEARCH FOR NEUTRINO MASSES..... 9
José Maneira on behalf of the SNO+ collaboration

MEDIÇÃO DAS OSCILAÇÕES DE NEUTRINOS COM DIFERENTES FONTES..... 15
Sofia Andringa

AO ENCONTRO DE MEDIDAS PRECISAS DE MUÕES EM CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS..... 23
Raul Sarmiento, Pedro Abreu, Sofia Andringa, Pedro Assis, Lorenzo Cazon, Ruben Conceição, Francisco Diogo, João Espadanal, Miguel Ferreira, Paulo Ferreira, Paulo Fonte, Luis Lopes, Ricardo Luz, Luis Mendes, Mário Pimenta, Catarina E. Santo, Bernardo Tomé

REACTOR ANTINEUTRINO OSCILLATIONS WITH THE SNO+ DETECTOR..... 29
Stefan-Alexandru Nae, for the SNO+ collaboration

OPTICAL CALIBRATION OF THE SNO+ EXPERIMENT 33
Ana Inácio, on behalf of the SNO+ Collaboration

THE PHYSICS OF TRAFFIC IN URBAN AREAS AT A MACROSCOPIC SCALE 39
Sérgio Batista, Guilhem Mariotte, Ludovic Leclercq

ISTTOK EQUILIBRUM RECONSTRUCTION IMPLEMENTED TOWARDS REAL TIME CONTROL..... 45
D. Corona, H. Fernandes, N. Cruz, J. Herrera, P.Lourenço, B. Carvalho, H. Figueiredo

VASCULAR GROWTH IN TUMOR ANGIOGENESIS: A MATHEMATICAL MODEL IN THREE DIMENSIONS..... 51
Rita Coimbra, Mauricio Moreira-Soares, João Carvalho, Rui Travasso

ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS NA BIFURCAÇÃO DA AORTA ABDOMINAL 57
José Lameira, Armando A. Soares, L. Caramelo

NOVO MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE MICRO-LENTE PARA PINÇAS ÓPTICAS 63
Simão Sá, Rita S. Rodrigues Ribeiro, Ariel Guerreiro, Pedro A. S. Jorge

| | |
|--|-----|
| <i>CONCENTRATION ASSESSMENT IN WATER SOURCES OF PUBLIC DRINKING OF COVILHÃ'S COUNTY, PORTUGAL</i> | 69 |
| <i>M. Inácio, S. Soares, P. Almeida</i> | |
| <i>IMPACT OF PROSTATIC FIDUCIAL MARKERS IN ORTHOGONAL RAY IMAGING - ORTHOCT: A SIMULATION STUDY</i> | 75 |
| <i>Ana Luísa Lopes, Hugo Simões, Paulo Crespo, João Barata, Joana Lencart, João Santos</i> | |
| <i>ESQUEMA DE INTERPOLAÇÃO ALTERNATIVO PARA A RESOLUÇÃO NUMÉRICA DE PROBLEMAS DE DIFUSÃO COM CONVECÇÃO USANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS</i> | 81 |
| <i>Luís J.M. Amoreira</i> | |
| <i>HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF NANOFLUIDS IN A FLAT TUBE</i> | 87 |
| <i>Rui Ribeiro, Armando A. Soares, P.L.Silva</i> | |
| <i>LABORATORY IEEE 802.11 A OPEN PTMP LINKS</i> | 93 |
| <i>J. A. R. Pacheco de Carvalho, H. Veiga, C. F. F. P. Ribeiro Pacheco, A. D. Reis</i> | |
| <i>APPLICATIONS OF LOW ENERGY MEV ION BEAMS AND COMPUTER SIMULATION TO SURFACE ANALYSIS OF MATERIALS</i> | 97 |
| <i>J. A. R. Pacheco de Carvalho, C. F. F. P. Ribeiro Pacheco, A. D. Reis</i> | |
| <i>DETERMINATION OF OPTICAL CONSTANTS OF SINGLE-MINERAL ASSEMBLAGES</i> | 101 |
| <i>T. M. Seixas, M. A. Salgueiro da Silva</i> | |
| <i>QUANTIFICAÇÃO DE BIODIESEL EM COMBUSTÍVEL DIESEL</i> | 107 |
| <i>André Almeida, Alexandra Ferreira, João Cabaço, José L. Santos, Luís Coelho, José Almeida</i> | |
| <i>MONITORIZAÇÃO DA TRANSESTERIFICAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS USANDO REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRA ÓTICA</i> | 113 |
| <i>Alexandra Ferreira, André Almeida, João Cabaço, José L. Santos, Luís Coelho, José Almeida</i> | |
| <i>APLICAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRA ÓTICA À QUANTIFICAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ETANOL EM GASOLINA</i> | 119 |
| <i>João Cabaço, Alexandra Ferreira, André Almeida, José L. Santos, Luís Coelho, José Almeida</i> | |
| <i>EPICS-CSS BASED FRAMEWORK FOR THE IST BPLASMA EXPERIMENT</i> | 125 |
| <i>Bernardo B. Carvalho, Pedro Lourenço, João Fortunato, Tiago Pereira, Horácio Fernandes</i> | |
| <i>PARTE III – 26º ENCONTRO IBÉRICO PARA O ENSINO DA FÍSICA</i> | |
| <i>“LUX MIRABILIS”, UMA CELEBRAÇÃO DA LUZ</i> | 133 |
| <i>Marisa L. Monteiro, Manuel B. Marques</i> | |
| <i>O ENSINO DA FÍSICA E DA QUÍMICA EM PORTUGAL (1927-2013)</i> | 139 |
| <i>Cesarina Augusto, José P. Cravino, Armando Soares</i> | |
| <i>NO NOVO SI, TUDO O QUE CONTA PODE SER CONTADO?</i> | 145 |
| <i>Olivier Pellegrino, Luís Ribeiro, Florbela Aura Dias, Isabel Godinho</i> | |
| <i>“APRENDIZAGENS NEGATIVAS” SOBRE O SOM</i> | 149 |
| <i>T. Esperança, M.J. de Almeida, P.M. Gordo</i> | |

| | |
|---|-----|
| <i>USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES PARA EXPERIMENTACIÓN EN FÍSICA</i> | 155 |
| <i>Mª Jesús Santos¹, Cristina Prieto², Manuel A. González³, Miguel A. González⁴, A. Hernández⁵, M.D. Merchán, C. Rodríguez, A. Queiruga-Dios</i> | |
| <i>APLICACIÓN DE LA FÍSICA EN LAS CIENCIAS DE LA VIDA. SIMULANDO LA ELECTROFORESIS DE DNA EN GEL MEDIANTE EJS</i> | 161 |
| <i>C. Prieto, Thais Djenane Nunes de Souza</i> | |
| <i>UTILIZAÇÃO DA PLACA ARDUINO EM ATIVIDADES LABORATORIAIS DE FÍSICA 10.º E 11.º ANO</i> | 167 |
| <i>Alberto Câmara, Tânia Pacheco</i> | |
| <i>LABORATÓRIOS REMOTAMENTE CONTROLADOS</i> | 173 |
| <i>Manuel Santos, Josué Lopes, João Fortunato, Samuel Balula, Horácio Fernandes</i> | |
| <i>A APRENDIZAGEM COLABORATIVA NO ENSINO INTERATIVO DA ELETRICIDADE</i> | 177 |
| <i>M. J. Quintas, P. Simeão Carvalho</i> | |
| <i>COMBUSTÃO DA VELA: ATIVIDADES REALIZADAS NA EDUCAÇÃO PRÉ-ESCOLAR E NO 1.º CICLO DO ENSINO BÁSICO</i> | 181 |
| <i>José Jorge Teixeira, Lígia Teixeira, Armando A. Soares</i> | |
| <i>COMO MEDIR SEMPRE $9,81 \pm 0,05 \text{ M/S}^2$ NA QUEDA DE UMA ESFERA</i> | 187 |
| <i>Rui Agostinho, Ana Tavares Sousa</i> | |
| <i>CONCEÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE SOM E ESTRATÉGIAS DE ENSINO PARA AS SUPERAR</i> | 193 |
| <i>Mafalda Braz, José P. Cravino</i> | |
| <i>DETERMINAÇÃO EXPEDITA DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO ADIABÁTICA</i> | 199 |
| <i>Horácio Fernandes</i> | |
| <i>FEX: UM CURSO ABERTO DE FÍSICA EXPERIMENTAL</i> | 204 |
| <i>R. Figueiredo, H. Fernandes, P. Ribeiro, A. Moura Santos, J. Viana</i> | |
| <i>GOOGLE EARTH: CÁLCULO DE DISTÂNCIAS</i> | 208 |
| <i>Armando A. Soares, Paula Catarino, J. J. Teixeira</i> | |
| <i>MATERIALES DIDÁCTICOS SOBRE FUERZAS Y MOVIMIENTO PARA LA ENSEÑANZA SECUNDARIA</i> | 212 |
| <i>Verónica Tricio, Ramón Vilorio, Gema Calleja</i> | |
| <i>A MEDIÇÃO PRECISA DE G NUM PÊNULO GRAVÍTICO: DEPENDÊNCIA NAS PEQUENAS AMPLITUDES E NO ATRITO</i> | 218 |
| <i>Rui Jorge Agostinho</i> | |
| <i>O QUE É 1 METRO NA VIDA DE UM FOTÃO?</i> | 224 |
| <i>Fernanda Saraiva</i> | |
| <i>THE ROLE OF MEASUREMENT DATA SPACING AND RANGE</i> | 230 |
| <i>M. A. Salgueiro da Silva, T. M. Seixas</i> | |
| <i>DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE LAS BATERÍAS DE AUTOMOCIÓN: UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO</i> | 236 |
| <i>Ana Gayol, Verónica Tricio</i> | |

INVESTIGADORAS EN LA LUZ Y EN LAS TECNOLOGÍAS BASADAS EN LA LUZ 242
Ana J. López, María del Mar Sánchez-López, Augusto Beléndez, Pascuala García-Martínez

LISTAGEM DE AUTORES 250

PARTE I - INTRODUÇÃO

PREFÁCIO

Bernardo Gonçalves Almeida

Joaquim Agostinho Moreira

Manuel Joaquim Marques

A 20ª Conferência Nacional de Física e o 26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física tiveram lugar entre os dias 8 e 10 de setembro de 2016, no Complexo Pedagógico I do Campus de Gualtar da Universidade do Minho. Estes eventos foram organizados em conjunto pela Delegação Norte da Sociedade Portuguesa de Física, com forte colaboração do Departamento de Física da Universidade do Minho. A Comissão Organizadora contou com membros do Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, do Departamento de Física da Universidade do Minho, da Universidade de A Coruña, da Associação Orion, e de Professores das Escolas ES Padre Benjamim Salgado – Joane, ES de Barcelinhos, ES Carlos Amarante, e Colegio Jesús María de Burgos.

Os temas estruturantes do programa foram A Descoberta das Oscilações do Neutrino, A Invenção de Díodos Eficientes Emitindo no Azul, 100 anos da Relatividade Geral e Novos Desafios para o Ensino da Física. Para cada um destes temas foram convidados investigadores de renome internacional, entre os quais destacamos o Prof Arthur McDonald, Diretor do Observatório de Neutrinos de Sudbury e Professor Emérito da Cátedra Gordon and Patricia Gray de Astrofísica de Partículas da Universidade de Queen em Kingston, Ontário, Canadá. O Prof. McDonald foi também Prémio Nobel da Física em 2015 devido à sua contribuição para o estudo das oscilações do neutrino. Nesse âmbito, foi responsável pela lição plenária intitulada From SNO to SNO+ and the search for neutrino masses com a qual se deu início aos trabalhos da Conferência Nacional de Física e do Encontro Ibérico para o Ensino da Física. Destacamos ainda a presença de investigadores portugueses que trabalham em laboratórios e centros de investigação nacionais e internacionais, que proferiram as lições plenárias subsequentes do programa.

O evento conjunto contou com a participação ativa de 247 congressistas, destacando-se o elevado número de jovens investigadores, e estudantes de mestrado e de doutoramento em Física. O programa da Conferência Nacional de Física e do Encontro Ibérico para o Ensino da Física contou com 16 lições plenárias, e um total de 56 comunicações orais em sessões paralelas, e ainda uma sessão com 100 pósteres. A Conferência Nacional de Física e o Encontro Ibérico extravasaram os muros da Universidade do Minho e foi ao encontro da população da Cidade de Braga através de uma Sessão Pública no Conservatório do Bomfim. Esta sessão contou com a presença do Prof Lars Montelius, Diretor do Iberian Institute Of Nanotechnology, que proferiu uma palestra subordinada ao tema Nanotechnology - a key driver for radical innovations. No final da sessão pública, os presentes foram brindados com concerto dos Alunos do Conservatório. Do programa ainda constaram 8 oficinas para professores dos ensinos Básico e Secundário e uma sessão destinada aos estudantes de cursos de Física, organizada pelos Núcleos de Estudantes de Física do Porto (PhysikUP) e Minho (NEFUM). Nesta sessão abordou-se o tema da empregabilidade após a finalização de uma formação em Física, através do testemunho e debate com físicos que se encontram a exercer a sua atividade profissional em ambiente industrial ou hospitalar. O programa contou ainda com a entrega dos Prémios MEDEA 2015 e 2016, e com a participação dos estudantes vencedores, que divulgaram as atividades desenvolvidas e o equipamento utilizado. Salienta-se ainda a atribuição do prémio para o melhor poster (um para um participante da 20ª Conferência Nacional de Física e outro para um participante do 26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física).

FÍSICA 2016 – 20ª Conferência Nacional de Física – 26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

A Comissão Organizadora Local agradece encarecidamente a todos os autores que contribuíram com este Livro de Atas, que conta com XXXX contribuições nas diversas áreas da Física e do Ensino da Física.

De acordo com os Estatutos da SPF, a 21ª Conferência Nacional de Física e o 28º Encontro Ibérico para o Ensino da Física terão lugar em 2018, na Universidade da Beira Interior, cabendo a responsabilidade da sua organização à Delegação Centro da SPF.

Terminamos agradecendo aos Colegas do Departamento de Física da Universidade do Minho o empenho e dedicação na realização deste evento, aos estudantes do NEFUM e do PhysikUP pela colaboração no apoio aos participantes, assim como à D. Maria José Couceiro e à D Isabel Alves, pelo excelente apoio na organização administrativa deste evento.

NOTA DE ABERTURA

Maria da Conceição Abreu

Presidente da SPF – Sociedade Portuguesa de Física

Obrigada por terem vindo,

Faço votos para que consigamos fazer desta Conferência e Encontro Ibérico para o Ensino da Física, um tempo de partilha, debate e aprendizagem.

A special “thank you” to those that came from so far for such a short time, I refer in particular Prof Arthur Mc Donald. We don’t have often a Nobel Prize with us. You are warmly welcome.

Bem-vindos os colegas espanhóis do Grupo Especializado de Enseñanza de la Física, que com a sua presença vão tornar mais vivas as discussões sobre o Ensino da Física, comparando e partilhando experiências didáticas e metodológicas.

A colaboração entre a Real Sociedade Espanhola de Física e a Sociedade Portuguesa de Física vem de longe e deve ser aprofundada para além dos vinte e seis Encontros já organizados no âmbito do Ensino da Física.

Para os nossos anfitriões, representados pelo Sr. Reitor da Universidade do Minho, que é também presidente do CRUP, e pelos representantes da presidente da Escola de Ciências e do Departamento de Física, um obrigado por nos receberem em vossa casa, nestas tão adequadas instalações e excelente ambiente.

Um obrigado também a todos os convidados que puderam dispor de umas horas para estarem connosco na sessão de abertura, na atribuição dos prémios MEDEA e na palestra do Nobel, Prof. Arthur Mc Donald. Refiro em particular o Sr. Presidente da Comissão de Educação e Ciência da Assembleia da República, o Sr. Vereador da Câmara de Braga, o Sr. Diretor do Desenvolvimento Curricular em representação do Sr. Diretor Geral da Educação, Diretor do Departamento de Qualidade, Ambiente e Segurança da Rede Energética Nacional, os presidentes dos Departamentos de Física e Química dos Agrupamentos de Escolas Básicas e Secundárias Sá de Miranda e Carlos Amarante de Braga, os Presidentes dos Departamentos de Física das instituições de Ensino Superior da Região Norte

A SPF tem como missão promover e divulgar a física, mas para isso precisa de físicas e físicos nos Ensinos Básico, Secundário e Superior, nos Laboratórios, nos Hospitais, nas Empresas, nos Institutos e mesmo em profissões que nada têm a ver diretamente com a Física, como a Política, a Arte, etc.

Antes de iniciarmos os trabalhos permitam-me que refira brevemente duas situações onde se verificam carências que é urgente suprir e dois casos de sucesso, um bem recente e outro já bicentenário. Outras questões tão ou mais prementes do que estas podiam ser escolhidas, mas a vida é feita de opções.

EMPREGO PRECISA-SE

Nos últimos anos vimos a assistir a um aumento da idade média dos físicos em todas as instituições, mas muito em especial no Ensino em qualquer dos graus.

O que aconteceu?

Com a reforma Veiga Simão em 1970, um dos meus heróis, alargou-se o ensino obrigatório e teve de se recorrer a todos os que estavam disponíveis para ensinar. Era melhor ter alguém sem preparação específica, por exemplo um engenheiro químico, do que não ter ninguém, e por isso as escolas encheram-se de pessoal docente sem habilitação para a docência, que, entretanto, foi fazendo profissionalização em exercício e, simultaneamente, faziam-se no Ensino Superior cursos de formação de professores de ciências, de física por um lado, de química por outro, apesar de terem de ensinar as 2 disciplinas.... Só as universidades mais novas tiveram o bom senso ou “necessidade” de preparar professores de Física e Química. Colmataram-se estas formações numa só disciplina com mestrados de química para físicos e de física para químicos, e quando tudo estava pronto e a funcionar, havia, dizem, “excesso de professores”! Tínhamos os que se profissionalizaram e os formados especificamente. Fecham-se “todos” os cursos por falta de candidatos/vagas/desemprego. Aparece a formação superior à Bolonha e os cursos de formação de professores foram atirados para Mestrados de Habilitação para a Docência que funcionam aqui e ali, e só naquelas Universidades cujas Faculdades de Ciências ousaram propô-los ou onde se verificam protocolos entre Institutos de Educação com pessoal doutorado em Física e aquelas, se usam corretamente as didáticas e as metodologias para repor melhor as carências nas disciplinas de Física a que vêm das licenciaturas “bolonhesas” de 3 anos, novamente em Física ou em Química! Se bem que infelizmente, a nível nacional, o Mestrado de Habilitação para a Docência em todas as instituições que o ministram tem neste momento muito poucos alunos.

O corpo docente do Básico e Secundário está a envelhecer, é uma profissão de muito desgaste e ninguém pode exigir que os docentes fiquem a dar horários de muitas horas até aos 67 anos! Sei que há reduções de horário; mas há professores em número suficiente que as permitam? e todos os contratos que se têm feito permitem usufruir da cláusula da redução?

No Superior o processo foi semelhante. Veiga Simão não só chamou professores que estavam no estrangeiro, por expulsão ou por não suportarem as limitações do País, como abriu os quadros para dinamizar e atualizar o ensino e investigação. Eu sou um produto dessa abertura! Entrou bastante gente nova para suprir as necessidades, foi tudo muito rápido e envolvendo muitas pessoas, passou a haver necessidade dos Assistentes se doutorarem e poucos recursos para o fazermos no País, muitos tiveram de ir para fora e depois voltaram todos ao mesmo tempo e, para cúmulo, é publicado em 1979-80 o célebre decreto que promove recém doutorados a professores associados, e docentes que tinham feito concurso para professores extraordinários e sido aprovados em mérito absoluto, a catedráticos. Em 3 meses os quadros das universidades “CLÁSSICAS ” ficaram completamente preenchidos de professores associados e catedráticos. Esta situação vem a resolver-se de dois modos: uns tiveram de esperar com excelentes curricula 20 anos para aceder aos quadros e outros tomaram a iniciativa de se mudarem para as universidades novas onde puderam progredir justamente.

Fui colega e amiga de José Mariano Gago e nunca tive ninguém por perto com tanto poder como ele teve. Foi Ministro em 1995 e esteve nestas funções em 4 governos do PS. Foi brilhante a reanimar e a pôr a investigação e a divulgação científica ao nível europeu.

Vivíamos o sonho europeu e tínhamos acesso aos Fundos que permitiram a atribuição de bolsas de formação a vários níveis e o financiamento de projectos.

Nos últimos anos, quando nos cruzávamos, insisti sempre no problema de criar estabilidade aos jovens e promissores doutorados; essa insistência foi maior quando assumiu responsabilidade do Ensino Superior. Até ao Doutoramento o estatuto de bolseiro é o adequado, mas após isto convinha abrir as portas de um emprego com condições, quer no Ensino Superior quer em outras Instituições de Investigação e mesmo nas Empresas.

E a conversa ficava por aqui porque ele dizia que os senhores reitores não queriam ouvir falar em mais encargos etc... Espero que a posição dos responsáveis das instituições de Ensino

Superior se tenha alterado e apelo a que a autonomia do Ensino Superior permita criar condições para voltar a ter um quadro institucional mais jovem e atualizado. Investir em recursos humanos é sempre uma aposta ganha.

RECONHECIMENTO DA NECESSIDADE DE INVESTIGAÇÃO EM DIDÁTICA E METODOLOGIA DA FÍSICA

É urgente que se faça investigação sobre como se ensina e se aprende Física no século XXI. A Física não é uma disciplina nada fácil apesar de ser bela.

Os colegas do ensino básico e secundário devem fazer mais pesquisa, talvez escrever menos manuais, para esmiuçar mais a Física que ensinam. Creio que esta premissa também inclui cada vez mais o ensino superior. Face à existência de licenciaturas de 3 anos, temos de pesquisar como tirar delas o melhor partido, não só nas licenciaturas de Física, mas também nas outras em que a Física é uma disciplina de alicerce.

Para haver investigação é necessário que ela seja financiada e por isso é preciso que Ministérios e Fundações promovam Programas Doutorais disciplinares para professores do ensino básico e secundário e a aceitação de projectos nessa área, nomeadamente a Fundação para a Ciência e Tecnologia.

Desculpem se me alonguei nestes pontos de carência e aproveitamento par dizer que a Sociedade Portuguesa de Física está obviamente disponível para contribuir, naquilo que estiver ao seu alcance, para encontrar as soluções adequadas.

E agora os casos de sucesso para termos dois minutos felizes.

O Ministério da Educação e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior reiteraram perante o presidente da Organização das Olimpíadas Internacionais de Física a disponibilidade para a sua realização em Portugal em 2018, na cidade de Lisboa, e incumbiram a SPF de, em parceria com aqueles Ministérios, as levarem a bom termo. É um enorme desafio e esperamos que seja um momento especial para atrair os jovens mais motivados para a Física e para os professores do ensino secundário se superarem no encontro desses alunos e na sua preparação e participação. A palestra do colega Fernando Nogueira amanhã será dedicada a este assunto.

E concluo com uma referência histórica.

Faz 200 anos que Mary Godwin (ou Mary Shelly, nome porque é mais conhecida depois do seu casamento com o poeta Percy Shelly), com apenas 18 anos, começou a escrever o livro Frankenstein ou Prometeu Renovado. Começou na noite de 16 de junho de 1816, numa casa à beira do lago Lemano, na Suíça, e o livro foi publicado no início do ano de 1818. Na leitura do livro percebemos como esta jovem estava bem informada quer sobre o magnetismo, que refere nos primeiros capítulos do livro, quer sobre a existência dos fenómenos elétricos e da tal eletricidade fisiológica de Galvani que permitiram a Victor Frankenstein dar vida à sua Criatura. A sua biografia permite perceber que foi através dos amigos do seu pai, escritor e editor, que tinha a informação sobre os trabalhos de Galvani, Volta, Aldini e outros.

É fabuloso que uma jovem mulher tivesse feito tão boa ficção/divulgação da Física há 200 anos!

Voltando à nossa Conferência. O programa é ótimo.

A Comissão Organizadora, dirigida pelos colegas Joaquim Moreira da Delegação Norte da Sociedade e Bernardo Almeida do Departamento de Física da Universidade do Minho, conjuntamente com uma nuvem de colaboradores, fez um excelente trabalho. Convido os presentes a usufruir desse labor.

Convidados

Honraram-nos com a sua presença na Abertura da 19ª Conferência Nacional de Física e 26º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

Exmo. Senhor Presidente da Comissão Parlamentar para a Educação e Ciência da Assembleia da República, Professor Alexandre Quintanilha

Exmo. Senhor Reitor da Universidade do Minho, Professor António Cunha

Exmo. Senhor Diretor do Serviço de Desenvolvimento Curricular, Ministério da Educação, Dr. Hélder Pais

Exma. Senhora Presidente del Grupo Especializado de Enseñanza de la Física da Real Sociedad Española de Física, Doutora Verónica Tricio Gómez

Exmo. Senhor Vice-Presidente da Câmara Municipal de Braga Firmino Marques

Exmo. Senhor Vice-Presidente da Escola de Ciências da Universidade do Minho, Professor Nuno Peres

Exmo. Senhor Diretor do Departamento de Qualidade, Ambiente e Segurança da REN, Engenheiro Francisco Parada

Exmo. Senhor Presidente do Departamento de Física e Astrofísica da Universidade do Porto, Professor Orfeu Bertolami

Exmo. Senhora Coordenadora do Departamento de Ciências Experimentais do Ensino Secundário do Agrupamento de Escolas de Carlos Amarante, Professora Maria Alexandra Romero

Exmo. Senhor Coordenador de Física e Química da Escola Secundária Sá de Miranda, Prof. Augusto Gonçalves Lobo

Exmo. Presidente da Delegação Norte da Sociedade Portuguesa de Física, Professor Joaquim Moreira.

PARTE II - 20ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE FÍSICA

THE SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY: OBSERVATION OF FLAVOR CHANGE FOR SOLAR NEUTRINOS

A. B. McDonald

Department of Physics, Engineering Physics and Astronomy, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada K7L 3N6

E-mail: art@snolab.ca

ABSTRACT

This paper is a presentation primarily for high school students and their teachers of the research with the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) leading to the Nobel Prize in Physics 2015. It will also emphasize the contributions made by the group of scientists at LIP Portugal to the project as members of the international SNO Collaboration. The SNO experiment, using 1000 tonnes of heavy water was able to observe both the electron flavor neutrinos created by nuclear reactions in the core of the sun and the total number of all three types of active neutrinos reaching the earth. It was thereby able to show that the flux of electron neutrinos was only about one third of the total, demonstrating neutrino flavor change clearly, a phenomenon that requires modifications to the Standard Model for Elementary Particles.

1 INTRODUCTION

If one creates a very low radioactivity environment, it is possible to make some very fundamental measurements that are not otherwise possible. By going 2 km underground and creating an ultra clean laboratory, SNOLAB, we have been able to make measurements that would be impossible on the surface of the earth. With this depth we can remove the majority of the cosmic ray particles that could obscure the faint bursts of light created by neutrinos from the sun. By also creating an ultra-clean laboratory, we can avoid local contamination from mine dust, and by careful selection of low-radioactivity materials we can reduce radioactive backgrounds to a very low level. This enabled us to observe solar neutrinos at a rate of only one per hour with essentially no interference from background radioactivity in the region of interest.

With such a low radioactivity environment, we can perform a number of different fundamental measurements to observe neutrinos from the sun, supernovae, the earth and nuclear reactors. Through these measurements and future measurements of a rare radioactive decay called neutrino-less double beta decay we can obtain information about the properties of neutrinos, that, along with electrons and quarks, are basic building blocks of nature at the most microscopic level. We can also seek direct detection of particles thought perhaps to make up the large amount of Dark Matter in the Universe. In the process we learn about nature ranging from the most microscopic levels to elements of the origin and evolution of the Universe.

Neutrinos are very fundamental particles that, along with electrons and quarks, are the particles we do not know how to subdivide any further. They come in three types, electron, muon and tau neutrinos and only interact via the weak interaction and gravity. They are so weakly interacting that they are the least known of the fundamental particle types because they are so difficult to detect. They are produced in copious quantities in the nuclear reactions in the core of the sun and interact so weakly that they can penetrate through the sun and earth and easily reach our detector 2 km underground.

2 THE SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY

The Sudbury Neutrino Observatory (SNO) [1] was built to solve a puzzle that had developed wherein the numbers of electron neutrinos observed from the sun were found to be about three times smaller than the numbers calculated from models of the sun. Measurements of the flux of electron neutrinos made by Ray Davis and his team using a large tank of cleaning fluid

underground at the Homestake mine in South Dakota, USA were found to be much less than the number calculated by John Bahcall and his co-workers. [2] It was thought that the discrepancy might be caused by problems with the experiment or the calculations or that the electron neutrinos might be changing to mu or tau neutrinos enroute from the core of the sun to earth. In 1984, the SNO Collaboration was formed to pursue an idea put forward by Herb Chen of the University of California at Irvine. He and George Ewan of Queen's University, Kingston, Canada were the first spokesmen for the collaboration and David Sinclair of Oxford University brought the UK into the project in 1985. The idea was to use the deuterium in heavy water to measure two separate reactions, one sensitive only to the electron-type neutrinos produced in the sun and another sensitive equally to all neutrino types. By comparing these two reactions, it would be possible to determine if electron neutrinos were changing to other types, independent of the calculations of solar fluxes. [3] With effort over several years, a design was created, a loan of 1000 tonnes of heavy water worth \$300 million was arranged with AECL (Atomic Energy of Canada Limited) and Ontario Hydro and agreement was obtained to site the project 2 km underground in INCO's very productive Creighton mine near Sudbury, Ontario, following on George Ewan's initial investigations of that site. Unfortunately Herb Chen passed away in 1987, but the collaboration continued to develop the project.

One in about 6000 of water molecules is actually D_2O , in which each hydrogen nucleus has an extra neutron creating deuterium oxide. Heavy water is chemically very similar to ordinary water, but the extra neutron allows a reaction in which an electron neutrino turns the neutron into a fast moving electron and a slow proton. The electron typically moves faster than the speed of light in water and creates a Cerenkov cone of light that can be detected. A second reaction can be initiated by any of the three active neutrino types that break the deuterium into a free neutron and proton. In SNO, the free neutron was detected by three different techniques in different phases of the project: 1. Observation of the 6.25 MeV gamma ray when it captured in deuterium, 2. Observation of many gamma rays following capture in chlorine from 2 tonnes of NaCl dissolved in the heavy water and 3. Observation of pulses in an array of 3He -filled neutron counters suspended in the pure heavy water in the detector. The first reaction (electron neutrino) was observed in all three phases through the burst of light from the Cerenkov process. The second reaction in phases 1 and 2 was observed through the light emitted by Cerenkov processes caused by electrons created by the gamma rays. These techniques in the three phases were fairly independent and had different systematic uncertainties. It was important to keep the levels of U and Th very low in the detector because any gamma ray exceeding 2.2 MeV could break apart deuterium mimicing what was done by neutrinos. This was accomplished with a lot of care and effort including purifying the heavy and light water so that there was less than one radioactive decay from U and Th per day per tonne of heavy water.

Figure 1 shows the SNO detector as it was constructed 2 km underground. In the central volume there was 1000 tonnes of heavy water contained within an acrylic sphere 12 meters in diameter and 5 cm thick. This volume was viewed by about 9500 photomultiplier tubes capable of observing a single photon of light with about 25% probability. These phototubes were supported on a frame about 18 meters in diameter. The detector was housed in a barrel-shaped cavity 22 meters in diameter at the equator and about 34 meters high. The entire volume outside the acrylic sphere was filled with very pure ordinary water. All of the components were carefully chosen and screened to have low content of U and Th and all of the workers took a shower and wore clean-room clothing during construction. Thereby we were able to restrict the dust on the detector surfaces to less than about a gram total.

Great care was taken to calibrate the detector using various sources of light, from laser-induced to that produced by encapsulated radioactive sources. Dr. José Maneira and co-workers at Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) Lisbon played key roles in these calibrations and continue to do so in developing calibration apparatus for future experiments. José Maneira, Nuno Barros and Gersende Prior shared the 2016 Breakthrough Prize in Fundamental Physics with the 270 other members of the international SNO Collaboration and also contributed to the work leading to the award of the 2015 Nobel Prize.

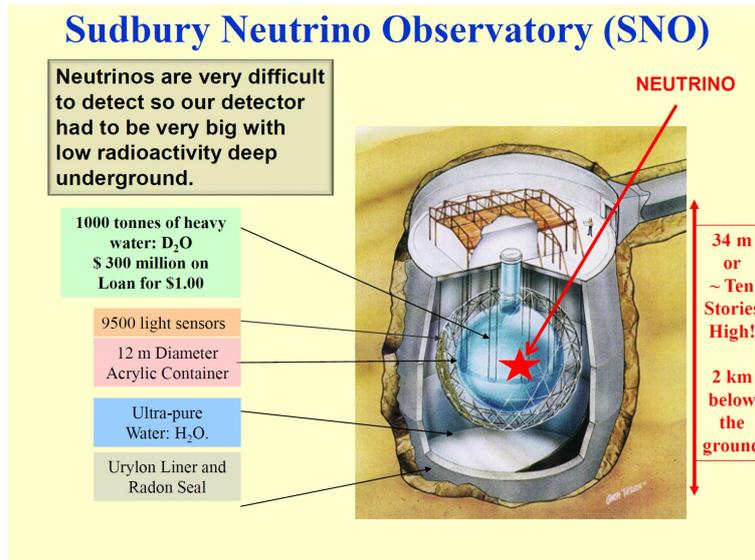


Figure 1. Drawing of the Sudbury Neutrino Observatory, 2 km underground. The person in the figure is to scale.

Figure 2 shows a summary of the results of most of the measurements of solar neutrino fluxes as a ratio to one of the calculations of electron neutrino fluxes from solar models [4]. The experiments are sensitive to various nuclear reaction processes in the sun producing electron neutrinos and the average over the relevant processes provides the theoretical value. The results from the three phases of the Sudbury Neutrino Observatory experiment for the SNO CC reaction (sensitive only to electron neutrinos) and the SNO NC reaction (sensitive to all neutrino flavors) show clearly that the total flux of all three neutrino flavors is in agreement with solar model calculations, whereas only about one third of the electron neutrinos are observed. The results reported in 2001 and 2002 for the first phase of SNO indicated that the hypothesis of no neutrino flavor change could be ruled out by 5.3 standard deviations. [5]

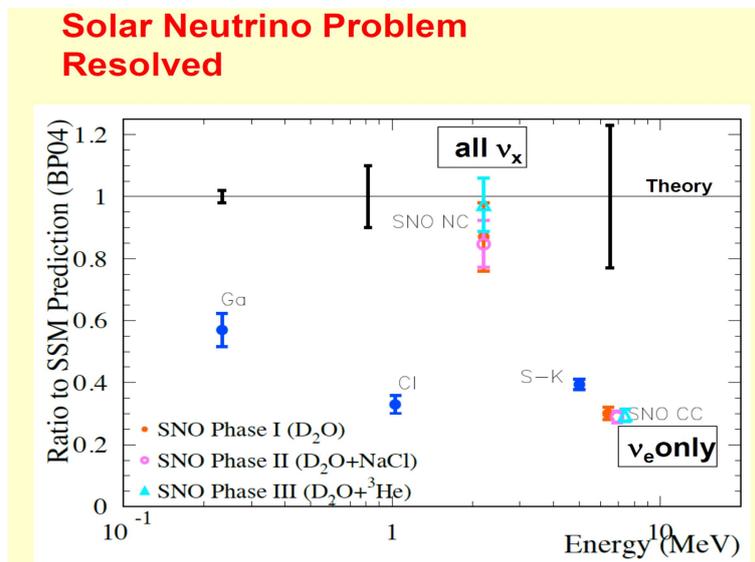


Figure 2. Summary of the results from the Sudbury Neutrino Observatory and other measurements of solar neutrino fluxes by the Homestake Chlorine experiment [6], the SuperKamiokande (SK) experiment with light water [7] and the SAGE/GNO/Galex experiments using Gallium [8]. Results are shown as a ratio to solar model calculations [5]. The Ga, Cl and SNO CC measurements were only sensitive to electron neutrinos reaching the earth whereas the SK measurements also had a small sensitivity to all neutrino types. The SNO NC measurements were sensitive to the total flux of active neutrinos (electron, mu, tau).

Neutrino flavor change can be interpreted in a quantum mechanical formalism [9] known as neutrino oscillations where the initial flavor state created as an electron neutrino is actually a linear combination of mass eigenstates (1,2,3). As neutrinos travel in vacuum, the eigenstates are changed in a manner depending on the mass states and the energy and upon eventual detection an oscillatory pattern can be observed, as seen [10] for atmospheric muon neutrinos by the Super Kamiokande international collaboration led by Prof. Takaaki Kajita, with whom we shared the Breakthrough Prize and the 2015 Nobel Physics Prize.

If the results for solar neutrinos and reactor neutrino measurements by the Kamland experiment are interpreted in terms of neutrino oscillations, enhanced in the sun by the MSW effect of additional interactions due to high electron density, as predicted by Mikheyev, Smirnov and Wolfenstein [11], it is concluded that the electron neutrinos are almost entirely transformed to a mass 2 state and remain in that state until measured by SNO to have only about one third electron neutrino component. [12]

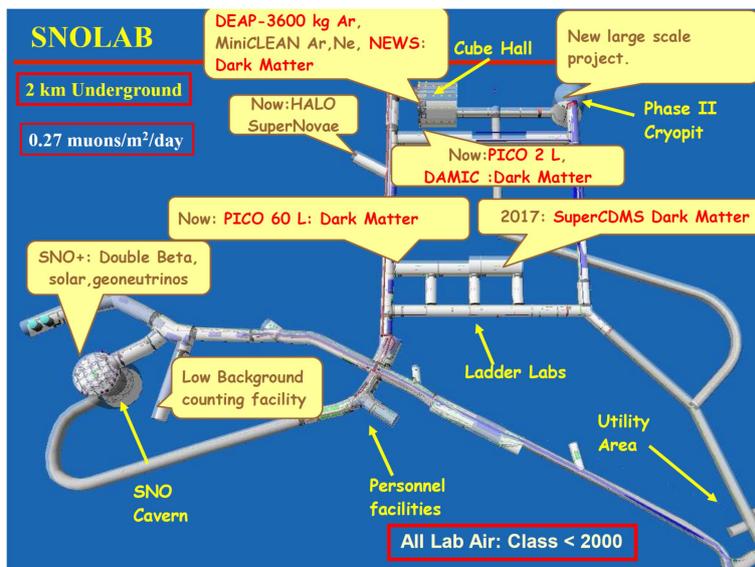


Figure 3. Drawing of the SNOLAB underground laboratory, showing the large number of experiments in operation or under development for the future.

3 SNOLAB AND FUTURE MEASUREMENTS

Beginning in 2003, SNOLAB, a new project led by Prof. David Sinclair of Carleton University, Ottawa extended the underground experimental area near the SNO experiment by about a factor of three in excavated volume to create room for a suite of international experiments that could benefit from an ultra-low radioactivity environment. The entire laboratory is maintained with an air quality level of about 2000 to minimize dust. Experimental parts can be cleaned in a facility on the surface and transported cleanly to the underground laboratory.

SNOLAB is now host to a number of major experiments that are seeking answers to fundamental questions. These questions lead naturally from the information that has been obtained from measurements to date of neutrino properties using natural sources and accelerators, as well as many astrophysical measurements that seek to complete our understanding of the composition of our Universe and how it has evolved.

The SNO experiment is being revised to create the SNO+ experiment [13] by replacing the heavy water in the central volume with a liquid scintillator with several tons of a soluble compound of Tellurium. An isotope of Te, ^{130}Te , with about 34% natural abundance, is an excellent candidate for an extremely rare radioactive decay process known as neutrino-less double beta decay. This process is known to have a lifetime in excess of 10^{+25} years and can only occur if 1) neutrinos are their own anti-particle and 2) they have a finite mass. If observed, this process has the potential to provide a measure of the absolute mass of neutrinos. From

measurements to date we only know differences of the three mass states. José Maneira and his team at LIP are important members of the SNO+ international scientific collaboration and have developed complex apparatus for the deployment of calibration sources in the SNO+ detector without introducing radioactive radon gas. This is an important contribution to SNO+ where radioactivity must be controlled even more stringently than for SNO.

Other experiments (DEAP, PICO, Mini-Clean, DAMIC, Super-CDMS) are seeking to observe weakly interacting massive particles (WIMPs) that may be the Dark Matter that is thought to make up about five times the mass of ordinary matter in the composition of our Universe. All of these experiments are benefitting from the low-radioactivity conditions in SNOLAB and use a variety of different techniques to distinguish WIMPs from other types of radioactive background.

With SNO we have been able to address very fundamental particle physics and astrophysics questions. This tradition is being continued in the new generation of experiments at SNOLAB. We are very pleased to have substantial contributions from Portugal in this work and extend our thanks for these past and future contributions.

REFERENCES

- [1] Boger, J. et al. (SNO Collaboration), Nucl. Instr. and Meth. A449, 172, 2000.
- [2] Davis, R., Harmer, D. S. and Hoffman, K. C., Phys. Rev. Lett., 20, 1205, 1968; Bahcall, J. N., Bahcall, N. A. and Shaviv, G., Phys. Rev. Lett., 20, 1209, 1968.
- [3] Sinclair, D., Carter, A.L., Kessler, D., Earle, E.D., Jagam, P. J., Simpson, J., Allen, R.C., Chen, H.H., Doe, P.J., Hallman, E.D., Davidson, W.F., McDonald, A.B., Storey, R.S., Ewan, G.T., Mak, H. B., Robertson, B.C., Il Nuovo Cimento C9, 308, 1986.
- [4] Bahcall, J. N. and Pinsonneault, M. H., Phys. Rev. Lett. 92, 121301, 2004.
- [5] Ahmad, Q. R. et al. (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett., 87, 07301 (2001); Ahmad, Q. R. et al. (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett., 89 011301 (2002); Ahmad, Q. R. et al. (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett., 89, 011306 (2002).
- [6] Cleveland, B. T. et al, Astrophysical Jour., 496, 505, 1998.
- [7] Abe, K. et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 83, 052010, 2011.
- [8] Abdurashitov, J. N. et al. (SAGE Collaboration), Phys.Rev. C 80, 015807, 2009, contains combined analysis with the following references; Altmann, M. et al. (GNO Collaboration), Physics Letters B 616, 174, 2005; Kaether, F., Datenanalyse der Sonnenneutrinoexperimente Gallex, Ph.D. thesis, Heidelberg, 2007.
- [9] Pontecorvo, B., Sov. Phys. JETP 7, 172, 1958; Maki, Z., Nakagawa, M. and Sakata, S., Prog. Theor. Phys. 28, 870, 1962.
- [10] Fukuda, Y. et al., (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. 81, 1562, 1998, [hep-ex/9807003].
- [11] Wolfenstein, L., Phys. Rev. D 17, 2369, 1978; Mikheyev, S. and Smirnov, A., Sov. J. Nucl. Phys. 42, 913, 1985.
- [12] Abe, K. et al, (Kamland Collaboration), Phys. Rev. C 84, 035804, 2011; Aharmim, B. et al, (SNO Collaboration), Phys. Rev. C 88, 025501, 2013.
- [13] Chen, M. C. et al (SNO+ Collaboration), 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2008), Philadelphia, Pennsylvania, arXiv:0810.3694 [hep-ex]

FROM SNO TO SNO+ AND THE SEARCH FOR NEUTRINO MASSES

José Maneira^{1,2} on behalf of the SNO+ Collaboration

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal

² Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Física, Portugal

E-mail: maneira@lip.pt

ABSTRACT

Neutrino oscillation experiments can observe mixing between the different neutrino flavors, and measure differences between the different masses, but cannot measure the absolute mass scale, and cannot say if neutrinos are their own antiparticle or not. The search for a very rare nuclear decay can address these important questions in neutrino physics, and this is the main goal of the SNO+ experiment, a follow up of the Sudbury Neutrino Observatory. SNO+ will re-use the SNO detector, replacing the target material and employing several new systems.

This talk addressed the Physics goals of SNO+, described the main experimental changes from SNO, and showed the current status of the project.

1 NEUTRINO MASSES AND DOUBLE BETA DECAY

Combined the results from the neutrino oscillation experiments, including the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) with the with upper limits from cosmology and tritium beta decay endpoint measurements, we now know that the neutrino masses are non-zero. Since oscillations are sensitive to mass differences only, we don't know the absolute value, but know it is very small, at least 11 orders of magnitude smaller than the top quark mass. This is a mystery that is hard to reconcile with the Standard Model of Particle Physics, in which the same kind of Yukawa coupling to the Higgs boson gives mass to all fermions. The smallness of neutrinos masses is a hint (but far from proof!) that their mass mechanism is different.

One of the models that explains that smallness is the so-called "see-saw" mechanism, in which the mass m_N of new, heavy Majorana-type neutrinos are related to the mass of light neutrinos m_ν and the electro-weak scale m_D (close to the mass of the W, Z, and Higgs bosons) through the formula:

$$m_\nu \cdot m_N \approx m_D^2 \quad (1)$$

For the current range of neutrino masses, one would get m_N close to the scale of unification of the electro-weak and strong forces. This can be an indication that neutrino masses are a consequence of new Physics at this higher energy scale. This could have several implications in cosmology, namely in the origin of the asymmetry between matter and anti-matter in the early Universe.

One low-energy prediction of this picture is that neutrinos are of Majorana-type, i.e., they are their own anti-particles. The search for the rare process of double beta decay (DBD) is considered the most sensitive experimental probe to the nature of neutrinos. DBD is a very rare nuclear decay in which two protons in a given nucleus undergo beta decay simultaneously, when the normal beta decay is not energetically possible (see Fig. 1, left). This can happen for 35 natural isotopes and has been observed for 11, even if the half-life is very long, of about 10^{18} - 10^{21} years. Now, if neutrinos are their own antiparticles, the neutrinos can annihilate within the nucleus, and only the two electrons are emitted in the process. The rate of this neutrino-less double beta decay (0NDBD) is a very important observable in neutrino physics since it depends not on the differences, but on the absolute values of the neutrino masses.

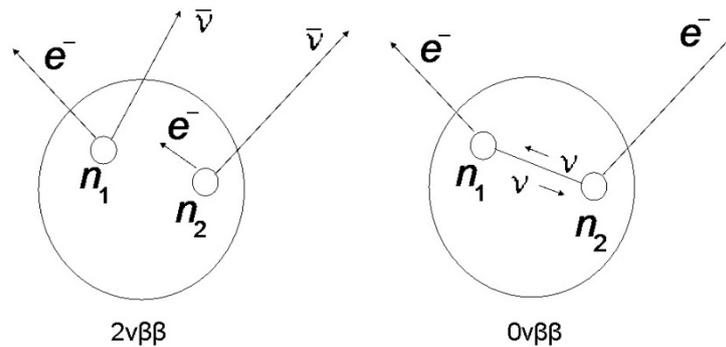


Figure 1. Schematics of double beta decay (left) and neutrino-less double beta decay (right).

Experimentally, the search for 0NDBD uses the fact that the two emitted electrons carry all the available decay energy, while in normal DBD, neutrinos carry part of it, and the energy spectrum of the electrons is a continuous one. The half-life of 0NDBD can be typically of 10^{26} years or higher, so it is important to employ large quantities of nuclei in the search, and to choose isotopes with a high natural abundance, such as ^{130}Te , or use enriched material. Since the signals are very rare, it is also crucial to reduce backgrounds from cosmic rays, by doing the experiment underground, and from natural radioactivity of the detector materials.

2 SNO+ DESIGN

SNO+ LAB, that expands the underground lab space previously built for the SNO [1] detector, is one of the deepest laboratories in the world, at 2 km depth, and a cosmic ray flux of only about $1 \text{ muon/m}^2/\text{day}$. The whole lab is also set up as a class 2000 clean room, providing exceptional cleanliness conditions.

SNO measured solar neutrinos through the Cherenkov radiation produced by electrons in their interactions with heavy water. The approach of the SNO+ experiment is to re-use the SNO detector, replacing the heavy water with liquid scintillator. The principle of the scintillation technique is that charged particles, such as the electrons from 0NDBD, excite the molecular levels of the scintillator. Light pulses are emitted when the excited levels relax back to the fundamental state, and those pulses are then detected by light sensors, typically photomultipliers (PMTs). In SNO and SNO+, the electronics associated with each PMT measures the time at which the signal was produced, and the integrated charge of the pulse. Based on the timing of the signals from all hit PMTs, it is possible to estimate the position of the charged particle interaction inside the detector, and also the type of particle -- alpha or beta/gamma. The energy of the particle can be estimated by the number of hit PMTs, with corrections depending on the position, so the high light yield from scintillation (50 times higher than Cherenkov) is important in order to measure event energies with good precision.

The chosen liquid scintillator is linear alkylbenzene (LAB), doped with 2 g/l of 2, 5 dipheniloxazole (PPO). The SNO+ collaboration has developed a technique to load large quantities of Tellurium in scintillator, by mixing telluric acid with 1,2 butanediol. The reaction forms a Tellurium-butanediol (TeBD) complex that is soluble in the LAB, plus water that is simply evaporated. This TeBD complex has very good optical transparency. For the SNO+ phase I, a loading of 0.5% of tellurium will be used, for which we expect a detected light yield of 400 photo-electrons/MeV, an amount that allows a good energy resolution in the vicinity of the 0NDBD peak (the Q-value of ^{130}Te is 2.53 MeV).

The detector, shown in Fig. 2 (left), is constituted by a central volume of 780 tons liquid scintillator enclosed in a spherical acrylic vessel (AV) with 12~m diameter and 5 cm thickness. Surrounding it is a 17 m diameter geodesic stainless steel structure (PSUP) that supports an array of 9300 PMTs of 20 cm diameter, each coupled to a set of reflectors that increase the light collection efficiency. Both the AV and the PSUP are immersed in 7 ktons of ultra-pure water,

used for shielding the AV from the radiation coming from the outer rock and from the PMTs themselves.

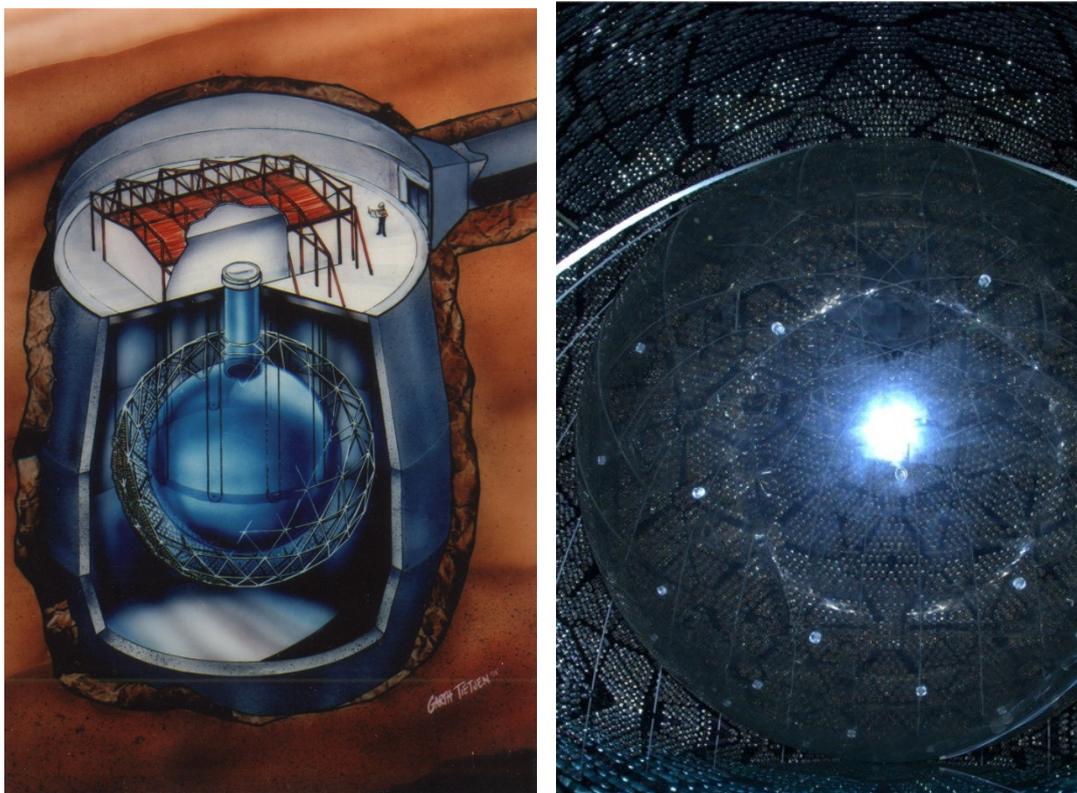


Figure 2. Scheme of the SNO detector (left). Photo of the SNO+ detector, with the AV and its hold-down rope net within the PMT array (right).

3 SNO+ SENSITIVITY

Several types of events can cause a signal in SNO+ that would be hard to distinguish from the 0NDBD of ^{130}Te . These background events can be classified according to their origin:

Internal contamination- Even if the scintillator is thoroughly purified during the detector fill, there is still residual contamination from the natural radioactive chains of Uranium and Thorium. However, the events that fall close to the ^{130}Te Q-value come from decays of isotopes that happen very close in time to other decays in the same chain, so that the identification of the sequence, via the SNO+ electronics and analysis softwares, allows the rejection of large fractions of these events.

External gammas- The very pure scintillator is surrounded by less pure materials -- the AV, the water, the PMTs themselves. Residual radioactivity in all these materials emit gamma rays that can penetrate into the AV, and cause signals in the liquid scintillator. Position reconstruction is essential to reject these events, that will be concentrated in the outer regions of the AV. We will use only the 20% most central part of the scintillator as a fiducial volume, free of external gammas.

Cosmogenic- The exposure of the Telluric acid to cosmic rays while on surface is sufficient to cause, via activation, the production of several isotopes, some of which decay with energies close to the ^{130}Te Q-value, and have a long enough half-life. SNO+ will deal with this by storing the Telluric acid underground to let the harmful isotopes "cool-off", and by employing an underground purification system.

2-neutrino DBD- The normal, two-neutrino double beta decay is intrinsic to Tellurium and cannot be "purified away". The only way to distinguish the tails of its continuous spectrum from the 0NDBD peak is to have a good energy resolution, or for it to be small to begin with. This is

one of the advantages of Tellurium with respect to other DBD isotopes, since the half-life for normal DBD is quite high.

Solar neutrinos- Paradoxically, the highest background expected in SNO+, after all purification and other background selection cuts, is from ^8B solar neutrinos. The underground location cannot reduce that signal, and since it is mostly flat close to the Q-value, improving the energy resolution helps only slightly. In order to improve the ratio of 0NDBD signal versus this background, the collaboration is studying ways to increasing the loading of Te into the scintillator, since the solar neutrino signal is proportional to the mass of scintillator, but not of Tellurium.

After the background rejection cuts are applied, we should have about 14 residual events/year in the energy window around the 0NDBD peak. The measured energy spectrum after 5 years of data in SNO+ is expected to be similar to what is shown in Fig. 3 (left), if the effective Majorana neutrino mass 200 meV, close to the present limits. In this case, the 0NDBD peak, in red, would be clearly visible. In the case that the neutrino mass is smaller, it could either be observed, or SNO+ could place stringent limits. Those limits improve with the total live time of the experiment, and are shown in Fig. 3 (right). This translates to a limit of $1.96 \cdot 10^{26}$ years at 90% confidence level, after 5 years, similar to what is expected from the upgrade of the KamLAND-Zen experiment (using the Xe^{136} isotope), that currently has the best limit, at $1.07 \cdot 10^{26}$ years [5]. It is important to note that the correspondence between 0NDBD half-life and the Majorana neutrino mass is strongly affected by uncertainties in the nuclear matrix elements, that are calculated in the context of different nuclear physics models, that exhibit variations of a factor or 2 or so. It is therefore crucial to experimentally search for 0NDBD with different isotopes.

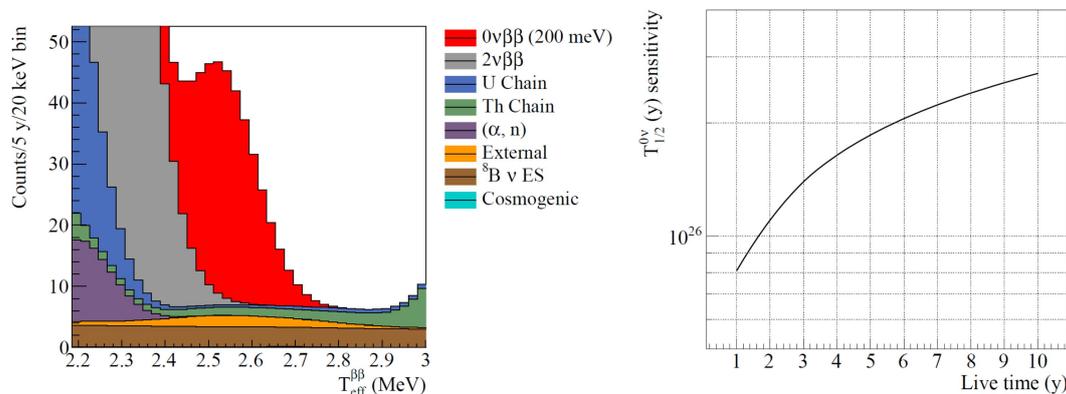


Figure 3. Expected energy spectrum measured by SNO+ after 5 years of data-taking with 0.5% Te loading, with an effective Majorana mass of 200 meV (left). Expected 0NDBD half-life sensitivity limits of SNO+ with 0.5% Te loading as a function of run time (right).

In addition to the search for 0NDBD, the SNO+ physics program also includes measurements of antineutrinos from radioactivity in the Earth (geo-neutrinos) and nuclear reactors [6], as well as low energy solar neutrinos. SNO+ will have dedicated triggers to identify events bursts from Supernova explosions, and will have sensitivity for searches of other physics beyond the Standard Model, like nucleon decay, and axions.

4 SNO+ DEVELOPMENTS

The density of the LAB scintillator is 0.86, making it necessary to counteract the buoyancy force on the AV. This is done by means of a new hold-down rope system, that is anchored to the bottom of the SNO+ cavity. A photo of the detector in Fig. 2 (right) shows the AV in the center, with the rope net around it. The water level is also visible just below the AV.

The radiopurity requirements for SNO+ are very stringent, so prior to filling, the inside of the AV was thoroughly cleaned, using purposefully built ladders and platforms. During the water

fill of the SNO+ cavity, leaks were identified in the liner that covers the rock. The water level had to be lowered to search and repair those leaks. Currently the water level is about half, and filling is ongoing. During the water fill of the AV, a test of the mechanical resistance of the rope net was done by raising the level outside the AV higher than inside, therefore applying the full nominal upwards load of 127 tons.

In order to have the lowest possible contamination of the scintillator itself, it will be purified in the laboratory underground, just prior to filling. The purification includes filtration, gas removal, water extraction - passing water, a polar molecule, through the scintillator (non-polar) to remove mostly metals - and distillation, that can remove many contaminants, both optical and radioactive. The purification system is quite complex and it was a large challenge to build it in the underground laboratory. Now it is essentially complete and undergoing commissioning. Purification of the tellurium itself will also be done underground, to avoid the build-up of cosmogenic isotopes, and construction of the plant will start soon.

5 CALIBRATIONS

One of the major upgrades of SNO+ are the calibration systems, and LIP has a strong participation in this aspect. The basic idea of calibrations is to introduce known sources of signals into the detector - either gamma rays or light pulses -, record the PMT signals, compare them to what is expected and thus improve our model of the detector. As shown in Fig. 4 (left), SNO+ uses two approaches. In one case, radioactive or optical sources can be deployed inside the AV and moved in different positions in two perpendicular vertical planes. The deployment systems must be constructed in a way to minimise the ingress of radioactivity (in the form of Radon gas) in the detector during these calibrations, and the mechanisms will be thoroughly sealed (see Fig. 4 (right)).

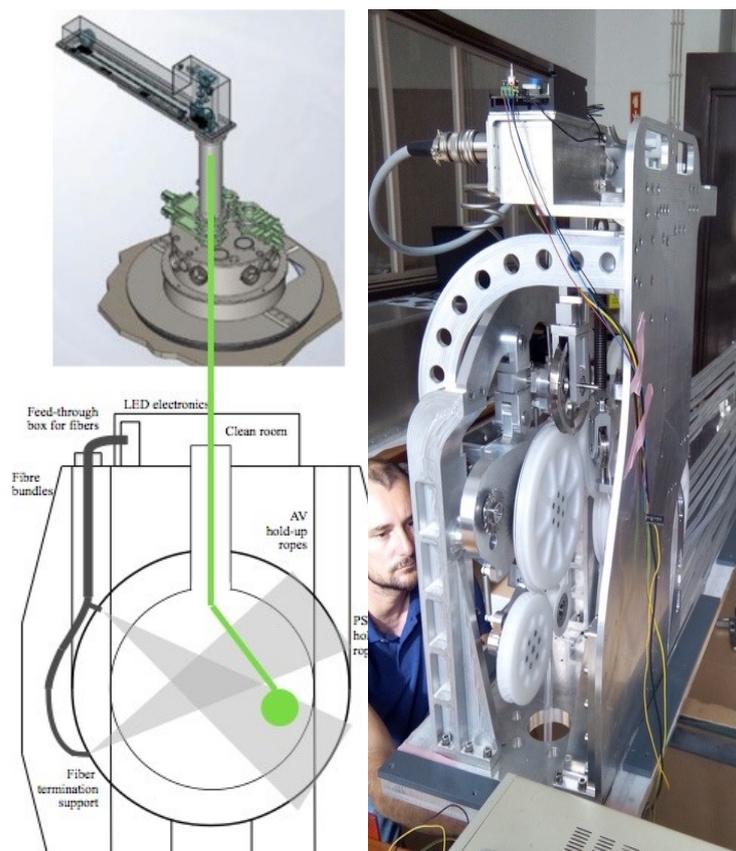


Figure 4. Schematic overview of the SNO+ calibration systems, showing both the internal source deployment system and the external light beams (left). Photo of one component of the source deployment system, being built at LIP-Coimbra (right).

Even taking care to minimise the ingress of Radon, that is unavoidable during calibrations, so SNO+ developed an additional system based on external light sources, so that the detector can be monitored very regularly without any contamination risk. A set of light sources - 96 LEDs and a few lasers - illuminate a set of 120 optical fibers that pass into the detector and bring light into several positions close to the PMTs (see Fig. 5). The majority of the fibers (96) are made of acrylic and have a wide angle of aperture, allowing the illumination (on the other side of the detector) of all the 9300 PMTs [6]. This system is aimed at the synchronization and calibration of the PMT array. A smaller set of quartz fibers is aimed at measurements of the scintillator properties.

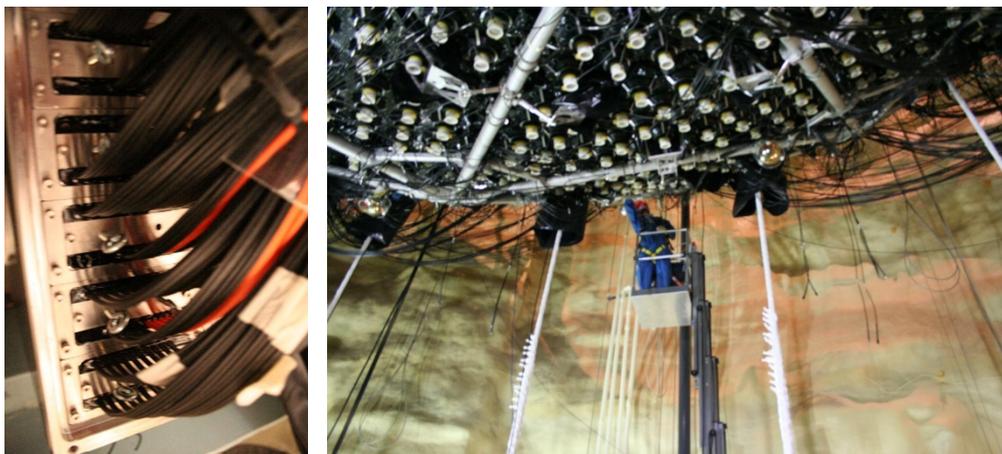


Figure 5. Two aspects of the system for external light beams. Feed-through for 120 optical fiber cables, carrying LED or laser pulses from the upper deck area to many locations around the PMT support structure (left). Installation of the optical fiber cables in the SNO+ detector (right).

6 CONCLUSIONS

After neutrino oscillations, a new generation of experiments wants to understand how neutrinos get their mass, and SNO+ loaded with 0.5% of Tellurium, will contribute with a sensitive search for neutrino-less double beta decay. Scintillator fill is expected in 2017, with the Tellurium phase starting the year after. The transformation of the detector to use liquid scintillator required several changes, but many parts of the experiment are ready now and the initial, commissioning-oriented, water-filled phase is expected to start soon.

References

- [1] Boger J et al. 2000, The Sudbury neutrino observatory, Nucl. Instr. Meth. A449, 172-207.
- [2] Andringa S, these proceedings, and references therein.
- [3] Andringa S et al. 2016, Current status and future prospects of the SNO+ experiment, Adv. High Energy Phys. 2016: 6194250.
- [4] Bialek A et al. 2015, A rope-net support system for the liquid scintillator detector for the SNO+ experiment, Nucl. Instr. Meth. A827, 152-160.
- [5] Gando A et al. 2016, Phys. Rev. Lett. 117, 082503
- [6] Nae S, these proceedings.
- [7] Alves R et al. 2015, The calibration system for the photomultiplier array of the SNO+ experiment, J. Inst. 55: P03002

MEDIÇÃO DAS OSCILAÇÕES DE NEUTRINOS COM DIFERENTES FONTES

Sofia Andringa

LIP; Av. Elias Garcia, 14, 1º, 1400-100 Lisboa

E-mail: sofia@lip.pt

RESUMO

Depois de as oscilações de neutrinos terem sido descobertas usando fontes naturais – o Sol e os raios cósmicos – os resultados foram confirmados e expandidos com neutrinos e anti-neutrinos produzidos em aceleradores de partículas e em reatores nucleares. Esta contribuição descreve como os resultados de muitas experiências são necessários para uma descrição completa da transformação entre os vários sabores de neutrinos.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta de que as propriedades de interação dos neutrinos oscilam de forma regular ao longo do tempo entre a sua produção e a sua deteção obriga a estender o modelo padrão da física de partículas.

Neste modelo, existem três neutrinos, sem massa, sensíveis apenas à interação fraca e classificados conforme interagem apenas com o eletrão, o muão ou o tau (distinguidos estes pelas suas massas, $m_e = 511$ keV, $m_\mu = 106$ MeV, $m_\tau = 1.8$ GeV, respetivamente). O facto de lhes podermos definir um tempo próprio, em que as suas propriedades mudam, implica que os neutrinos não andem à velocidade da luz. Têm, portanto, massa não nula, ao contrário do assumido no modelo padrão. As oscilações não dão, no entanto, indicações sobre o valor absoluto da massa. De facto, todas as medições dedicadas dão resultados compatíveis com zero, e limites superiores que indicam que a massa dos neutrinos é muitas ordens de grandeza inferior à das outras partículas de matéria.

Por terem apenas interação fraca, só uma muito pequena (mas bem determinada) fração de neutrinos é detetada. Para os estudar, é necessário registar os sinais produzidos num grande volume, que é atravessado por um enorme fluxo de neutrinos, podendo um número razoável interagir. Os detetores devem ser isolados das outras partículas e, para tal, são construídos a grande profundidade, para evitar os raios cósmicos, e com materiais puros, para evitar a radioatividade natural.

O Super Kamiokande (SK), representado na Figura 1, é um detetor de neutrinos que começou a tomar dados em 1996 e continua em funcionamento, participando na fase de descoberta, confirmação e medidas de precisão das oscilações de neutrinos. O SK é um tanque com 50 mil toneladas (kt) de água pura, em que partículas carregadas com velocidades superiores à velocidade da luz na água produzem um cone de luz de Cherenkov. Esta luz ultra-violeta é detetada por um conjunto de cerca de 12 mil foto-multiplicadores (PMTs) que cobre a superfície interna de um cilindro. Numa parte exterior, um número menor de PMTs, regista a passagem de partículas, para identificar e rejeitar partículas que venham de fora. O SK opera numa antiga mina a 1 km de profundidade, em Kamioka, no Japão.

2. DESCOBERTA COM FONTES NATURAIS

Os mesmos processos de fusão nuclear nas camadas centrais da estrela que fazem o Sol brilhar, dão origem a neutrinos do eletrão, com energias até uns poucos MeV, que chegam à Terra em 8 minutos. Desde a década de 1960, várias experiências se dedicaram a medir os neutrinos solares para testar o modelo do Sol, mas todas encontraram um número significativamente menor do que o esperado – no que ficou conhecido como o problema dos neutrinos solares. O SK, por

exemplo, verifica que os neutrinos que deteta vêm da direção do Sol e que, como atravessam a Terra sem atenuação do feixe, a taxa medida durante a noite é compatível com a medida durante o dia, mas apenas cerca de metade da esperada para neutrinos do eletrão [1].

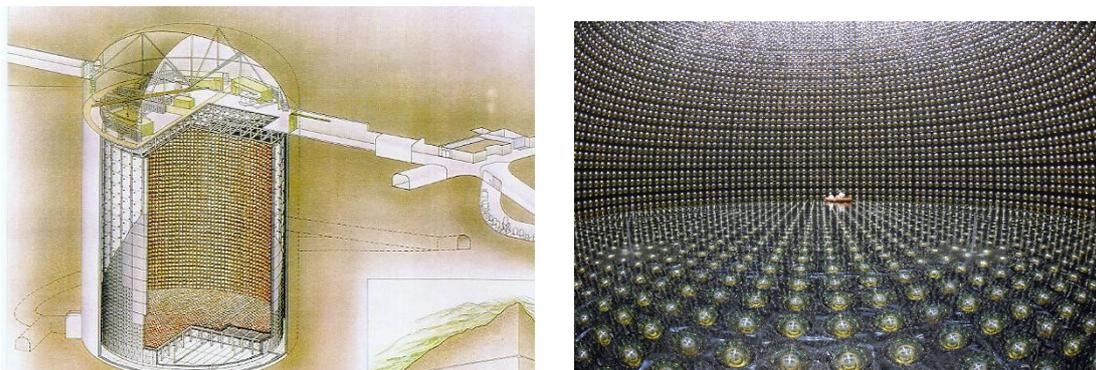


Figura 1. O detetor de neutrinos Super Kamiokande: (à esquerda) esquema do detetor, um cilindro com 39 m de diâmetro e 42 m de altura; (à direita) quando a água é esvaziada para operações de manutenção,

Foi necessária uma experiência diferente, o Sudbury Neutrino Observatory, SNO, para solucionar o problema dos neutrinos solares. O SNO é também um detetor de Cherenkov mas com 1 kt de água pesada. Ao utilizar deutério em vez de hidrogénio, tornam-se possíveis duas novas interações dos neutrinos: uma de correntes carregadas, em que os neutrinos de eletrão transformam o neutrão em próton e dão origem a um eletrão que pode ser detetado; outra de correntes neutras, em que um neutrino de qualquer sabor apenas separa o próton do neutrão e é este que é detetado (ao ser capturado pelo deutério, por cloro dissolvido na água, ou por detetores dedicados, em três fases da experiência). Assim, o processo de correntes neutras não distingue entre os três sabores de neutrinos, e as taxas medidas correspondem às calculadas para neutrinos do Sol; já a taxa de neutrinos do eletrão, medido por correntes carregadas, é apenas um terço da esperada [2]. Conclui-se que os neutrinos mudam de sabor entre a sua produção no Sol e a sua deteção na Terra.

Devido ao seu tamanho, o SK pode também medir os neutrinos atmosféricos, muito mais raros e de maior energia (cerca de 1 GeV). Estes neutrinos são criados por decaimento de partículas instáveis (os píões, π) criadas na interação de raios cósmicos (maioritariamente prótons) com a atmosfera terrestre. Os neutrinos chegam de todas as direções, depois de atravessar a atmosfera sobre o detetor (dezenas de quilómetros) ou a Terra (mais de dez mil quilómetros, para os que vêm de baixo). Esperam-se dois neutrinos do muão para cada neutrino do eletrão, devido aos seguintes decaimentos em cadeia: $\pi^{+(-)} \rightarrow (\text{anti})\nu_{\mu} + \mu^{+(-)} \rightarrow (\text{anti})\nu_{\mu} + \nu_{\mu} + (\text{anti})\nu_e + e^{+(-)}$. No detetor, a interação dos neutrinos de muão ou eletrão por correntes carregadas originará muões ou eletrões, respetivamente.

No Super Kamiokande, a distância atravessada por um muão permite estimar a sua energia, e a projeção do cone de Cherenkov, um círculo bem definido, indica a sua direção; os eletrões podem ser distinguidos devido à sua maior dispersão na água, que cria círculos de Cherenkov mais difusos, mas continua a ser possível obter a sua direção e energia (pela quantidade de luz produzida). Os resultados [3] mostram que as distribuições em energia e direção dos neutrinos do eletrão seguem as previsões, mas há uma grande redução no número de neutrinos do muão, que depende fortemente da sua direção. Quanto maior a distância do ponto em que foram produzidos na atmosfera, acima ou abaixo do detetor, maior a redução do fluxo observado em relação ao previsto.

Tendo em conta que no caso dos neutrinos solares há conservação do número total de neutrinos, e que se mede a taxa esperada para os neutrinos do eletrão atmosféricos, assume-se que os neutrinos do muão se transformam em neutrinos do tau (o que veio a ser confirmado mais tarde, nos dados de mais alta energia que permitem a produção do tau). Mas o ponto mais importante na descoberta é o padrão desta transformação, compatível com uma oscilação com uma

frequência proporcional à distância percorrida e inversamente proporcional à energia. De facto, os dados sugerem uma oscilação de neutrinos do muão para neutrinos do tau com uma amplitude máxima a 500 km / 1 GeV.

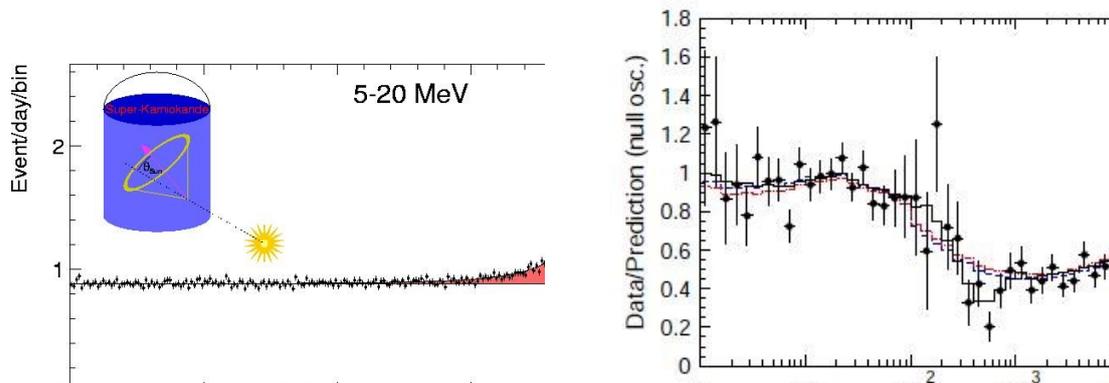


Figura 2. Neutrinos solares e atmosféricos em Super Kamiokande: (à esquerda) distribuição do ângulo entre a posição do Sol e a direção de recuo do eletrão disperso pelo neutrino [1]; (à direita) razão entre dados e previsão, em função da razão entre a distância percorrida e a energia do neutrino do muão; a linha a cheio é o resultado da oscilação, tendo em conta a resolução experimental, as outras correspondem a diferentes modelos [3].

Enquanto as partículas se propagam, sem interagir, a única característica relevante além da energia é a massa. Em conjunto, estas grandezas determinam um comprimento de onda. O que vemos na oscilação de neutrinos é a interferência entre diferentes comprimentos de onda. Enquanto eletrões, muões e taus são definidos por massas próprias, a massa e o sabor dos neutrinos misturam-se de forma não trivial. A combinação de comprimentos de onda que determina o sabor na produção (sabor esse que se define pela produção em conjunto com eletrão, muão ou tau) repete-se regularmente; mas, ao longo do percurso, dominam outras combinações (que selecionam outras interações, e por isso outros sabores, no momento da deteção).

Assumindo apenas dois sabores e duas massas (i e j), a probabilidade de se obter a mesma combinação de massas, e portanto o mesmo sabor, pode ser escrita como:

$$P(\nu_x \rightarrow \nu_x) = 1 - \sin^2(2\theta_{ij})\sin^2(C\Delta m_{ij}^2[eV^2]L[km]/E[GeV]) ,$$

em que as características fundamentais dos neutrinos estabelecem a amplitude, $\sin^2(2\theta_{ij})$, de acordo com a mistura das massas no estado x , e a frequência determinada por $\Delta m_{ij}^2 = \Delta m_i^2 - \Delta m_j^2$. As condições experimentais refletem-se na energia, E , e no tempo ou distância percorrida, L ; o fator constante $C \sim 1.27$ não tem unidades e engloba a constante de Plank e a velocidade da luz. Note-se que a oscilação se deve a características dos próprios neutrinos e não a uma interação. No caso dos neutrinos solares, não se podem ignorar os efeitos de interação na matéria densa do Sol, mas esses resultam na definição de uma massa efetiva, permitindo a mesma interpretação.

Embora a massa dos neutrinos seja demasiado pequena para ser diretamente medida, a Natureza dá-nos acesso a ela, ao selecionar dois efeitos ressonantes diferentes, que se devem ao mesmo fenómeno de mistura de sabores, nos neutrinos solares e nos neutrinos atmosféricos. A Figura 2 mostra resultados de SK para ambos os tipos de neutrinos.

3. CONFIRMAÇÃO COM FONTES ARTIFICIAIS

Ao contrário do Sol, em que os neutrinos são produzidos por fusão, a fissão nuclear produz anti-neutrinos. Nos reatores nucleares, são produzidos anti-neutrinos com eletrões; num detetor perto de um reator, esses anti-neutrinos produzem positrões. Foi esta a primeira descoberta de um tipo de neutrino. Nos aceleradores, os neutrinos são produzidos pelo decaimento de píões, como nos raios cósmicos; num detetor próximo, produzem muões e não eletrões. Foi assim que se

descobriu que havia mais de um tipo de neutrinos. Para pequenas distâncias, o sabor dos neutrinos está bem definido; são necessários longos tempos de propagação para que ocorra uma transformação do sabor. As oscilações podem ser confirmadas usando estas fontes em experiências dedicadas e ajustadas às longas distâncias necessárias. Os resultados são mostrados na Figura 3. Não sendo prático repetir a medida em vários pontos do percurso, é possível verificar o padrão de oscilações refletido num espectro contínuo de energias, já que a frequência depende da razão entre distância percorrida e energia.

A primeira confirmação veio da experiência K2K [4] em que um feixe de neutrinos, com um espectro de energia semelhante ao dos neutrinos atmosféricos, era medido por um conjunto de detetores a 250 m da produção, no laboratório KEK, e no Super Kamiokande, a 250 km de distância. Os detetores no KEK incluíam um detetor de Cherenkov de 1 kt, detetores de traços, um calorímetro eletromagnético e um espectrómetro de muões. Assim, era possível medir o espectro de energia original dos neutrinos do muão, a contaminação de neutrinos do eletrão e anti-neutrinos e , também, caracterizar em maior detalhe as suas interações (neutras e carregadas, elásticas e quase-elásticas, com um ou vários piões), por vezes indistinguíveis no SK.

A oscilação foi confirmada com a deteção de apenas 109 neutrinos de muão em Super-Kamiokande (quando seriam esperados 160 na ausência de oscilação), e com a comparação do espectro de energia produzido com o que se mede a grande distância, L . Os neutrinos de muão “desaparecem” quase completamente a uma energia bem determinada, E , o que permite medir a amplitude ($\sin^2(2\theta) \sim 1$) e a fase ($|\Delta m^2| \propto E/L$) da oscilação. A mesma ideia foi mais tarde usada, por exemplo, na experiência MINOS [5], nos EUA com um espectro de energias mais altas e, correspondentemente, uma maior distância, e uma tecnologia diferente de deteção de neutrinos, com espectrómetros magnetizados tanto perto como longe do feixe.

Hoje, T2K [6] utiliza feixes de neutrinos e de anti-neutrinos do muão, de Tokay para Kamioka, a 290 km, e uma nova técnica para ajustar a energia de forma a maximizar a oscilação. Aqui, os prótons são dirigidos para um ponto 2.5° abaixo de Kamioka. Por constrangimentos cinemáticos, os neutrinos emitidos na direção do SK têm assim a sua energia limitada e quase monocromática. Dois conjuntos de detetores de neutrinos em Tokay são usados para monitorizar tanto o feixe total (na direção dos prótons e piões), como o feixe selecionado para a medição (na direção do SK).

Com feixes mais intensos, é possível medir com maior precisão a taxa de desaparecimento de neutrinos do muão (que oscilam para neutrinos do tau, que não podem induzir correntes carregadas a esta energia) e comprovar que os parâmetros de oscilação são iguais entre neutrinos e anti-neutrinos. Um dos maiores desafios de T2K é a identificação e veto de processos de correntes neutras (possíveis para os três sabores de neutrinos), nomeadamente a criação de π^0 , que originam dois círculos de Cherenkov muito semelhantes aos produzidos pelos eletrões. De facto, um dos resultados mais importantes desta experiência é o aparecimento de um pequeno número de neutrinos do eletrão, numa oscilação secundária a partir do feixe puro de neutrinos do muão, que iniciará um outro capítulo nas medições das oscilações de neutrinos.

Entretanto, KamLAND, o Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector, mediu o espectro de energia dos anti-neutrinos de eletrão produzidos pelos muitos reatores nucleares do Japão, dos quais 50% distam entre 150 km e 250 km de Kamioka. Este detetor já não utiliza água, mas sim um líquido cintilador orgânico – que produz muito mais luz para uma mesma energia, já que é dedicado a energias da escala do MeV (em que, note-se, não é possível criar nem taus nem muões). Os seus resultados mostram o desaparecimento de neutrinos do eletrão, com um padrão em energia caracterizado por uma fase diferente, ou seja uma nova diferença de massas [7].

De facto, estes são os parâmetros de oscilação dos neutrinos solares, confirmados de forma totalmente independente e complementar. Não só se verifica que os parâmetros são compatíveis entre neutrinos e anti-neutrinos, como as oscilações ampliadas pelo efeito da matéria densa do Sol são visíveis neste caso em que se pode considerar que ocorrem no vácuo. O fixar da

distância no vácuo permite uma maior sensibilidade à diferença entre quadrados de massas; enquanto que as interações no Sol permitem quebrar a simetria entre as duas massas envolvidas: o neutrino do elétron tem uma maior componente da massa mais leve.

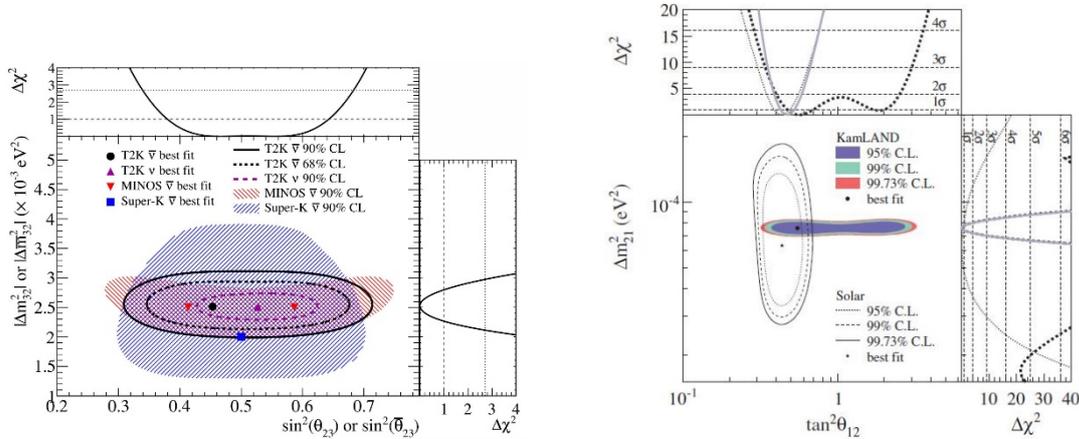


Figura 3. Parâmetros de oscilação dos neutrinos atmosféricos e solares, os resultados são apresentados delimitando as zonas possíveis para os parâmetros de amplitude / ângulos de mistura e frequência / diferença dos quadrados de massa: (à esquerda) os resultados de T2K [6] para feixes de neutrinos e anti-neutrinos são compatíveis entre si e com os de MINOS e dos neutrinos atmosféricos de SK; (à direita) os resultados de KamLAND [7] para anti-neutrinos de reator são compatíveis com a combinação dos resultados de todas as experiências de neutrinos solares, os primeiros determinam melhor a fase, e os segundos a mistura.

KamLAND foi ainda a primeira experiência a observar anti-neutrinos, produzidos nas cadeias de decaimento de urânio e tório globalmente no interior do planeta. Hoje, uma experiência semelhante, como Borexino [8], pode medir geo-neutrinos e neutrinos solares resultantes de diferentes processos de fusão. Podemos usar a informação transportada pelos neutrinos para testar os modelos da Terra e do Sol, mas sabemos agora que é necessário ter em conta a mistura complexa entre as suas massas e sabores.

4. FECHAR O CÍRCULO ENTRE OS TRÊS NEUTRINOS

A forma de aceder experimentalmente às relações entre os três sabores e as três massas de neutrinos é resumida esquematicamente na Figura 4. Temos duas diferenças de massa que determinam a oscilação de neutrinos e anti-neutrinos do muão para tau (os chamados parâmetros atmosféricos, com $|\Delta m_{23}^2| \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$) e de elétron para os outros tipos (os chamados parâmetros solares, com $\delta m_{12}^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$), com grandes amplitudes – máxima no primeiro caso, um pouco menor no segundo. A terceira diferença de massas $|\Delta m_{13}^2|$ é semelhante à atmosférica, e a amplitude da oscilação correspondente é muito menor.

Para maximizar esta terceira oscilação, várias experiências tentaram medir anti-neutrinos de elétron (dominantes na massa m_1) de reatores nucleares ($E \sim 1 \text{ MeV}$), a distâncias de 1 km. A primeira a ver a oscilação, e até hoje a que tem maior precisão, foi Daya Bay [9]: num complexo de reatores nucleares de alta potência, na China, são instalados oito detetores de cintilador líquido, que podem ser mais pequenos que os anteriores e quase à superfície, devido aos grandes fluxos esperados. Quatro deles têm distâncias médias aos reatores de 0.5 km, e os outros quatro de 1.6 km, e são de resto idênticos: a precisão na calibração relativa dos vários detetores é a grande vantagem de Daya Bay. Observa-se, neste caso, um decréscimo de menos de 10% no número total de neutrinos, acompanhado por uma alteração no espectro de energia em função da distância média ao ponto de produção.

A amplitude da mistura é, neste caso, muito menor, e já não é possível ignorar as contribuições das outras combinações de massa. A fórmula simplificada de oscilação entre dois neutrinos já não é adequada para esta fase de medições de precisão. Esta terceira mistura explica o aparecimento de neutrinos do elétron no feixe puro de neutrinos do muão, visto por T2K.

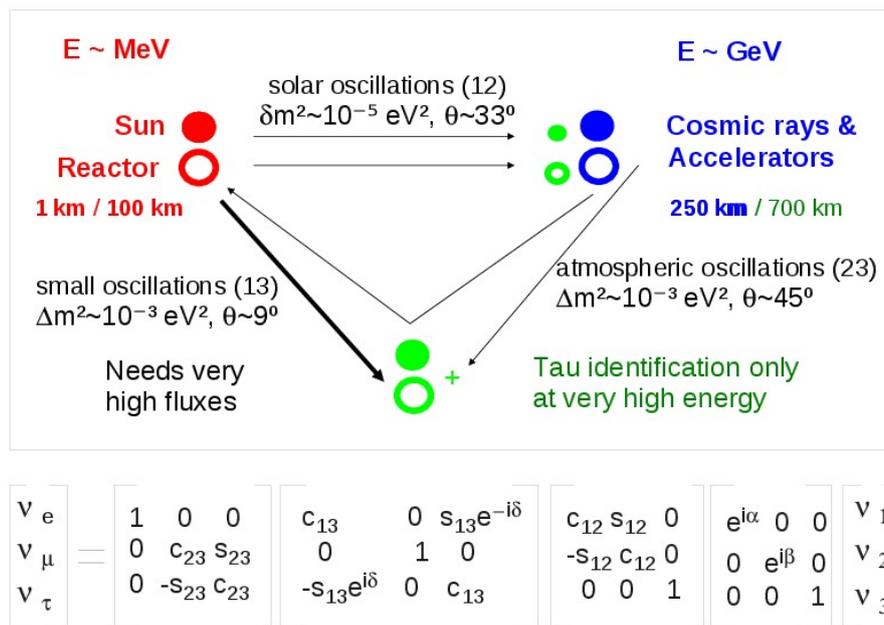


Figura 4. Mistura entre a massa e o sabor dos neutrinos: (em cima) esquema de como acedemos experimentalmente a três diferenças de massa e três ângulos de mistura, os círculos cheios representam neutrinos e os vazios representam anti-neutrinos, as cores representam os três sabores, vermelho para o eletrão, azul para o muão e verde para o tau; (em baixo) a matriz PMNS, escrita como produto das rotações, em função dos ângulos de mistura, $c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$, $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$; a fase introduzida por $e^{i\delta}$ não existiria no caso de um terceiro ângulo de mistura nulo, as fases α e β não afetam as oscilações mas são necessárias para a descrição completa no caso dos neutrinos serem partículas de Majorana.

5. PRECISÃO E QUESTÕES EM ABERTO

A matriz que estabelece a relação entre os sabores e as massas dos neutrinos (PMNS, de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata) tem o seu equivalente no sector dos quarks (na matriz CKM, de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa). Mas, enquanto no caso dos quarks a matriz é quase diagonal, aqui todas as nove componentes variam entre 0.15 e 0.85, indicando que na análise de neutrinos de cada sabor é necessário considerar as três massas, e vice-versa. A matriz é usualmente escrita como um produto de três rotações entre pares de massas, que isolam os ângulos de mistura medidos nos neutrinos atmosféricos e aceleradores ($\theta_{23} \sim 45^\circ$), nos neutrinos solares ($\theta_{12} \sim 30^\circ$), e o pequeno ângulo ($\theta_{13} \sim 9^\circ$). Por serem três, há uma outra fase (δ_{CP}) que não pode ser retirada da descrição global, e que se não for nula implica uma violação da simetria de carga-paridade (CP) introduzindo diferenças entre partícula e anti-partícula. Os valores mais exatos para cada parâmetro são obtidos pela combinação de todas as experiências, no formalismo de oscilação entre três neutrinos [10].

As massas dos neutrinos são ainda uma questão em aberto. As oscilações dão apenas acesso a diferenças entre quadrados, e não sabemos a hierarquia (dita normal se $m_3 > m_1$, ou invertida se $m_3 < m_1$). O valor médio absoluto pode ser tão pequeno que as diferenças (de 10^{-3} eV^2 e 10^{-5} eV^2) sejam muito relevantes, ou pode ser de $\sim 1 \text{ eV}$, e nesse caso as massas são quase degeneradas. O método clássico para medir a massa do neutrino é estudar o espectro do decaimento beta (que levou a que Pauli postulasse a existência do neutrino em 1930), e determinar a energia mínima levada pelo neutrino do eletrão ($\langle m^2_{\beta} \rangle = \sum |U_{ie}|^2 m_i^2$); um outro é procurar decaimentos beta duplos sem neutrinos – a existir, a sua taxa seria proporcional a uma outra massa efetiva ($\langle m^2_{\beta\beta} \rangle = |\sum U_{ie}^2 m_i|^2$) e os neutrinos seriam as únicas partículas elementares de Majorana. Em ambos os casos, os valores da massa mínima ou média acessíveis depende fortemente da hierarquia.

As medições futuras de oscilações de neutrinos têm alguma sensibilidade à hierarquia de massas. Pode procurar-se diretamente o padrão de oscilação secundário, o que obriga a uma excelente resolução em energia, ou analisar os efeitos de interação com a matéria, à semelhança do que acontece no Sol, mas agora usando a muito menor densidade de elétrons da Terra. Esses efeitos de matéria levariam a uma diferença entre o aparecimento de neutrinos e anti-neutrino do elétron em feixes puros de neutrinos e anti-neutrinos do muão, que podem chegar aos 10% em T2K. De facto, os dados de T2K parecem hoje indicar alguma diferença entre os dois feixes. No entanto, o efeito introduzido pelo ângulo δ_{CP} é muito maior. Os resultados preliminares em 2016 [11] indicam que esse ângulo é não nulo, independentemente da hierarquia de massas. Os neutrinos poderiam então ajudar a explicar a assimetria entre matéria e anti-matéria no Universo.

5. RESUMO E CONCLUSÃO

As oscilações de neutrinos foram uma surpresa no quadro da física de partículas, a que acedemos pelo estudo neutrinos produzidos em fontes naturais, numa área a que chamamos física de astropartículas.

Os neutrinos têm massas não nulas, numa estrutura não trivial. É a combinação específica entre valores de massa que seleciona o modo como o neutrino interage, e nos permite atribuir-lhe o sabor, definido no modelo padrão da física de partículas. O sabor está bem determinado no momento de produção, e oscila no tempo próprio de cada neutrino, sendo determinado de novo quando ele interage, num exemplo típico de colapso de ondas da mecânica quântica.

A existência de processos ressonantes na Natureza, depois otimizada nas experiências com aceleradores e reatores nucleares, permitiu-nos medir com grande precisão características fundamentais dos neutrinos. Conhecendo agora os detalhes dessa mistura entre sabor e massa, podemos usar os neutrinos para estudar as suas fontes, nomeadamente o Sol e a Terra, mas também supernovas e outras fontes astrofísicas.

Os valores absolutos das massas são ainda desconhecidos, mas muito menores do que as massas das outras partículas elementares de matéria, e começamos agora a testar pequenas diferenças entre neutrinos e anti-neutrinos. Estes resultados podem ser muito relevantes não apenas para a física de partículas mas também para a cosmologia. O estudo dos neutrinos concentra ainda grandes desafios experimentais e teóricos, que poderão trazer novas surpresas de relevo para estas diferentes áreas da física fundamental.

REFERÊNCIAS

- [1] The Super-Kamiokande Collaboration, The Super-Kamiokande Detector, Nucl. Instrum. Meth A501, 418-462, 2003; Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I, Phys. Rev. D 73, 112001, 2006.
- [2] The SNO Coll., Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. Lett. Vol. 89, No. 1, 011301, 2002; Combined Analysis of all Three Phases of Solar Neutrino Data from the Sudbury Neutrino Observatory, Phys. Rev. C 88, 025501 (2013).
- [3] The Super-Kamiokande Coll., Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, Phys. Rev. Lett. 81, 1562, 1998; Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation, Phys. Rev. Lett. 93, 101801, 2004; Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande, Phys. Rev. Lett. 110, 181802, 2013.
- [4] K2K Coll., Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment, Phys. Rev. D 74, 072003, 2006.
- [5] MINOS Coll., Measurement of neutrino and antineutrino oscillations using beam and atmospheric data in MINOS, Phys. Rev. Lett. 110, 2518011, 2013.
- [6] T2K Coll., Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with $6.6E20$ protons on target, Phys. Rev. D 91, 072010, 2015; Measurement of muon antineutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam, Phys. Rev. Lett. 116, 181801, 2016.

[7] KamLAND Coll., Precision measurement of neutrino oscillation parameters with KamLAND, Phys. Rev. Lett. 100, 221803, 2008; Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND, Nature 436, 499-503, 2005.

[8] Borexino Coll., Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data, Phys. Rev. D 92, 031101(R), 2015; Final results of Borexino phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy, Phys. Rev. D 89, 11, 2014.

[9] Daya Bay Coll., *Spectral Measurement of Electron Antineutrino Oscillation Amplitude and Frequency at Daya Bay*, Phys. Rev. Lett. 112, 061801, 2014.

[10] Particle Data Group (K. Olive *et al*), The Review of Particle Physics, Chin. Phys. C, 38, 090001, 2014 and 2015 update.

[11] Tanaka H. [for the T2K Coll.], Status, recent results and plans for T2K, presented at Neutrino 2016, London, July, 2016; Iwamoto K. [for the T2K Coll.], Recent Results from T2K and Future Prospects, presented at ICHEP 2016, Chicago, August, 2016.

AO ENCONTRO DE MEDIDAS PRECISAS DE MUÕES EM CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

Raul Sarmento¹, Pedro Abreu^{2,3}, Sofia Andringa², Pedro Assis^{2,3}, Lorenzo Cazon², Ruben Conceição^{2,3}, Francisco Diogo², João Espadanal², Miguel Ferreira², Paulo Ferreira¹, Paulo Fonte^{4,5}, Luis Lopes⁴, Ricardo Luz², Luis Mendes², Mário Pimenta^{2,3}, Catarina E. Santo², Bernardo Tomé^{2,3}

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) - Departamento de Física, Universidade do Minho, 4710-057, Braga, Portugal

² Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) - Avenida Elias Garcia 14, 1º, 1000-149 Lisboa, Portugal

³ Instituto Superior Técnico (IST) - Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

⁴ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) - Departamento de Física da Universidade de Coimbra, 3004-516 Coimbra, Portugal

⁵ Instituto Politécnico de Coimbra, ISEC - Rua Pedro Nunes, 3030-199 Coimbra, Portugal

E-mail: raul@lip.pt

RESUMO

Neste trabalho são revistos os resultados do Observatório Pierre Auger na medição de muões de chuviros atmosféricos extensos iniciados por raios cósmicos de energia extrema. As implicações na determinação da composição em massa dos raios cósmicos e no conhecimento das interações hadrónicas de elevada energia são discutidas. Os estudos conduzidos pelo LIP com vista ao melhoramento destas medidas são apresentados, nomeadamente na caracterização da resposta de um detector de Cherenkov a muões atmosféricos usando um hodoscópio de câmaras de placas resistivas (RPC) e no desenvolvimento de uma matriz de RPC para a determinação da componente muónica dos chuviros.

MUÕES EM CHUVEIROS ATMOSFÉRICOS EXTENSOS

Raios cósmicos de energia extrema ($E > 1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$) originam cascatas de partículas na atmosfera terrestre com milhares de milhões de partículas, os chamados chuviros atmosféricos extensos. A primeira interação do raio cósmico primário com um núcleo atómico atmosférico, a elevadas altitudes, pode atingir uma energia no referencial do centro-de-massa na ordem das centenas de TeV; bastante superior, portanto, à energia atingida nos colisionadores de partículas. As partículas secundárias resultantes decaem ou interagem, processo que se repete sucessivamente, dando-se ao longo da atmosfera o desenvolvimento do chuviro nas suas várias componentes: electromagnética, muónica e hadrónica.

As partículas produzidas em maior número nas interações hadrónicas desta cascata são os piões. Os piões neutros, com um tempo de vida de $8.5 \cdot 10^{-17} \text{ s}$, decaem maioritariamente para fótons que geram subcascatas electromagnéticas, *i.e.* constituídas por electrões, positrões e fótons. Os piões carregados ou interagem ou decaem, maioritariamente para muões e neutrinos do muão. Este é o principal processo de produção de muões num chuviro atmosférico extenso. O número de muões do chuviro está, pois, correlacionado com o número de piões produzidos, que por sua vez depende da massa do raio cósmico primário - número de nucleões - e de quantidades associadas às interações hadrónicas - secção eficaz, multiplicidade e inelasticidade. As medidas de muões nestes chuviros contêm informação não só sobre a natureza dos raios cósmicos de energia extrema, uma questão em aberto até esta data, como também sobre a física hadrónica que há além da fronteira de energia imposta pelos colisionadores.

A maior experiência que determina, actualmente, as propriedades dos chuviros atmosféricos extensos é o Observatório Pierre Auger, na Argentina [1]. É uma experiência em que está implementada a detecção híbrida. Por um lado, uma matriz de detectores de Cherenkov de

superfície faz a amostragem das partículas dos chuviros que atingem a superfície terrestre, permitindo medir a densidade de partículas em função da distância ao centro do chuviro – o seu perfil lateral. Por outro lado, telescópios que visam a atmosfera acima da superfície do observatório detectam a luz de fluorescência emitida pela passagem do chuviro, permitindo medir o número de partículas em função da profundidade atmosférica do chuviro – o seu perfil longitudinal.

O Observatório Pierre Auger não foi concebido com um detector dedicado exclusivamente a medidas de muões: os telescópios de fluorescência medem essencialmente a componente electromagnética e os detectores de Cherenkov são sensíveis a todas as componentes. O facto do número de partículas dos chuviros ser dominado pela componente electromagnética dificulta a medição de observáveis muónicas. No entanto, no caso de chuviros inclinados, em que o ângulo zenital (*i.e.* o ângulo que o eixo do chuviro faz com a vertical) é $\geq 60^\circ$, a espessura de atmosfera atravessada é suficientemente grande para absorver quase na totalidade as partículas da componente electromagnética. Em chuviros inclinados, o sinal à superfície é dominado pelos muões, tornando possível a medição de observáveis muónicas.

RESULTADOS DAS MEDIDAS DE MUÕES EM AUGER

A Figura 1 (esquerda) mostra o resultado de Auger na medição da profundidade atmosférica à qual o número de muões produzidos em chuviros é máximo, X_{max}^μ [2]¹. O valor médio desta observável em chuviros com ângulo zenital no intervalo $[55^\circ, 65^\circ]$ está representado em função da energia do raio cósmico primário. Os números juntos aos pontos experimentais correspondem ao número de eventos medidos em cada intervalo de energia. Uma vez que a composição em massa dos raios cósmicos de energia extrema é desconhecida, estão também representadas as previsões de modelos assumindo uma composição pura em protões ou em núcleos de ferro. Estes dois casos correspondem, respectivamente, aos extremos leve e pesado de núcleos com abundâncias significativas no Universo. Os modelos de interacções hadrónicas usados na simulação computacional de chuviros, QGSJETII-04 e Epos-LHC, diferem na descrição fenomenológica da produção de hadrões, na região do espaço de parâmetros fora do regime perturbativo da cromodinâmica quântica ou onde não há dados de colisionadores de partículas.

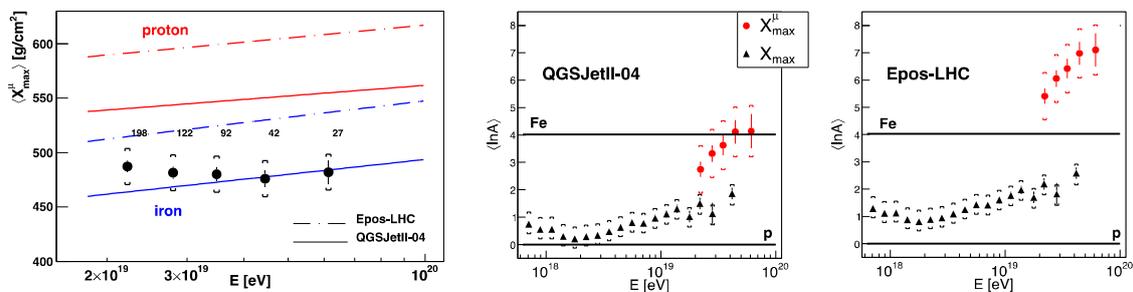


Figura 1. À esquerda, o valor médio de X_{max}^μ em função da energia do raio cósmico primário: o resultado de Auger (preto) é comparado com as previsões de dois modelos de interacções hadrónicas nas hipóteses de protão (vermelho) e ferro (azul); ao centro e à direita, os valores de $\langle \ln A \rangle$ obtidos de $\langle X_{max}^\mu \rangle$ e $\langle X_{max} \rangle$ no caso dos modelos assumidos [2].

A componente muónica dos chuviros tem $\langle X_{max}^\mu \rangle$ mais baixo do que é previsto por estes modelos na hipótese de uma composição pura em protões. Observa-se, também, que a dependência de $\langle X_{max}^\mu \rangle$ na energia é mais plana do que a prevista pelos modelos nas hipóteses de uma composição pura quer em protões quer em ferro. O grau de liberdade na selecção de um modelo específico, associado às incertezas destes e às incertezas experimentais, não permite tirar conclusões destes dados sobre a composição em massa.

¹ Os detalhes da técnica usada para medir o perfil longitudinal da componente muónica de chuviros com o detector de superfície de Auger podem ser consultados na referência [3].

A previsão de uma correlação entre X_{max}^{μ} e o número de massa do núcleo primário A permite analisar o resultado na conversão para $\langle \ln A \rangle$, representado na Figura 1 (centro e direita) para cada um dos modelos [2]. O resultado nesta variável pode ser comparado com o do procedimento análogo para X_{max} , também correlacionado com A , que resulta de uma medida independente feita com o detector de fluorescência. Esta figura evidencia que nenhum dos modelos representados descreve os chuviros de forma satisfatória. Em ambos os casos, há uma inconsistência na composição derivada dos resultados às energias mais elevadas, sendo mais pesada quando é considerado X_{max}^{μ} .

A Figura 2 (esquerda) mostra o resultado de Auger na medição do valor médio (normalizado a um valor de referência) do número de muões à superfície $\langle R_{\mu} \rangle$ dividido pela energia do raio cósmico primário [4]. Os dados correspondem a chuviros com ângulo zenital no intervalo $[62^{\circ}, 80^{\circ}]$ observados simultaneamente pelos detectores de superfície e de fluorescência. As barras de erro sistemático associadas aos pontos experimentais, em valor relativo $\geq 10\%$, contêm uma contribuição importante decorrente da incerteza da resposta dos detectores de Cherenkov a muões inclinados. Estão também representadas as previsões dos modelos e hipóteses de composição referidas antes. O valor de $\langle R_{\mu} \rangle$ em chuviros inclinados é superior ao previsto pelos modelos na hipótese de composição pura em prótons, sendo a sua dependência na energia diferente das previsões na hipótese de uma composição pura.

Pode inferir-se que a variável R_{μ} é boa para estudos de composição a partir da separação prevista entre próton e ferro, assim como da proximidade entre os dois modelos. Explorando este facto e a natureza híbrida dos eventos medidos, foi feita a combinação dos resultados de $\langle R_{\mu} \rangle$ e $\langle X_{max} \rangle$ para o mesmo subconjunto de chuviros no intervalo de energia em torno de 10^{19} eV, aos quais corresponde um ângulo zenital médio igual a 67° , representada na Figura 2 (direita) [4]. As previsões, são acrescentadas as de versões anteriores do modelo QGSJET e de outras composições puras, incluindo hélio e azoto. O resultado não é descrito por nenhum modelo e hipótese de composição pura.

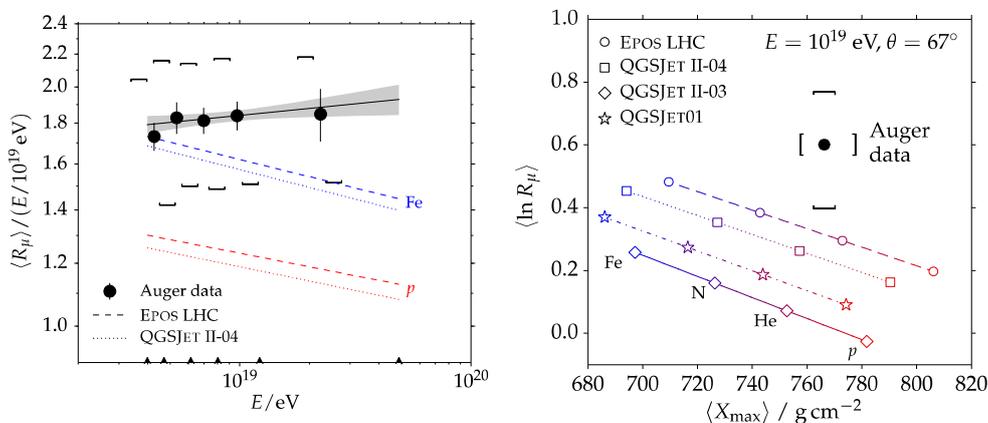


Figura 2. À esquerda, o resultado de Auger para o valor médio de R_{μ} normalizado pela energia do raio cósmico primário; à direita, o resultado de Auger para a combinação dos valores médios de R_{μ} e X_{max} a 10 EeV, comparado com vários modelos e hipóteses de massa [4].

MEDIDAS COM UM HODOSCÓPIO DE RPC

Os resultados surpreendentes das medidas de muões de Auger, entre outros, motivaram o reforço do Observatório Pierre Auger com detectores cintiladores (AugerPrime), assim como o desenvolvimento de esforços próprios do LIP para introduzir novas tecnologias em experiências de chuviros atmosféricos extensos. Os requisitos destas experiências exigem uma solução de baixo consumo de energia, operação remota estável e resistência a condições climáticas adversas. Neste sentido, o LIP desenvolveu estações de RPC autónomas para serem utilizadas na contagem, com boa resolução espacial e temporal, de muões individuais em chuviros. Os detalhes sobre a caracterização e a performance dos protótipos já construídos e instalados no terreno podem ser consultados em [5].

Uma aplicação das RPC desenvolvidas consistiu numa determinação precisa da resposta de um detector de Cherenkov de Auger a muões. Atendendo ao tamanho das barras de erro na Figura 2, percebe-se como o conhecimento preciso desta resposta é importante para diminuir as incertezas experimentais e refinar as conclusões relativas à validade dos modelos de interações hadrónicas e das hipóteses de composição.

A experiência consistiu na montagem de duas RPC numa configuração de hodoscópio, por cima e por baixo de um detector de Cherenkov de Auger usado para testes, mostrado na Figura 3 (esquerda). Este detector consiste num tanque preenchido com 12 toneladas de água; partículas carregadas relativistas ao atravessarem a água geram luz por efeito de Cherenkov, que é recolhida por tubos fotomultiplicadores. O hodoscópio de RPC permitiu detectar muões atmosféricos individuais que atravessam o tanque e estudar a resposta deste em função de trajetórias muónicas seleccionadas [6].

A Figura 3 (direita) mostra o resultado da medição de muões com comprimento de trajetória na água do tanque entre [1.25, 1.95] m, *i.e.* com um ângulo zenital inferior a 50°. Em cada intervalo de comprimento das trajetórias seleccionadas, foi medida a distribuição de carga produzida à saída dos fotomultiplicadores pela luz de Cherenkov. Foi feito um ajuste para obter a posição do pico da distribuição, que é representada em unidades equivalentes à da carga de muões verticais (VEM). O resultado do mesmo procedimento aplicado à simulação do detector está também representado, assim como a razão entre simulação e dados no gráfico de baixo. O desvio relativo entre dados e simulação é sempre igual ou inferior a 2%. Os dados estão normalizados a um ponto da simulação. Uma medida do valor absoluto da carga de muões verticais usando este hodoscópio confirmou a validade da normalização da curva experimental, assim como do procedimento de calibração do sinal do detector de Cherenkov em unidades VEM.

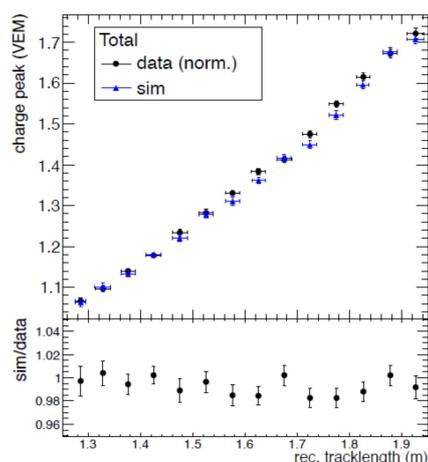


Figura 3. À esquerda, uma fotografia de um detector de Cherenkov de Auger usado para testes, junto do qual foram instaladas duas RPC em configuração de hodoscópio; à direita, o pico da distribuição de carga de muões em função do comprimento da sua trajetória dentro do detector de Cherenkov, comparando dados (preto) com simulação (azul) [6].

Na premissa razoável do tanque de testes ser representativo dos tanques no Observatório Pierre Auger, este resultado limita a 2% a incerteza sistemática associada à resposta do detector de superfície a muões com inclinações até 50°. A extensão desta curva para muões muito inclinados é, do ponto de vista experimental, mais desafiadora e encontra-se em curso.

O PROJECTO MARTA

A utilização em larga escala de RPC para medir a componente muónica de chuueiros atmosféricos extensos é o conceito do projecto MARTA (do inglês *Muon Array with RPCs for Tagging Air showers*) [7].

O conceito pressupõe a existência de um material com espessura suficiente para escudar os detectores RPC da componente electromagnética do chuueiro, de modo que possam ser

contados apenas os muões. A Figura 4 mostra uma implementação do conceito em que o escudo electromagnético é fornecido pela água de um tanque de Cherenkov de Auger. Debaixo de um tanque, suportado por uma estrutura própria de betão que fornece espessura de escudo adicional, encontram-se quatro RPC. Este conjunto perfaz uma estação MARTA e uma matriz gigante destas estações visa medir em simultâneo as componentes electromagnética e muónica de chuueiros de energias extremas, usando os dois detectores. A redundância deste sistema de detecção possibilita, adicionalmente, estabelecer calibrações cruzando os dados dos detectores.

Para fazer prova da aplicabilidade do conceito, está em desenvolvimento uma célula de MARTA para ser instalada no Observatório Pierre Auger, na forma de um hexágono com 750 m de lado e 1.46 km² de área, constituída por seis estações nos vértices e duas estações lado-a-lado no centro (ver a Figura 4).

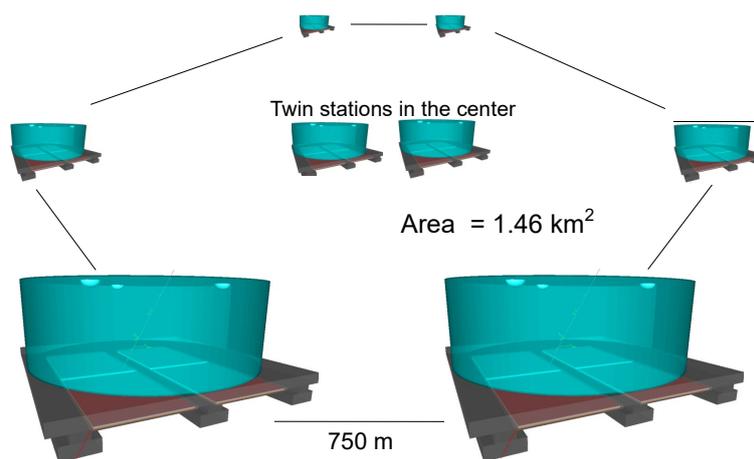


Figura 4. Um esquema de uma célula de MARTA com oito estações: seis estações formam um hexágono com 750 m de lado e 1.46 km² de área, no centro do qual se encontram duas estações.

Esta célula está dimensionada para medir chuueiros com energias no intervalo $[10^{17}, 10^{17.5}]$ eV, no qual a taxa de eventos esperada é da ordem dos milhares por mês.

Após a construção e a instalação das estações no terreno, a finalidade do projecto será a operação da célula com aquisição de dados e a análise dos mesmos usando as ferramentas e métodos de reconstrução de chuueiros. Os objectivos científicos desta fase do projecto são a determinação da distribuição lateral, do número e do espectro de energia de muões em chuueiros dentro do intervalo referido de energias do raio cósmico primário.

REFERÊNCIAS

- [1] The Pierre Auger Collaboration, The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 798, 172–213, 2015.
- [2] Laura Collica for the Pierre Auger Collaboration, Measurement of the muon content in air showers at the Pierre Auger Observatory, The 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, PoS(ICRC2015)336, 2015.
- [3] A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collaboration), Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Measurement of atmospheric production depth, Physical Review D 90, 012012, 2014.
- [4] A. Aab *et al.* (Pierre Auger Collaboration), Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Mean number in highly inclined events, Physical Review D 91, 032003, 2015.
- [5] L. Lopes *et al.*, Outdoor field experience with autonomous RPC based stations, Journal of Instrumentation 11, C09011, 2016.
- [6] Pedro Assis for the Pierre Auger Collaboration, Measurement of the water-Cherenkov detector response to inclined muons using an RPC, The 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, PoS(ICRC2015)620, 2015.

[7] R. Sarmiento *et al.*, Muon Array with RPCs for Tagging Air showers (MARTA), The 34th International Cosmic Ray Conference, The Hague, PoS(ICRC2015)629, 2015.

REACTOR ANTINEUTRINO OSCILLATIONS WITH THE SNO+ DETECTOR

Stefan-Alexandru Nae^{1,2}, for the SNO+ collaboration

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), Portugal

E-mail: stefan@lip.pt

² Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL), Portugal

Email: fc48951@alunos.fc.ul.pt

ABSTRACT

The discovery of neutrino oscillations is now leading to a precision phase for the oscillation parameters measurements. One goal of the SNO+ collaboration is to contribute to this effort with a combined three-flavour oscillations analysis [1]. SNO+ will detect reactor antineutrinos getting a clean oscillation pattern in the energy spectrum due to favourable distances between production position and the detector from three Canadian nuclear power plants located 240 and 340 kilometres away. This provides high sensitivity to the Δm_{21}^2 neutrino oscillation parameter, which is expected to improve the most recent existing measurement of $\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ [2]. Furthermore, a directional separation of the antineutrino signals from the different reactors will be studied for additional improvements of the parameter estimation and to the separation between geo-neutrinos and reactor antineutrinos.

1 INTRODUCTION

Located at SNOLAB, Sudbury, Canada at a depth of around 2 km underground, the SNO+ detector will soon be operational with the primary goal of searching for neutrinoless double beta decay ($0\nu 2\beta$). Among other physics goals, like the detection of low energy solar neutrinos and supernova neutrinos, the SNO+ collaboration is also interested in detection of antineutrinos from nuclear reactors. For these goals, the acrylic vessel (AV) of the SNO experiment will be used and filled with ~ 780 tonnes of liquid scintillator and will be further loaded with 0.5% natural tellurium (~ 1300 kg of ^{130}Te). The AV will be seen by ~ 9300 photo-multiplier tubes (PMTs). The cavity containing them will be filled with ultra-pure water. The Te-loading will give a sensitivity for $0\nu 2\beta$ of $t_{1/2} \geq 1.96 \cdot 10^{26}$ years (90% C.L.) after 5 years data taking.

The study of neutrinos produced in the Sun through nuclear fusion by the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) collaboration has shown that neutrinos change flavour; together with the results from the Super-Kamiokande (SK) collaboration on atmospheric neutrinos this led to the discovery of neutrino oscillations and the fact that neutrinos have masses [3, 4, 5]. The parameters of these process can also be studied with antineutrinos produced in fission at nuclear reactors. SNO+ will provide a second measurement using reactor antineutrinos, after KamLAND [2], for the Δm_{21}^2 oscillation parameter (see Section 2.2).

2 ANTINEUTRINO ANALYSIS

Antineutrinos will be detected in SNO+ through the inverse beta decay (IBD) reaction $\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$. The Feynman diagram for this process is shown in Figure 1. For a proton at rest, this reaction has a threshold of ~ 1.8 MeV for the minimum antineutrino energy in order to produce the final state, a positron and a neutron. Because reactor antineutrinos have energies below 10 MeV the other flavours into which the initial electron antineutrinos has oscillated do not have enough energy to produce their corresponding final states and are not detected. From kinematic requirements, the antineutrino energy is almost entirely transferred to the positron (Figure 2a) while the direction of the antineutrino is partially kept by the neutron (Figure 2b) [6].

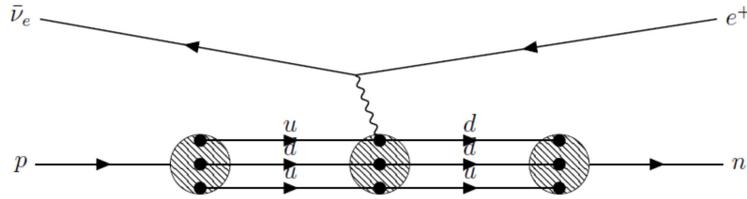


Figure 1. Feynman diagram for the IBD process.

The signature for IBD in the detector is a delayed coincidence between the prompt signal from positron annihilation and the delayed signal from neutron capture. The neutron is almost all the time captured by H and the resulting ${}^2\text{H}^*$ de-excites by emitting a ~ 2.2 MeV gamma. The time between the two signals, on average of $200 \mu\text{s}$, is correlated with the neutron thermalization time before capture while the distance between the signals, on average of 300 mm , corresponds mainly to the path traveled by the gammas from electron-positron annihilation and from nuclear de-excitation before scintillation light is emitted. The antineutrino energy is reconstructed from

$$E_{\bar{\nu}} \cong E + (m_n - m_p) - m_e. \quad (1)$$

These signals are characteristic for both reactor antineutrinos and geo-neutrinos interacting in the detector. Geo-neutrinos are electron antineutrinos produced during the decay chains of the naturally occurring radioactive nuclei ${}^{238}\text{U}$ and ${}^{232}\text{Th}$. There are also geo-neutrinos produced from ${}^{40}\text{K}$ but these have energies below the IBD threshold [7]. Geo-neutrinos have been measured before by Borexino and KamLAND, and SNO+ will make a third measurement providing further constraints for Earth composition models [8, 9].

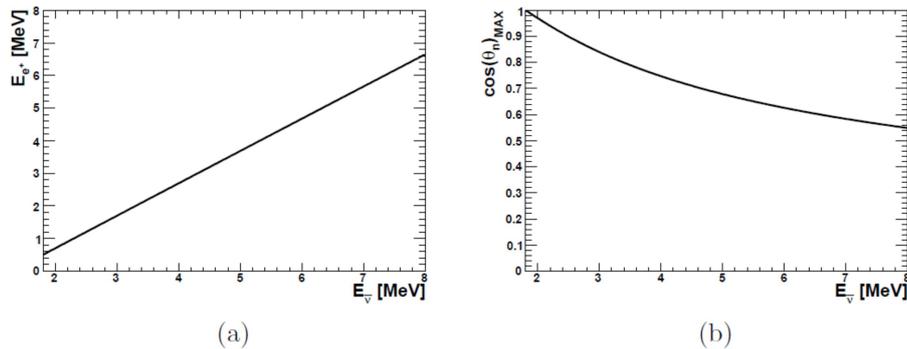


Figure 2. (a) The energy of the antineutrino is transferred primarily to the positron. (b) The angle between the (initial) antineutrino direction and the neutron direction is limited by the energy of the antineutrino. The cosine of this angle is limited from below, all the possible cosines will correspond to values above the plotted line.

2.1 BACKGROUNDS

The delayed coincidence with neutron capture allows for good antineutrino tagging with few backgrounds. The backgrounds with neutrons can be minimised by optimising the time and distance cuts for the events. These are neutrons from muons interacting inside or outside the detector, from ${}^{238}\text{U}$ fission, or from (γ, n) reactions [1]. An important background that mimics the IBD signal is a result of ${}^{210}\text{Po}$, accumulated in the AV from the daughters in the decay chain of ${}^{222}\text{Rn}$ during the time the detector was open, leaching from the AV into the detector. ${}^{210}\text{Po}$ in the ground state undergoes alpha decay 100% of the time. This alpha can generate a (α, n) reaction on the ${}^{13}\text{C}$ in the scintillator leading to the production of ${}^{16}\text{O}$. The alpha energy loss and, if excited, the gammas from ${}^{16}\text{O}$ de-excitation give a prompt signal followed by a correlated delayed signal from the neutron that is captured, a true coincidence that will mimic the IBD signal. If only the neutron from the (α, n) reaction will be detected the signal can be tagged as a fake coincidence with earlier, uncorrelated, events. The time profile of the charge collection from alpha energy deposition in the detector and the radial distribution of ${}^{210}\text{Po}$ in the detector scintillator volume will be studied for better separating this background.

2.2 OSCILLATIONS

Electron antineutrino oscillations from the cores of three nuclear reactors located 240 km and 340 km away from the detector will give clear patterns in the energy spectrum as shown in Figure 3. The expected number of antineutrino events is of 110 per year separated into 90 from reactors and 20 geo-neutrinos. The probability for electron antineutrinos of not changing flavour has the form in an approximate parametrization

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{ij}^2, L, E_{\bar{\nu}_e}) = \cos^4(\theta_{13})(1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_{\bar{\nu}_e}}\right)) + \sin^4(\theta_{13}) \quad (2)$$

with a dependence on the $\theta_{12} \cong 33.5^\circ$ and $\theta_{13} \cong 8.5^\circ$ neutrino mixing angles, and on $\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, constant parameters that have been measured before, and on the distance L between the production and detection sites, and on the energy $E_{\bar{\nu}_e}$ of the antineutrino [10].

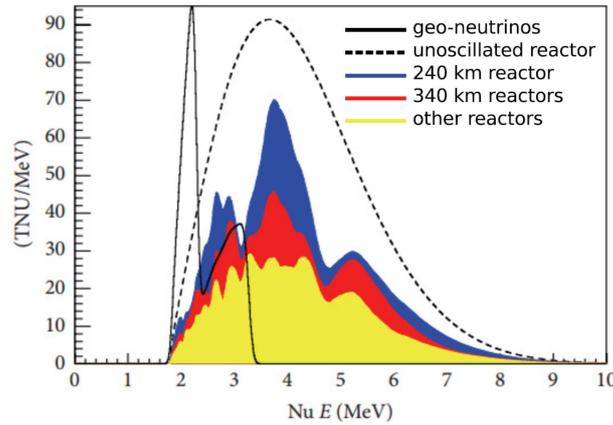


Figure 3. The energy spectrum of the expected antineutrino events in Terrestrial Neutrinos Units (TNU) (1 event / 10^{23} nuclei / year). Geo-neutrino spectrum is not to scale.

The sensitivity of the SNO+ detector for the Δm_{12}^2 measurement is $\pm 0.2 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ for 7 years of data taking, assuming 300 PMThits/MeV with a 5.5 m fiducial volume cut and considering antineutrinos with reconstructed energy above 3.5 MeV. This value will improve the current measurement of this parameter, but the experimental energy resolution will have a large impact as shown in Figure 4.

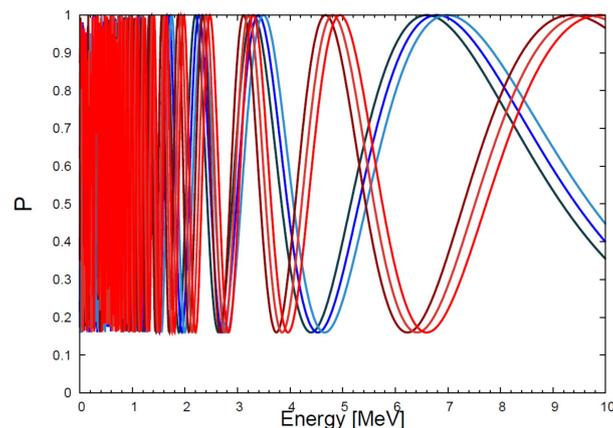


Figure 4. The antineutrino survival probability as a function of energy for detection 240 km (blue) and 340 km (red) away from the reactor core. The separate blue and red lines differ by $\pm 0.2 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ from $7.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ in the value of Δm_{12}^2 oscillation parameter corresponding to the central line.

Special care will be devoted to the reactor spectrum taking into account recent measurements from Daya Bay [11] and the different isotopic composition of the Canadian reactors. Directional separation of the signals between the different reactor sites, facilitated also by scheduled core

shutdowns, together with the measurement of geo-neutrinos with energies below 3.5 MeV will further improve the result.

3 CONCLUSIONS

SNO+ will provide a second measurement after KamLAND for the Δm_{21}^2 neutrino oscillation parameter using reactor antineutrinos matching the present precision. Directional analysis of antineutrino signals will be attempted for a better separation of reactor antineutrinos and geo-neutrinos signals. SNO+ will also provide a third measurement of the geo-neutrino flux.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), Portugal, through Research Project/Grant PTDC/FIS-NUC/0640/2014 and Research Scholarship PD/BD/114381/2016.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Andringa S., et al. (SNO+ collaboration), Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment, *Advances in High Energy Physics*, 2016, 6194250, 2016.
- [2] Gando A., et al. (KamLAND collaboration), Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND, *Physical Review D*, 88, 033001, 2013.
- [3] Fukuda Y. et al. (Super-Kamiokande collaboration), Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos, *Physical Review Letters*, 81, 1562, 1998.
- [4] Ahmad Q.R., et al. (SNO collaboration), Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory, *Physical Review Letters*, 87, 071301, 2001.
- [5] Ahmad Q.R., et al. (SNO collaboration), Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory, *Physical Review Letters*, 89, 011301, 2002.
- [6] Vogel P., Beacom J.F., Angular distribution of neutron inverse beta decay $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, *Physical Review D*, 60, 053003, 1999
- [7] Šrámek O., McDonough W.F., Learned J.G., Geoneutrinos, *Advances in High Energy Physics*, 2012, 34, 2012.
- [8] Bellini G., et al. (Borexino Collaboration), Observation of geo-neutrinos, *Physics Letters B*, 687, 299 - 304, 2010.
- [9] Baldoncini M., et al., Geoneutrinos and reactor antineutrinos at SNO+, *Journal of Physics: Conference Series*, 718, 062003, 2016.
- [10] Olive K.A., et al. (Particle Data Group), Review of Particle Physics, *Chinese Physics C*, 38, 090001, 2014.
- [11] An F.P., et al. (Daya Bay Collaboration), Improved Measurement of the Reactor Antineutrino Flux and Spectrum at Daya Bay, arXiv:1607.05378, 2016.

OPTICAL CALIBRATION OF THE SNO+ EXPERIMENT

Ana Inácio^{1,2}, on behalf of the SNO+ Collaboration

¹Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal

E-mail: ainacio@lip.pt

²Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Portugal

ABSTRACT

The physics goals of the SNO+ experiment, the main one being the search for neutrinoless double beta decay, require an uniform energy reconstruction across the large volume of the detector. This is achieved with a detailed calibration of the parameters describing the propagation of light in the several media (water/acrylic/scintillator) and its detection by the ~9300 photomultipliers. The calibration is performed using a light diffusing sphere (“laserball”) placed in different positions in the detector, and optical fibres fixed on the photomultipliers structure. A main calibration analysis tool is used to obtain the parameters that characterize the optical response of the detector, and other simpler tools have been created to validate its results.

1 INTRODUCTION

The SNO+ experiment main goal is to search for the very rare neutrinoless double-beta decay ($0\nu\beta\beta$) of the radioactive isotope Te-130 [1]. In order to search for this rare and low energy process, it is necessary to characterize and understand very well the response of the detector to the light that is created by the physics events.

The detector consists of ~9300 photomultipliers (PMTs), fixed in a geodesic sphere, facing inwards, with a 5 cm-thick vessel of acrylic inside (Figure 1). An event at the center of the detector will create light that will propagate in the medium inside the acrylic vessel (ultra-pure water in the first phase of the experiment and liquid scintillator in the second phase), cross the acrylic border and will travel through water until it is detected by the PMTs. In its path, light will suffer several perturbations, such as scattering, reflections, but most importantly it will be attenuated by the media. Besides, the collection of light by the PMTs will be strongly conditioned by their angular response, which is the combined relative efficiency of the photomultiplier tube and reflector assembly in collecting the light.

In scintillator experiments, light from the physics events is emitted isotropically, with the number of emitted photons proportional to the energy released, $N_{emitted} \propto E$. But because of all the optical effects changing the propagation and collection of light, the number of detected photons will not be the same as the emitted. This will affect the energy reconstruction process, inducing large uncertainties and affecting the capacity of identifying different events [2].

To ensure that the reconstructed energy has the precision necessary to separate the physics of interest of the SNO+ experiment from other signals (such as backgrounds), it is then necessary to correct the number of detected photons by the detector response to light, and this response is characterized by performing a detailed optical calibration.

2 THE OPTICAL CALIBRATION

The optical calibration is a complex process that obtains the parameters describing the propagation of light inside the detector and its collection by the PMTs. For that, two light sources are used (Figure 2): one is a light diffusing sphere [3], commonly called laserball, that is deployed inside the detector and emits light from a nitrogen laser plus dyes². It emits pulses of light with five possible wavelengths (337 nm, which is intrinsic of the nitrogen laser, 369 nm,

² Used to change the emitted wavelength.

385 nm, 420 nm, and 505 nm), and with a near-isotropic light distribution, that also needs to be characterized with the help of the optical calibration. There is also a fixed system of optical fibres that are used mainly to calibrate and monitor the PMTs but also to measure the scattering effects of light in the media.



Figure 1. The SNO+ detector. The outer 18 m diameter geodesic structure holds ~9300 inward-facing PMTs within a volume of highly purified water. The scintillator will fill the inner 12 m diameter acrylic vessel.

To extract the optical parameters, the calibration data is analysed using the SNO+ Optical Calibration Analysis Software (OCA) [2], designed for laserball data, and it uses as an input the PMT occupancies for different laserball positions. The occupancy is the number of hits detected by a PMT that correspond to direct light (does not include hits from late light, such as light coming from reflections).

The occupancy O_{ij} of a PMT j in a run i is related to the different optical parameters through the Optical Model, given by the expression:

$$O_{ij} = N_i \Omega_{ij} R_{ij} T_{ij} L_{ij} \varepsilon_j e^{-(d_{ij}^a \alpha_a + d_{ij}^b \alpha_b + d_{ij}^c \alpha_c)} \quad (1)$$

The different parameters of the model are defined as:

- N_i - number of photons emitted per pulse by the laserball in run i ;
- Ω_{ij} - solid angle from LB in run i by PMT j .
- R_{ij} - PMT and reflector assembly angular response;
- L_{ij} - laserball light distribution;
- T_{ij} - Fresnel transmission coefficients for the media interfaces;
- ε_j - absolute quantum efficiency of PMT j combining the overall PMT efficiency and electronic threshold. Also referred to as *quantum efficiency* (QE), which refers to the wavelength-dependent probability of registering a hit;
- $d_{ij}^{a,b,c}$ - light path lengths through the media;
- $\alpha_{a,b,c}$ - attenuation coefficients for the optical media;

The analysis calculates analytically the solid angle, the Fresnel transmission coefficients and the distances travelled by the light in the different media, and excludes the PMTs that are shadowed by some of the detector elements, such as the ropes that hold the acrylic vessel in place. After these steps, it performs a χ^2 fit that compares the measured occupancy with the one predicted by the model and gives as an output the laserball light distribution, the PMT angular responses and the media attenuation coefficients.

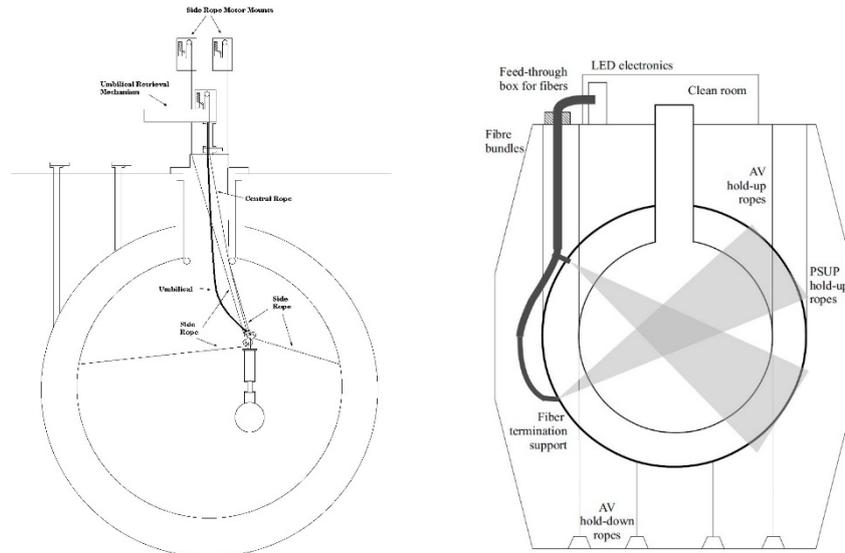


Figure 2. Cross sectional diagrams of the SNO+ detector. The left side shows the deployment of the laserball inside the acrylic vessel [3], and the right side shows the fibre system fixed on the PMT geodesic structure [4].

3 VALIDATION TOOLS FOR THE OPTICAL CALIBRATION ANALYSIS

One of the tools, called Diagonal Scan Analysis [7], extracts the attenuation coefficient of the medium inside the acrylic vessel using the laserball in diagonal positions. With this method, the ratio of occupancies of two PMTs from opposite sides of the diagonal will be given by the expression:

$$\frac{O_1}{O_2} = \frac{N_1 \Omega_1 R_1 T_1 L_1 \varepsilon_1}{N_2 \Omega_2 R_2 T_2 L_2 \varepsilon_2} e^{-(d_1^a - d_2^a) \alpha_a} \quad (2)$$

that varies exponentially with a slope equal to the attenuation coefficient of interest. The value is obtained after calculating the ratio for different laserball positions and fitting the results. To validate OCA, it is necessary to obtain the attenuation coefficient for the different wavelengths emitted by the laserball. These results, with water inside the acrylic vessel, are presented in Figure 3 by the red squares, along with the expected attenuation values, represented by the black line. The agreement between the two is clearly visible.

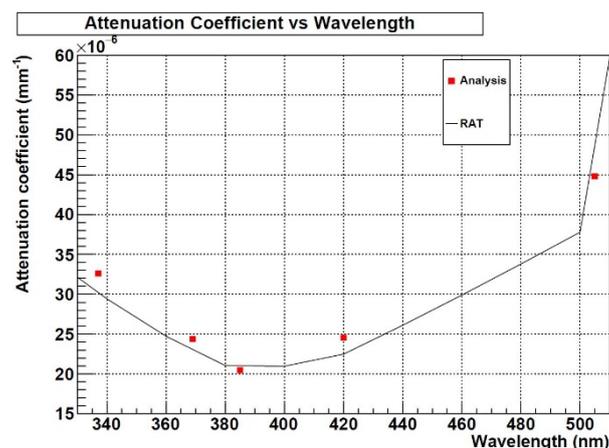


Figure 3. Attenuation coefficient for water in function of the wavelength of light. The black line represents the expected values and the red squares are the results from the analysis.

Another tool that was developed is called Laserball Asymmetry Analysis [8] and it extracts the laserball azimuthal asymmetry from the occupancy ratios of central flipped runs: runs with the laserball reference facing North over runs with the laserball reference facing South (N/S) and the same for West over East (W/E).

The azimuthal asymmetry can be characterized using a sinusoidal model [5] that divides $\cos(\theta_{LB})$ of the laserball into several slices, with different parameters for each of them. The division in θ_{LB} allows to break the dependency of the asymmetry from this angle. The sinusoidal function has the form:

$$H^k(\phi_{LB}) = 1 + A_k \sin(\phi_{LB} - \delta_k) \quad (3)$$

where A_k is the amplitude of the distribution and δ_k represents a phase shift in ϕ_{LB} for the k-th $\cos(\theta_{LB})$ slice. This method calculates the ratio of occupancies for each of the $\cos(\theta_{LB})$ slices (Figure 4) and fitting the results allows to obtain the parameters of the sinusoidal model in Equation 3. In the upcoming water phase, the results obtained with this tool could be used as an input to the OCA Software in order to reduce the number of free parameters in this analysis and, therefore, its complexity.

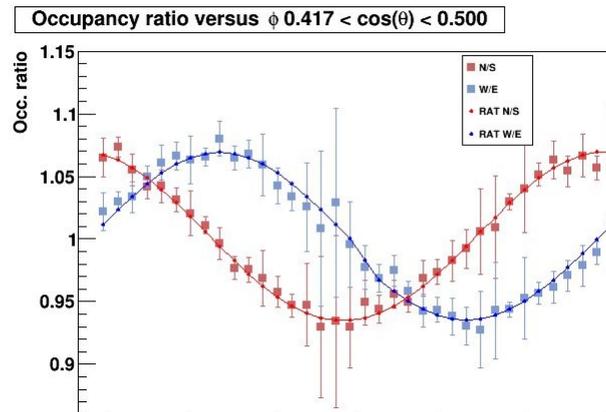


Figure 4. Occupancy ratios N/S (red squares) and W/E (blue squares) in function of the laserball polar angle ϕ . The red and blue lines represent the expected values for the N/S and W/E ratios, respectively.

4 CONCLUSION

The detection of light signals in the SNO+ experiment is strongly affected by the optical effects that change the propagation and collection of light by the detector, such as the media attenuation and the PMT angular responses.

The achievement of the experiment physics goal requires very precise energy reconstruction methods that depend on a detailed characterization of the detector response to light. To characterize it, a detailed optical calibration has to be performed, using the available light sources, such as the laserball and the fixed optical fibres.

Once SNO+ starts collecting calibration data, it will be analysed using the SNO+ Optical Calibration Software (OCA) that has been fully validated and tested with both old SNO calibration data and with Monte Carlo Data [6]. Besides, there are auxiliary tools ready to validate the OCA results and to act as fast tools to check the quality of the data from the calibrations.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was funded by Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT, Portugal) through a Research Grant within the project PTDC/FIS-NUC/0640/2014.

REFERENCES

- [1] S. Andringa et al., Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment. *Advances in High Energy Physics*, 6194250 (2016)
- [2] B.A. Moffat, The Optical Calibration of the Sudbury Neutrino Observatory. PhD Thesis, Queen's University (2001)

[3] B.A. Moffat et al., Optical calibration hardware for the Sudbury Neutrino Observatory. Nucl.Instrum.Meth. A554, 255-265 (2005)

[4] R. Alves et al., The calibration system for the photomultiplier array of the SNO+ experiment. Journal of Instrumentation (JINST) Vol. 10, P03002 (2015)

[5] O. Simard, Measurement of the Survival Probability and Determination of the Three-Flavour Neutrino Oscillation Parameters at the Sudbury Neutrino Observatory. PhD thesis, Ottawa-Carleton Institute for Physics, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada, 2009

[6] R. Stainforth, Characterising the Optical Response of the SNO+ Detector. PhD Thesis, Department of High Energy Particle Physics of the Faculty of Sciences and Engineering of the University of Liverpool (2016)

[7] A. S. Inacio, Diagonal Scan Analysis. SNO+ Internal Note, SNO+-doc-3749-v4 (2016)

[8] A. S. Inacio, Laserball Asymmetry Analysis. SNO+ Internal Note, in preparation

THE PHYSICS OF TRAFFIC IN URBAN AREAS AT A MACROSCOPIC SCALE

Sérgio Batista, Guilhem Mariotte, Ludovic Leclercq

Univ. Lyon, ENTPE, IFSTTAR, LICIT, France

E-mail: sergio_lipe.assuncao@entpe.fr

Email: guilhem.mariotte@i_star.fr

Email: ludovic.leclercq@entpe.fr

ABSTRACT

Over the past few years, the Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) has gained a lot of attention. The idea was firstly introduced by [1], but its mathematical formulation is recent [2]. Simulation [3] and experimental studies [4] have shown the capability of describing traffic physics at macroscopic scales.

[5] introduced the latest and most complete MFD simulator. Driven by its scientific challenges and limitations, we aim to develop a refined macroscopic simulation procedure, by tackling the calculation of path lengths and shortest path travel time; assignment/reassignment procedure; the problems with the entry flux management and macroscopic modeling framework. We will present the first layout of the simulator.

1 INTRODUCTION

The macroscopic simulation has gained more scientific interest during the last few years. This type of simulation is based on the concept of the Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) that was early introduced by [1]. The MFD is a relationship, $P(n)$, between two aggregate traffic variables: the travel production P (#vehicles.m/s), defined as the average circulating flow multiplied by the network total length; and the accumulation n , that is the number of circulating vehicles. It describes all traffic states (i.e., free-flow and congestion) within a large urban area, or “reservoir”. The MFD is an intrinsic property of the reservoir (i.e., does not depend on the demand). Experimental validation of the MFD is discussed by [4], where the authors showed a well-defined MFD using traffic data from Yokohama, in Japan. The MFD was also validated using simulation based studies [3].

The mathematical formulation of the MFD is introduced by [2]. Under the conditions of slowly varying demand and uniformly distributed congestion, [2] propose a flow conservation equation that describes the evolution of accumulation $n(t)$ over time t inside a single reservoir:

$$\frac{dn}{dt} = f(t) - g(t) \quad , t > 0 \quad (1)$$

where $n(t)$ (#vehicles) is the state variable; $f(t)$ (#vehicles/s) is the total flow or demand entering the reservoir; and $g(t)$ (#vehicles/s) is a non-negative exiting flow function. [2] discussed that the exiting flow function $g(t)$ depends on the accumulation $n(t)$ inside the reservoir: $g(t) \approx P(n(t))/L$, where L (m) is the average trip length. Despite its simplicity this model suffers a lack of a spatial definition. Thus, it may give meaningful travel times, when the demand changes rapidly (e.g. during congestion peaks).

[8] proposes a more realistic approach, which is based on the evolution of the mean speed $V(n(t))$, in the reservoir. According to Traffic Flow Theory, it can be shown that $V(n)$ is directly related to the production $P(n)$: $V(n) = P(n)/n$. He shows that the system dynamics can be entirely described by the intrinsic definition of the vehicle trip length $L = \bar{L}$ (the same for all travelers):

$$L = \int_{t-T(t)}^t V(n(s))ds \quad (2)$$

where $T(t)$ is the travel time of the vehicle exiting at t . From equation 2, we obtain another formulation of the exiting flow function, $g(t)$: $g(t) = f(t - T(t))V(n(t)/V(n(t - T(t))))$. But, solving the system dynamics in this framework is much harder than the one previously discussed [2]. This is because $n(t)$ is implicitly defined. Substituting the latter expression of $g(t)$ in equation 1, we obtain a delay differential equation with endogenous delay. This is a problem at the research frontier, in applied mathematics. Nevertheless, it is still possible to derive numerical discretization methods to solve this model (see e.g. [7]).

More generally, the idea of a macroscopic simulator, is to use a N -reservoir MFD modeling approach. It consists of dividing a large urban area into several reservoirs with well defined MFD, using clustering techniques [6]. Up to today,[5] proposed the more detailed multi-reservoir simulator and consists of an extension of the [2] model. But, it presents several limitations concerning: the definition of the choice set of alternatives; the calculation of the trip lengths; the assignment/reassignment procedure; and the problems we have previously discussed of the [2] model. Driven by these limitations, in this paper, we present the first layout of our macroscopic simulator. We identify and discuss the main scientific challenges that we will tackle. We also provide some hints on how we plan to address these questions.

This paper is organized as follows. In Sect.2, we introduce the layout of our proposed macroscopic simulator. In Sect.3, we discuss the main scientific challenges of our proposed macroscopic modeling framework and provide some hints to tackle them. In Sect.4, we outline the major scientific points of our simulator layout.

2 SIMULATOR LAYOUT

Our proposed macroscopic simulator layout is shown in Fig.1. It is composed by three main blocks. The first block of the simulator aims to generate a choice set of plausible alternatives per each Origin-Destination (OD) pair, given as input the network structure and the users OD matrix. As an output, this block gives the choice set of alternatives per each OD pair. The OD matrix is defined from data and corresponds to the demand traveling between the different OD pairs in the network. The network structure step consists on the setting of the different reservoirs, of the variables that define the MFD function and of the average trip length per each reservoir. The definition of the reservoirs depends on the OD matrix and is obtained using clustering methods (e.g., [6]). In general, the MFD function is defined by three parameters: the maximum concentration; the free-flow velocity; and the flow capacity. Both the MFD parameters and the average trip length should be calibrated directly either from data or preliminary studies using microscopic or mesoscopic simulations.

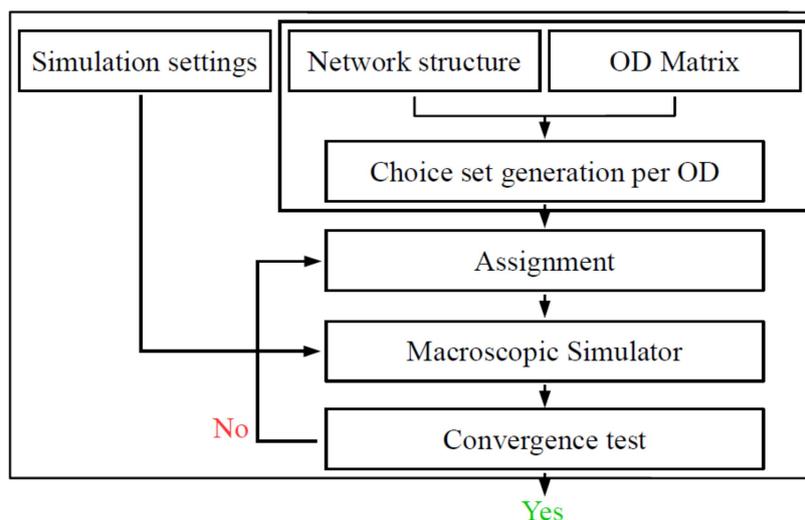


Figure 1: Macroscopic simulator layout.

The second block of the simulator aims to distribute the demand per the different alternatives listed in each choice set. The assignment procedure is done considering the users preferences and travel purposes, as well as information about the route travel times. The output consists of the assigned demand per route per OD pair. The third block consists of the macroscopic solver. As an input, this block considers the simulation settings (e.g., the total duration, the integration time step) and the outputs given in the two previous blocks. As an output, this blocks gives the accumulation in each reservoir and real travel times per each OD. For the convergence test, we can establish one of the Wardrop principles, which can be the User Equilibrium (UE) or the System Optimum (SO). Under UE conditions, all users aim to minimize their travel time. On the other hand, under SO conditions, the total travel time of the network is minimal. If the convergence criterium that we set is not verified, then we reassign the users and repeat the macroscopic simulator. This procedure is repeated until the convergence criterium is verified.

3 SCIENTIFIC CHALLENGES AND CONTRIBUTIONS

3.1 CHOICE SET GENERATION PER OD

The first scientific challenge that we face is connected to the choice of a model to generate the choice set per each OD pair. There are several approaches described in the literature that can be linked to the network topology (i.e., deterministic approaches) and/or consider the users preferences (i.e., stochastic approaches) [9]. We highlight the work of [10] that can give important insights on the route or reservoir based choices. Another important question is related to the calibration of the chosen model. A more challenging aspect is linked to the attractiveness and relevance of the listed routes in the choice sets, for the different users. We note that for the macroscopic simulation, we aim to keep track of the users preferences and purposes. And, thus a relevant choice set for the users is of crucial importance for the assignment/reassignment process and for the simulator computational performance.

3.2 ASSIGNMENT/REASSIGNMENT

The second scientific challenge concerns the assignment/reassignment of users. Indeed, modeling users behavior and response to the different alternative choices is quite challenging. The users choices concern their departure time, route and transportation mode for their travels. Usually, these problems are modeled separately. The most commonly used choice models are based on the Random Utility [11]. It assumes that users are utility maximizers or minimizers (i.e., they are perfect rational) and they perceive the different alternatives with uncertainty [9]. The uncertainty comes from the imperfect knowledge of the network topology and traffic states by the users. However, data observations show that users do not act with a perfect rationality when doing their choices ([13]). That is to say, users are bounded rational. Based on the original

works from [12], boundedly rational models have recently gained some attention [13]. But, boundedly rational models do not consider uncertainty in their formulations. As it is stressed out by [13] there is a lack of studies bridging together Random Utility and Bounded Rational based models. In this point, we plan to go further and propose an embedded framework where users are bounded rational and perceive the different alternatives with uncertainty.

More recently, [14] analyzed the performance of an embedded approach to solve route and mode choice problem, considering the users preferences for transportation mode. The flexibility of their approach allows to consider both homogeneous and heterogeneous of users preferences. [15] compare the approach of [14] with a bounded rational model under a satisfaction rule (also referred to as satisfaction level) [16]. [15] show that both approaches are able to provide similar flow patterns. In the first version of this macroscopic simulator, we will restrict ourselves to the users route and mode choice assignment. The methodologies aforementioned ideas provide important insights to solve an embedded route and more choice problem, considering either users preferences or that users are bounded rational. This allows us to consider the individual users preferences and purposes for their travels in our macroscopic simulator.

3.3 MACROSCOPIC SIMULATION

The last scientific challenge concerns the macroscopic solver which has to be easy to run with a low computational time and which must accurately represent flow exchange between reservoirs as well as traffic states in them. Some significant bias have already been highlighted in [17] for the single reservoir model, and first solutions have been proposed to mitigate them. Hence we aim to implement these solutions together with the model of [8] to a multi-reservoir system, which has never been done in the past. Another contribution will be the discussion about entrance flow management. When a reservoir becomes congested, an arbitrage needs indeed to be operated on all inflow demand to the congested reservoir. There exist models in the literature to account for this situation but this question has received few attention until now. Another major challenge is the proper definition of the trip length dynamically during simulation, [5] made a step in this direction but further research has to be done in this field as heterogeneity and variation in user trip length may have a strong impact on simulation results, (see [17]). All these elements in our simulator have moreover to be combined with MFD approaches that include multimodality.

4 OUTLINE

This paper provides a review of the main scientific challenges and contributions that we will face with the proposed macroscopic simulator. We discuss the importance of a relevant choice set of alternatives for the users. And, for the first time, we plan to couple a macroscopic model at N -reservoirs with an assignment/reassignment model that takes into account the users preferences and purposes for their displacements. Another goal will be to define multimodal equilibrium at a macroscopic scale. These outlines represent the main scientific contributions of this work.

ACKNOWLEDGMENTS

This project is supported by the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement No 646592 - MAGnUM project). S. F. A. Batista also acknowledges funding support by the region Auvergne-Rhône-Alpes (ARC7 Research Program).

REFERENCES

- [1] Godfrey, J. W. (1969), *Traffic Engineering and Control*, 11, 323-327, doi: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=117139>.
- [2] Daganzo, C. F. (2007), *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 49-62, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2006.03.001>.

- [3] Geroliminis, N. and Daganzo, C. F. (2007), In Transportation Research Board 86th Annual Meeting, 07-0413. Washington DC, doi: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=801089>.
- [4] Geroliminis, N. and Daganzo, C. F. (2008), Transportation Research Part B: Methodological, 9, 759-770, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>.
- [5] Yildirimoglu, M. and Geroliminis, N. (2014), Transportation Research Part B: Methodological, 70, 186-200, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2014.09.002>.
- [6] Ji, Y. & Geroliminis, N. (2012), Transportation Research Part B: Methodological, 46, 1639-1656, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2012.08.005>.
- [7] Mariotte, G., Leclercq, L. and Laval, J. A. (in prep.), Dual expression of macroscopic urban models: Analytical and numerical investigations with piece wise linear functions, submitted to TRB 2017 conference.
- [8] Arnott, R. (2013), Journal of Urban Economics, 76, 110-121, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jue.2013.01.001>
- [9] Prato, C. G. (2009), Journal of Choice Modelling, 2, 65-100, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1755-5345\(13\)70005-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1755-5345(13)70005-8).
- [10] Manley, E. J., Orr, S. W. and Cheng, T. (2015), Transportation Research Part C, 56, 195-209, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.020>.
- [11] McFadden, D. (1978), Spatial Interaction Theory and Planning Models, chap. Modelling the choice of residential location. Elsevier North-Holland, Netherlands, 75-96.
- [12] Simon, H. A. (1966), Theories of Decision-Making in Economics and Behavioural Science. Palgrave Macmillan UK, London, ISBN 978-1-349-00210-8, 1-28, doi:http://dx.doi.org/10.1007/978-1-349-00210-8_1.
- [13] Di, X. & Liu, H. X. (2016), Transportation Research Part B: Methodological, 85, 142-179, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2016.01.002>.
- [14] Batista, S. F. A. & Leclercq, L. (in prep.), Route choice modelling combining link cost uncertainties and individual users preferences, submitted to Journal of Choice Modelling.
- [15] Batista, S. F. A., Zhao, C.-L. and Leclercq, L. (in prep.), User preferences in assignment models: a comparison between the bounded rational approach and utility functions with error sampling, submitted to TRB2017 conference.
- [16] Zhao, C.-L. & Huang, H.-J. (2016), Experiment of boundedly rational route choice behavior and the model under satisficing rule. Transportation Research Part C, 68, 22-37, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.03.006>.
- [17] Mariotte, G. & Leclercq, L. (2016), Impact of the demand-supply distribution and the trip length choice on MFD-based traffic modeling, TFT Summer Meeting.

ISTTOK EQUILIBRUM RECONSTRUCTION IMPLEMENTED TOWARDS REAL TIME CONTROL

D. Corona¹, H. Fernandes¹, N. Cruz¹, J. Herrera², P.Lourenço¹, B. Carvalho¹, H. Figueiredo¹

¹ Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal.

lilia.rivera@tecnico.ulisboa.pt

² Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, 70-543, Ciudad Universitaria, 04511 México, D.F. México.

ABSTRACT

The plasma current position and shape are vital for obtaining advance performance tokamak operation. State-Space model reconstruction was derived from inputs and outputs vectors in order to proposed an optimal control of plasma position. Grad-Shafranov simplest approximation was made for ISTTOK Tokamak for a future model including the electric parameters of the control actuators and the MHD equilibrium. These results can be used for the production of a real-time Generic Application Module (GAM) to be executed on the ISTTOK MARTe real-time controller, with the GAM output will be possible to control plasma position obtained from Mirnov coils, by using the ISTTOK magnetic system composed by a set of three poloidal field coil systems which control the plasma parameters through the current on them.

1 BASIC CONCEPTS

In a tokamak, the plasma is confined by the action of the electromagnetic forces which balance the internal kinetic pressure. The dynamics of the quantities of interest for position and shape control in a tokamak are governed by the ideal magnetohydrodynamics theory, related to the equilibrium described in Grad-Shafranov equation. See [6]

In general, two different problems must be solved to achieve a toroidal equilibrium. The first involves radial pressure balance, because the hot core of the plasma tends to expand radially outward along the minor radius. In a tokamak configuration this pressure is balanced by the forces produced by an externally generated toroidal magnetic field and by passing a toroidal current through the plasma itself. Indeed, by using the plasma as secondary winding of a transformer, a plasma current I_p and the related poloidal magnetic field are generated, allowing an electromagnetic external control.

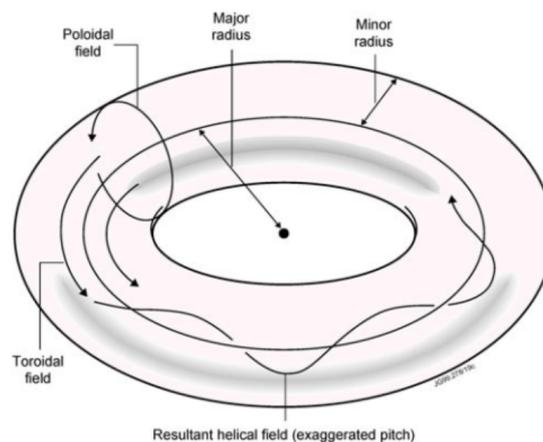


Figure 1: Description of toroidal and poloidal components of the magnetic field used in a tokamak to counteract the plasma pressure [8]

The second problem involves toroidal force balance, because the toroidicity generates a force that tends to expand the plasma outward along the major radius. In this case an externally

applied vertical field is required to balance the forces. This vertical field is generated by the poloidal field (PF) coils, as seen in fig.1 This additional poloidal field is used both to achieve the desired plasma equilibrium and to control the plasma shape and position. See [5].

2 EQUILIBIRUM RECONSTRUCTION

For determine the MHD equilibrium in ISTTOK , Solovev approximation will be used, taking as a reference the work done in Tokamak IR-T1[9]. Grad-Shafranov equation, equilibrium in ideal magnetohydrodynamics (MHD) for a two dimensional plasma is shown next [6].

$$\left(R \frac{\delta}{\delta R} \frac{1}{R} \frac{\delta}{\delta R} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}\right) \psi + \mu_0 R^2 \frac{dp(\psi)}{d\psi} + \frac{dI(\psi)^2}{d\psi} = 0 . \quad (1)$$

First approximation is to re-write part of Grad Shafranov equation (eq. 1) in the next form, where A_1 is a constant.

$$\mu_0 \frac{dp(\psi)}{d\psi} = -A_1$$

and

$$\frac{dI(\psi)^2}{d\psi} = 0$$

This equations show a linear approximation for $p(\psi)$ and $I(\psi)$. These considerations reduce Grad- Shafranov eq. to the form:

$$\left(R \frac{\delta}{\delta R} \frac{1}{R} \frac{\delta}{\delta R} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}\right) \psi = R^2 A_1 , \quad (2)$$

which is already able to be solved in a analytic way like separation of variables.

The no homogeneous solution of (2) is:

$$\psi(R, z) = \psi_0 + \frac{A_1}{8} R^4 ,$$

where, ψ_0 is the solution of the equation:

$$\left(R \frac{\delta}{\delta R} \frac{1}{R} \frac{\delta}{\delta R} + \frac{\delta^2}{\delta z^2}\right) \psi = 0 .$$

Performing the simplest solution for the no homogenous equation, took it from [9], the total ψ function is:

$$\psi = c_1 + c_2 R^2 + c_3 (R^4 - 4R^2 z^2) + c_4 (R^2 \ln(R) - z^2) + \frac{A_1}{8} R^4 \quad (3)$$

From the geometrical boundary conditions it is possible to determine the coefficients from eq.3. For ISTTOK parameters, this gives the following ψ equation:

$$\psi = I_p \mu_0 (12.0192 R^4 - 1088378 (R^2 \ln(R) - z^2) - 4.12557 R^2 - 3.75826 (R^4 - 4R^2 z^2) + 0.156967)$$

In fig.2 the contour plot of function $\psi(R, z)$ for a plasma current of 4[kA] is shown. The Shafranov shift can be obtained from the equation:

$$\frac{d\psi(R_0)}{dR} = 0 .$$

The Shafranov shift for this approximation and for ISTTOK parameters is $\Delta R = 0.9677$ [cm]. In fig.2 is possible to see the center of the strongest surface moved to the right at a point equal to the Shafranov shift. From the Grad-Shafranov approximation is possible to obtain the magnetic fields, by substitution of the $\psi(R, z)$ function on them. The relation between the flux function ψ and the components of magnetic field, considering axisymmetry are:

$$RB_R = -\delta\psi/\delta z$$

$$RB_z = -\delta\psi/\delta R z$$

The poloidal magnetic field ($B_p = B_R + B_z$) remain:

$$B_z = \frac{I_p \mu_0 (-15.0925(4R^3 - 8Rz^2) + 19.953R^3 - 11.0678R.86637(R + 2R1 (R)))}{R}$$

$$B_R = \frac{I_p \mu_0 (30.0661R^2 z + 3.7675)}{R}$$

2.1 STATE-SPACE MODEL

State-space models are models that use state variables to describe a system by a set of first-order differential or difference equations, rather than by one or more nth-order differential or difference equations.[3] State-space models are represented by a couple of matrix equations that make a relation between the states, the inputs and the outputs of the system.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + DBu$$

- ▶ A state or system matrix
- ▶ B input matrix
- ▶ C output matrix
- ▶ D feedforward matrix
- ▶ x states vector
- ▶ y outputs vector
- ▶ u inputs vector

The simpler models consider the plasma as a filament or non-deformable matrix of conducting filaments. The more complex models include nonlinear codes, which permit the simulation of nonlinear behaviors such as large vertical position displacements.

3 ISTTOK TOKAMAK

ISTTOK has a set of 12 Mirnov coils for real-time control. The magnetic probes are positioned inside the vacuum chamber and they are oriented in order to measure the poloidal field created by the plasma current, so the coil wiring is in the poloidal direction (each coil has 50 turns with an area of 25 [mm²]).(Fig.3)

Mirnov Coils Calibration

- Shot 40387 - hole 1
- Shot 40388 - hole 0
- Shot 40389 - hole 2
- Shot 40392 - hole 4
- Shot 40393 - hole 3
- Shot 40394 - hole 5
- Shot 40397 - hole 7
- Shot 40398 - hole 6
- Shot 40399 - hole 8

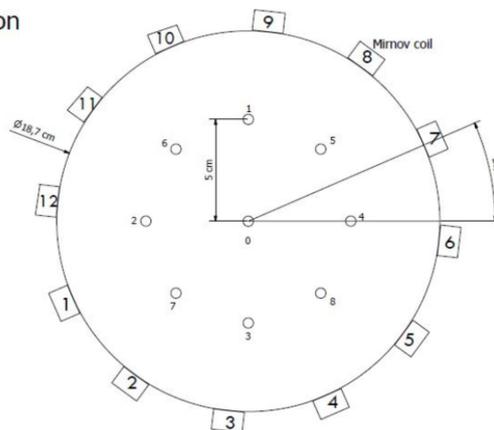


Figure 3: Mirnov coils scheme for calibration method used in order to probe an accurate measure and the corresponding discharge related to the current in each gap

3.1 POSITION RECONSTRUCTION

Plasma position reconstruction for shot #40375 is shown in fig.4. This shot was made for a configuration without control, which means the PID controllers were disabled, in order to analyze the plasma behavior in a open loop system.

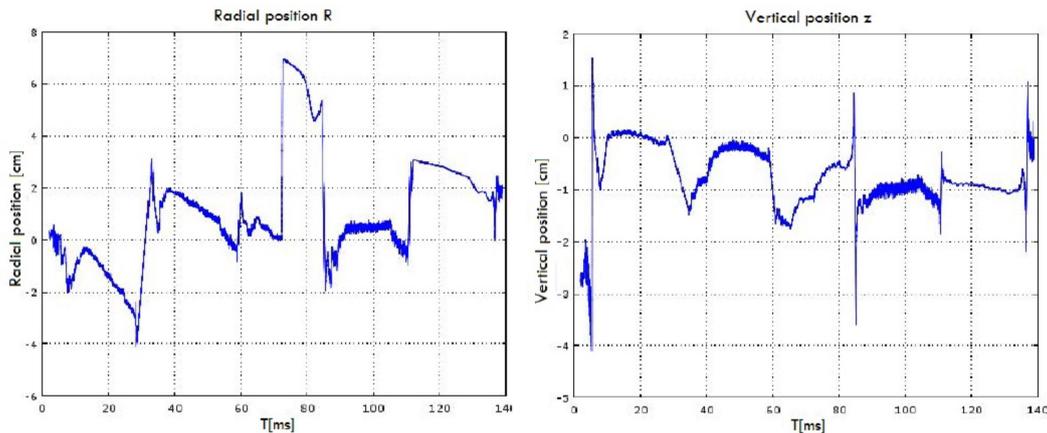


Figure 4: Radial and vertical plasma positions reconstruction from Mirnov coils (shot #40375)

3.2 CONTROL SYSTEM

The ISTTOK poloidal control system is formed by 3 poloidal magnetic field coils called **Primary**, **Vertical** and **Horizontal**. (See fig.5) The ISTTOK real-time control system was programmed in C++ on top of the Multi-threaded Application Real-Time executor (MARTe). MARTe is responsible for creating one or more real-time threads, each of these threads runs a sequence of code blocks named generic application module (GAM) each control cycle, one of these GAMS is the responsible to do the feedback PID control for the plasma position.

When the mathematical model of the plant is not known and therefore analytical design methods cannot be used, PID controls prove to be most useful. In the field of process control systems, it is well known that the basic and modified PID control schemes have proved their usefulness in providing satisfactory control, although in many given situations they may not provide optimal control. See [7].

4 OPTIMAL CONTROL LQR

To improve the ISTTOK control system, a linear quadratic regulator (LQR) is proposed, this well-known design technique provides practical feedback gains. For the derivation of the linear quadratic regulator, we assume the plant to be written in state-space form and the dynamics of the closed loop system are then written as:

$$\dot{x} = (A - BK)x + BKx_{eq}$$

For design of the control two matrix are proposed, both Q and R are positive definite, Q is related with the penalties in time and transient response and R with the inputs. The values of these matrix should be substitute into the Riccati equation for LQR design [2]. This equation is the matrix algebraic Riccati equation, whose solution P is needed to compute the optimal feedback gain K.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0$$

The LQR generates a static gain matrix K, which is not a dynamical system. Hence, the order of the closed-loop system is the same as that of the plant. The optimal control must always stabilize the closed-loop system, however, so there should be some account made for unstable plant poles. MatLab provides the solution of the gain K with the command "lqr" using as inputs the system matrix, Q and R.

5 CONCLUSIONS

Through Plasma equilibrium reconstruction, electrical properties from Poloidal Field Coils (Primary, Vertical and Horizontal) must be measured in order to proposed a state-space model for ISTTOK like reported in previous work at TCV. [4]

Controller GAM working in ISTTOK through PID controllers for each coil system, should be replaced for a GAM with an Optimal Control in order to compare the results in control position.

REFERENCES

- [1] Carvalho, I. Real-time control for long ohmic alternate current discharges, PhD Thesis, Universidade de Lisboa, 2013.
- [2] Chaoiki, A. Linear quadratic Control, An Introduction, Prentice-Hall. 1995.
- [3] Chen, C. Linear System Theory and Design, Oxford University Press 1999.
- [4] Cruz, N. An optimal real-time controller for vertical plasma stabilization IEEE Transactions on Nuclear Science, 62, 2015.
- [5] De Tomassi, G. CURRENT, POSITION, AND SHAPE CONTROL IN TOKAMAKS FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY, 59, 2010.
- [6] Miyamoto, K. Controlled fusion and plasma physics, Taylor & Francis 2007.
- [7] Ogata, K. Modern Control Engineering Prentice-Hall, 2002.
- [8] Pironti, A. Magnetic Control of Tokamak Plasmas, Springer. 2008.
- [9] Rahimirad, A. , Emami, M. Demonstration of Shafranov Shift by the Simplest Grad-Shafranov Equation Solution in IR-T1 Tokamak, Journal of Fusion Energy, 29, 73-75, 2010.

VASCULAR GROWTH IN TUMOR ANGIOGENESIS: A MATHEMATICAL MODEL IN THREE DIMENSIONS

Rita Coimbra¹, Maurício Moreira-Soares^{1,2}, João Carvalho^{1,2}, Rui Travasso^{1,2}

¹ Centro de Física da Universidade de Coimbra (CfisUC), Portugal.

E-mail: ritacoimbra22@gmail.com, mmoreirauc@gmail.com

² Departamento de Física da Universidade de Coimbra, Portugal.

E-mail: rui.travasso@gmail.com, joaoelcarvalho@gmail.com

ABSTRACT

Cancer is among the leading causes of death worldwide [1]. Sprouting angiogenesis, the process by which new blood vessels grow from existing ones, is crucial in growth of solid tumors. In response to a pro-angiogenic factor such as the Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF), the endothelial cells of the vessel sprout can adopt either a migratory or a proliferating phenotype. In this work we use a multi-scale phase field model of vessel growth in 3D coupled with blood flow [2,3] to discuss the role of irrigation and the endothelial cells' chemotactic response and proliferation rate as key factors in determining the morphology of vascular networks.

1. BIOLOGICAL DESCRIPTION

Sprouting angiogenesis, the process by which new vessels grow from existing ones, occurs throughout life and is present in both health and disease, from embryo development to wound healing, from diabetic retinopathy to tumor growth.

The tissue cells in hypoxia (privation of oxygen) produce growth factors such as the Vascular Endothelial Growth Factor (VEGF), which are able to determine the phenotype of Endothelial Cells (EC). The Tip Endothelial Cells (TEC) are the leading cells of the every growing vessel sprout, they sense their environment and migrate toward the VEGF source. Stalk Endothelial Cells (SEC) follow behind the tip (See Figure 1) and have a more proliferative phenotype. New sprouts branch at multiple stages to form a new vascular network, delivering nutrients and oxygen to the tumor.

The antiangiogenic therapy, with balancing between pro and antiangiogenic agents, can induce a more structurally and functionally normal tumor vasculature, making the delivery of drugs (provided by chemotherapy) and the delivery of oxygen (that enhances the efficiency of radiation therapy) more efficient. So, studying sprouting angiogenesis and tumor growth can be crucial for cancer therapy.

2. MATHEMATICAL MODEL

In this work we used a phase-field model formalism, which is a mathematical model designed for obtaining the dynamics of moving boundaries. Originally it was applied to phase separation in metals but presently it has been used in from phase separation of fluids or solids to tumor growth (See Figure 2). A phase field ϕ takes the role of an order parameter that distinguishes between the two-phases, taking the value +1 inside the capillary, and -1 outside. The smooth change between the two phases, the diffuse interface, has a finite thickness.

We use an hybrid model proposed in Travasso et al. [2] to study the coupled dynamics of tumor growth and sprouting angiogenesis, which combines a continuum physics description of the capillary-tissue interface dynamics with an individualized description of the migrating TEC. The model introduces a tumor angiogenic factor T (a balance between pro and anti angiogenic factors) produced by the hypoxic cells, that diffuses in the tissue and is consumed by the endothelial cells. These proliferate in the presence of the angiogenic factor, and the TEC moves

according with the gradient of T . In the 3D implementation [3] we add the mechanical interaction between the endothelial and hypoxic cells. Below is a quick guide to equations used.

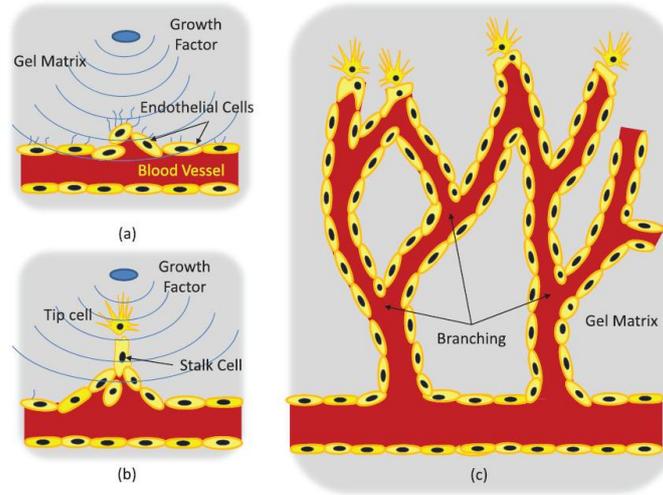


Figure 1. Sprouting Angiogenesis. (a) EC sprout in response to a chemotactic stimulus. (b) The TEC senses gradients of Vascular Endothelial Growth Factors (VEGF) and migrates toward the source while SEC follows behind the tip. (c) New sprouts branch at multiple stages to form a new vascular network. From BioSyM Research [4].

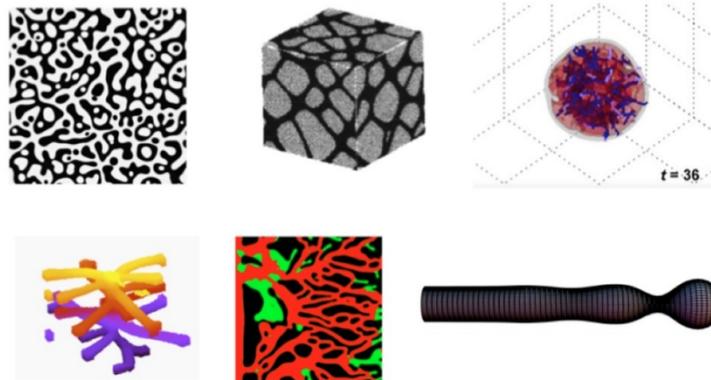


Figure 2. Examples of phase-field models. From the top left corner and clockwise we have the phase separation of fluids [5], the separation of two solids with elastic effects [6], tumor growth in 3D [7,8], the shape of a membrane considering the curvature energy [9], and two examples of vascular growth in 2D and in 3D [2,3].

Equation 1 - The diffusion of angiogenic factors T in the tissue and consumption by EC's:

$$\partial_t T = D \nabla^2 T - \alpha_T \phi T \Theta(\phi)$$

where D is the diffusion constant, T is the consumption rate, $\Theta(x)$ is the Heaviside step function and ϕ is the order parameter introduced above.

Equation 2 - The EC-ECM (ExtraCellular Matrix) interface dynamics, stalk cell proliferation and the hypoxic cells (as an excluded volume) within the phase-field formalism:

$$\partial_t \phi = M \nabla^2 [\phi^3 - \phi - \varepsilon^2 \nabla^2 \phi + \gamma (\phi^2 - 1)(\eta - 2)(\eta + 1)^2] + \alpha_p(T) \phi \Theta(\phi)$$

where M is the mobility coefficient, ϕ and η are the order parameters that represent the endothelial and the hypoxic cells, respectively, γ is the parameter regulating the interaction between vessels and hypoxic tissue, $\alpha_p(T)$ is the proliferation rate (a function of T) and ε is the interface width.

Equation 3 - The migration of the tip cells with velocity v (proportional to the gradient of the angiogenic factor $G \equiv |\nabla T|$):

$$v = \chi \nabla T \left[1 + \left(\frac{G_M}{G} - 1 \right) \Theta(G - G_M) \right]$$

where χ is the chemotactic response of TEC and G_M is their maximum velocity.

Equation 4 - To merge the tip cell and capillary dynamics, we relate the value of the order parameter inside the tip cell ϕ_c with the proliferation rate $\alpha_p(T)$ and the chemotactic response of the cells χ , through:

$$\phi_c = \frac{\alpha_p(T) \phi R_c}{2|v|}$$

where R_c is the radius of an EC.

3. RESULTS AND DISCUSSION

We study the competing effects of tip cell velocity and stalk cell's proliferation rate on the final morphology of the capillary network. For each case we measure the number of branches and the average vessel diameter (See Figure 3 and 5) and show the capillary network morphologies for extreme values of the parameters (See Figure 4 and 6). We use in vivo parameters for the 3D simulation whenever possible (See [3] for all parameter values).

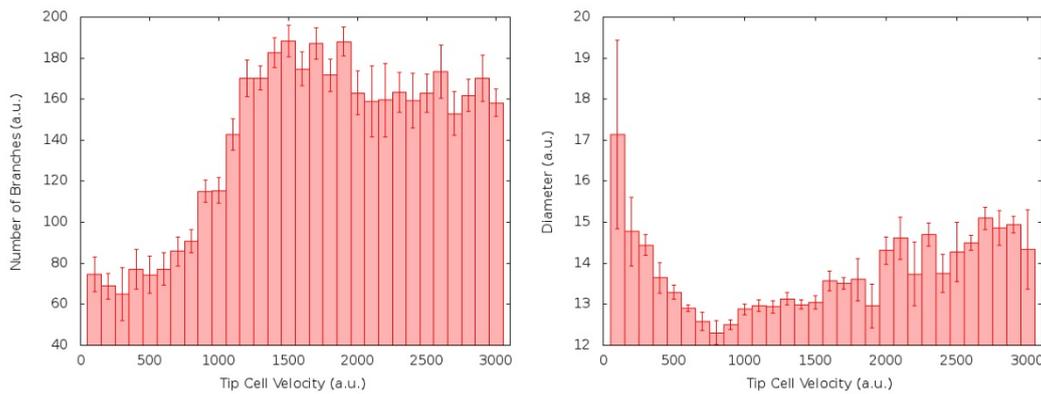


Figure 3. Capillary network and the tip cell's velocity. Branch density (left) and vessel diameter (right) as a function of tip cell maximum velocity. Vessel thickness has a non-monotonous dependence on the tip cell velocity. Increasing tip cell velocity leads to a higher occurrence of branching points.

The results obtained are in accordance with the expected biological behavior for angiogenesis. The final capillary morphology is controlled by tuning both parameters, which are functions of the tissue chemical and physical environment.

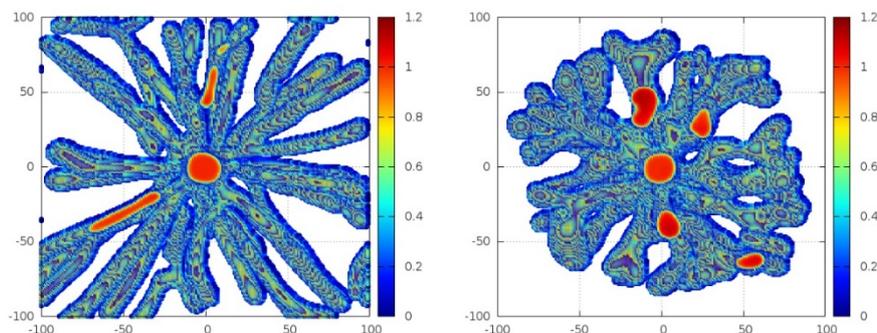


Figure 4. Capillary network morphologies in 2D obtained for low (left) and high (right) tip cell velocities (respectively $\chi = 700$ and $\chi = 2000$). Proliferation rate kept constant at $\alpha_p = 1.0$.

Vessel thickness has a non-monotonous dependence on the tip cell velocity and increasing tip cell velocity leads to a higher occurrence of branching points. Increasing the proliferation rate results in thicker vessels and a higher occurrence of branching points.

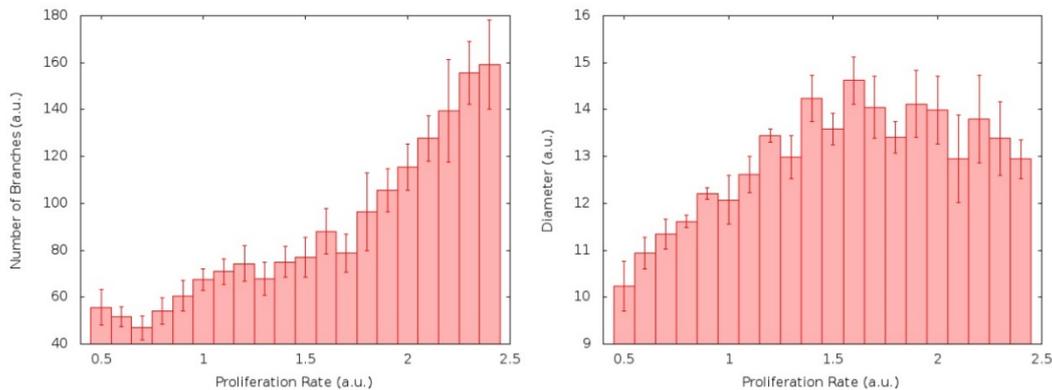


Figure 5. Capillary network and the stalk cell's proliferation rate. Branch density (left) and vessel diameter (right) as a function of the maximum proliferation rate. Increasing the proliferation rate results in thicker vessels and a higher occurrence of branching points.

Currently we are analyzing the simulations involving the coupling of the blood flow with the hypoxic tissue regulation, with promising results. These on-going simulations show more organized vascular networks. The study of the incorporation of blood flow in the vascular network is crucial to understand the delivery of chemotherapeutic drugs to the tumour and of anti-angiogenesis drugs to normalize the tumor vasculature.

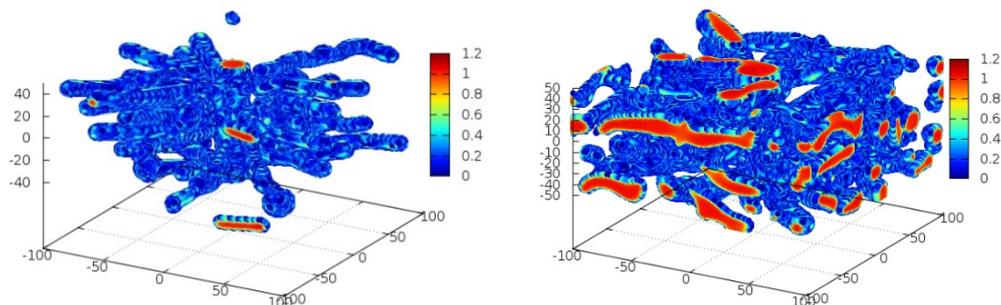


Figure 6: Capillary network morphologies obtained for low (left) and high (right) proliferation rates (respectively $\alpha_p = 0.5$ and $\alpha_p = 2.3$). Tip cell velocity keep constant at $\chi = 800$.

ACKNOWLEDGMENTS

MMS thanks the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for financial support, and RT thanks FCT for support through the Investigador FCT program.

REFERÊNCIAS

- [1] Bernard W. Stewart and Christopher P. Wild, World Cancer Report 2014..
- [2] Travasso R.D.M., Poiré E.C., Castro M., Rodríguez-Manzaneque J.C., Hernández- Machado A., PLoS ONE 6, e19989 (2011).
- [3] Moreira M., Coupling blood flow and growing vasculature in three dimensions, Dissertation (Master Degree in Physics), Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.
- [4] BioSyM Research, <http://web.mit.edu/smart/research/biosym/BioSyM-Research-Thrust%203-Archives.html>.
- [5] Fielding, S.M., Phy. Rev. E 77, 021504 (2008).

[6] Saguí C., Soxnoza A.M., and Desai R.C., Phys. Rev. E 50, 4865 (1994).

[7] Wise S., Lowengrub J., Frieboes H., Cristini V., J. Theor. Biol. 253, 524-543 (2008).

[8] Frieboes H.B., Jin F., Chuang Y.-L., Wise S.M., Lowengrub J.S., and Cristini V., J Theor Biol. 264(4), 1254-1278 (2010).

[9] Campelo F. and Hernández-Machado A., Phys. Rev. Lett. 99, 088101 (2007).

ESCOAMENTOS NÃO NEWTONIANOS NA BIFURCAÇÃO DA AORTA ABDOMINAL

José Lameira¹, Armando A. Soares^{2,3}, L. Caramelo²

¹ Dep. de Engenharias-ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: zelameira@gmail.com

² Dep. de Física-ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: asoares@utad.pt, lcaramel@utad.pt

³ Ciener-INEGI/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

RESUMO

São apresentados os resultados numéricos do estudo da influência dos efeitos não newtoniano da viscosidade sanguínea nas variáveis hemodinâmicas (velocidade, pressão e tensões de corte nas paredes) num modelo da bifurcação da aorta abdominal para um paciente real. Os modelos da viscosidade do sangue estudados (newtoniano, Carreau e Walburn-Schneck) foram justados às características sanguíneas do paciente. A quantificação dos efeitos não newtonianos é obtida através da normalização das variáveis estudadas ao caso newtoniano.

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho usou-se o *software Fluent* para fazer as simulações computacionais da hemodinâmica. Este *software* é frequentemente usado na simulação Computacional da Dinâmica dos Fluidos, sendo frequentemente usado na procura de soluções para problemas que envolvam o escoamento de mais diversos tipos de fluidos. As equações governativas são escritas na forma algébrica e discretizadas pelo método dos volumes finitos. O domínio computacional é dividido em pequenos volumes de controlo que definem as células que constituem a malha computacional. As equações governativas são integradas para cada um dos volumes de controlo, resultando num sistema de equações algébricas para as variáveis dependentes discretas (tais como a pressão e velocidade) que são resolvidas numericamente até que o critério de convergência estipulado pelo utilizador seja atingido. As malhas utilizadas no presente estudo foram geradas de modo a obter uma malha mais fina junto das paredes da artéria. Nas simulações da hemodinâmica considerou-se os escoamentos estacionários em regime laminar e o sangue como sendo um fluido incompressível com comportamentos descritos por três modelos da viscosidade um newtoniano e dois não newtonianos. As simulações realizaram-se para uma velocidade característica de um ciclo cardíaco do paciente estudado. Na discretização das equações da conservação da quantidade de movimento escolheu-se o esquema *upwind* de segunda ordem. Para a interpolação da pressão recorreu-se ao esquema *Standard*. Já para o acoplamento entre a pressão e velocidade nas equações de Navier-Stokes utilizou-se o algoritmo SIMPLE e para a linearização das equações recorreu-se ao método implícito.

É do conhecimento geral que o sangue comporta-se como um fluido newtoniano quando sujeito a taxas de corte acima do seu valor limite, identificado na literatura com o valor típico de $\sim 100\text{-}200\text{ s}^{-1}$ [1-3]. Este limite aparente de viscosidade ou taxa de corte é função da composição do sangue, e numa primeira aproximação modulada pelos hematócritos. Alguns autores (e.g. [4]) utilizam $0,0035\text{ Pa}\cdot\text{s}$ como valor médio da viscosidade do sangue humano. Por outro lado, em estudos mais recentes, foram também tomadas em conta as interações entre partículas adicionando termos quadráticos da concentração volúmica das partículas aos modelos da viscosidade. De seguida são apresentados alguns dos modelos frequentemente usados para descrever a viscosidade sanguínea.

Modelo newtoniano de Lee e Steinman: a equação proposta por Lee e Steinman é

$$\mu = (1,4175 + 5,878\varepsilon - 15,98\varepsilon^2 + 31,964\varepsilon^3)\mu_p, \quad (1)$$

μ é a viscosidade do sangue em cP, μ_p é a viscosidade do plasma e ε é a quantidade de hematócritos do paciente.

Modelo de Carreau: a viscosidade do sangue proposto por Pierre Carreau

$$\mu = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty)[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}, \quad (2)$$

onde μ_∞ é a viscosidade correspondente ao patamar newtoniano para as taxas de deformação mais elevadas, μ_0 é a viscosidade correspondente ao patamar newtoniano para as taxas de deformação mais baixas, λ é o tempo de repouso, $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação e n é o índice da lei de potência. Os valores para os parâmetros deste modelo são propostos por vários autores (e.g. [2, 5]). Para este estudo adotamos os valores propostos por Johnston *et al.*[2] para $\lambda = 3,313$ s, $n = 0,3568$, $\mu_0 = 0,056$ Pa.s. O valor para o patamar newtoniano definido por $\mu_\infty = 4,1602$ mPa.s foi ajustado à viscosidade newtoniana dada pelo modelo Lee e Steinman [5], Equação 1.

Modelo Walburn-Schneck: é mais uma variante do modelo da lei de potência [3], de modo a incluir os efeitos do hematócrito na viscosidade do sangue.

$$\mu = p_1 e^{p_2 \varepsilon} \left[e^{p_4 (TPMA / \varepsilon^2)} \right] (\dot{\gamma})^{-p_3 \varepsilon}, \quad (3)$$

onde ε a quantidade de hematócritos, TPMA é a quantidade de Total de Proteína Menos Albumina e $\dot{\gamma}$ a taxa de deformação (s^{-1}). Para o caso em estudo utilizamos os valores usados Johnston *et al.* [2] para $p_1 = 0,000797$ Pa.s $p_3^{\varepsilon+1}$, $p_2 = 0,0608$, $p_3 = 0,00499$ e $p_4 = 14,585$ g l⁻¹. Para $\varepsilon = 38,7\%$ e TPMA = 24,0 g l⁻¹, estes valores foram retirados das análises sanguíneas do paciente estudado.

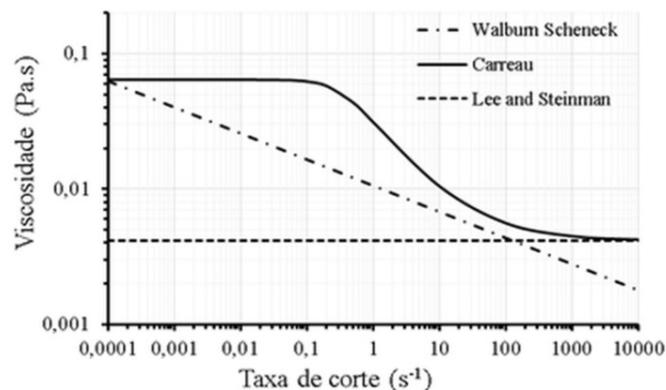


Figura 1. Viscosidade aparente do sangue em função da taxa de corte para cada um dos modelos de viscosidade usados nesta investigação.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As equações de governo da dinâmica do sangue na bifurcação da aorta abdominal resultam da aplicação as leis fundamentais da mecânica dos fluidos aos escoamentos estudados. Assim, as equações de governo para o escoamento laminar, estacionário e incompressível são;

Equação da continuidade

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (4)$$

Equação da conservação da quantidade do movimento

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

onde, v é a velocidade (m/s), ρ a massa volúmica (kg/m³), g é a aceleração da gravidade (m/s²), τ_{ij} o tensor das tensões (Pa) e p a pressão estática (Pa).

A Figura 2 mostra a bifurcação da artéria aorta abdominal reconstruída a partir de imagens médicas 2D do paciente e a malha usada nas simulações computacionais. A malha foi construída de modo a garantir a independência dos resultados numéricos da resolução da malha. Teste feitos com malhas de maior resolução apresentaram variações nos resultados menores do que 2 %.

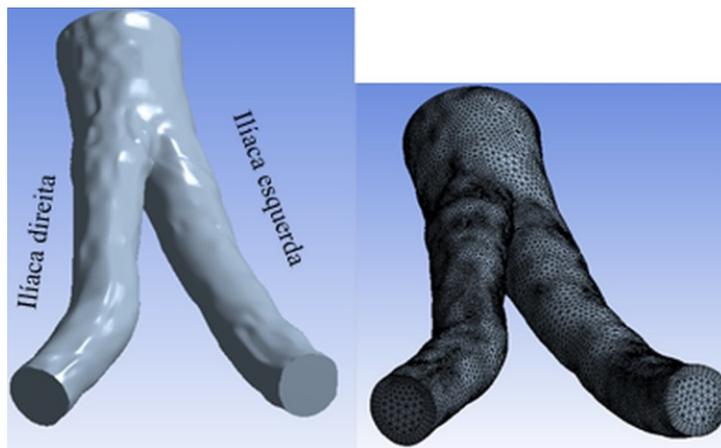


Figura 2. Geometria da bifurcação abdominal obtida a partir de imagens de tomografia axial computadorizada e malha computacional.

As condições fronteira impostas para a resolução deste problema foram as seguintes: na entrada foi imposta uma velocidade com um perfil parabólico com uma velocidade média característica de um batimento cardíaco do paciente, medida por espectroscopia Doppler; as paredes da artéria foram consideradas rígidas e considerou-se a condição normal de não deslizamento o que implica que a velocidade do sangue é nula na parede da artéria; nas saídas das Íliacas (esquerda e direita) foi considerada a condição *pressure out* disponível no *Fluent* com a pressão manométrica zero em ambas as saídas das íliacas.

3. RESULTADOS

Os resultados apresentados mostram a influência do modelo da viscosidade sanguínea (newtoniano, Carreau, e Walburn-Schneck) na hemodinâmica. Assim, foram estudadas as distribuições da velocidade, da pressão, da viscosidade e das tensões de corte nas paredes da artéria (TCP) para uma velocidade média de 0,45 m/s na entrada da bifurcação da aorta abdominal. A velocidade de 0,45 m/s corresponde a uma velocidade típica durante a sístole do batimento cardíaco.

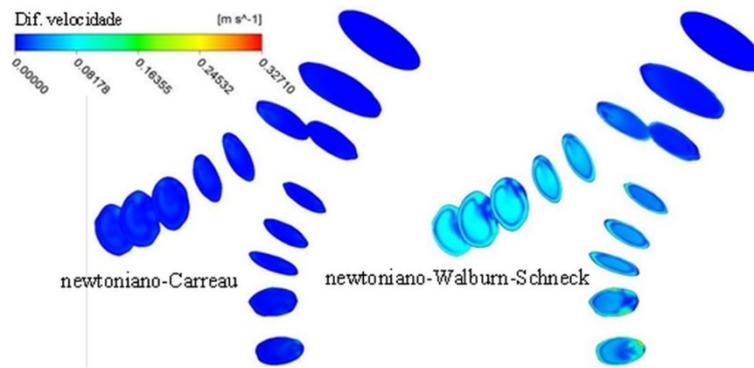


Figura 3. Diferenças da magnitude das velocidades entre o modelo newtoniano e os modelos não newtonianos de Carreau e de Walburn-Schneck.

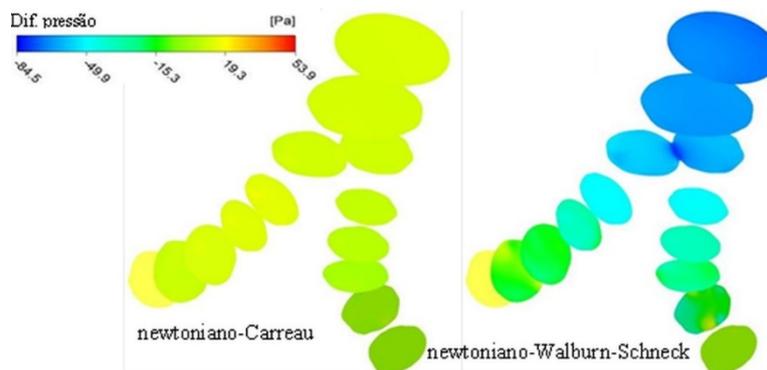


Figura 4. Diferenças das pressões entre o modelo newtoniano e os modelos não newtonianos de Carreau e de Walburn-Schneck.

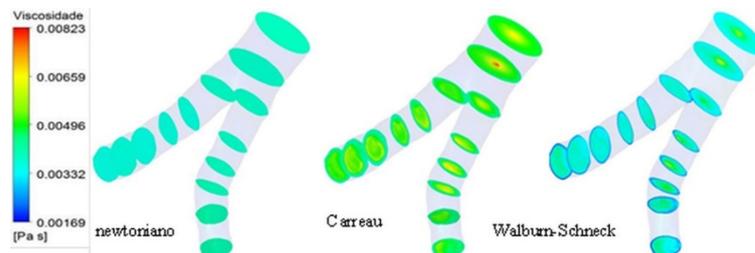


Figura 5. Campos da viscosidade para o modelo newtoniano e os modelos não newtonianos de Carreau e de Walburn-Schneck.

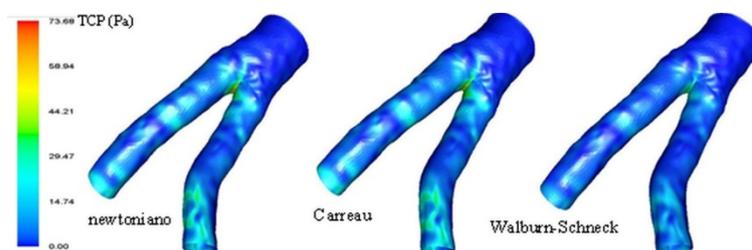


Figura 6. Tensão de corte nas paredes para o modelo newtoniano e os modelos não newtonianos de Carreau e de Walburn-Schneck.

Comportamento não newtoniano

Nesta secção avaliamos o comportamento não newtoniano dos diferentes modelos de viscosidade, em comparação com o caso newtoniano, a partir da definição do parâmetro

$$C_{nn} = \frac{P_{nn} - P_n}{P_n} \times 100 \quad (6)$$

onde P_n e P_{nn} são os valores médios da viscosidade ou da TCP obtidos com os modelos newtoniano e não newtonianos, respetivamente. Isto é, C_{nn} é a diferença relativa percentual dos efeitos não newtonianos.

A Tabela 1 apresenta os valores de C_{nn} para a viscosidade, em várias regiões da geometria. Para o modelo de Carreau a viscosidade, em toda a geometria, é mais elevada do que a viscosidade newtoniana, o valor médio no interior é 19,64% mais elevada do que o valor newtoniano de referência. Isto sugere que, no geral, as taxas de corte são menores do que $\sim 2000 \text{ s}^{-1}$, ver Figura 1. Para o modelo de Walburn-Schneck os valores de C_{nn} são sempre negativos ou seja a viscosidade sanguínea é sempre menor do que no caso newtoniano. O que sugere que em cada uma das regiões as taxas de corte sejam maiores do que $\sim 100 \text{ s}^{-1}$, Figura 1.

Tabela 1. Viscosidade para o modelo newtoniano e C_{nn} para as viscosidades obtidas com os modelos não newtonianos.

| | Newtoniano (Pa s) | Carreau (%) | Walburn-Schneck (%) |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Entrada | 0,00416 | 23,08 | -4,84 |
| Interior | 0,00416 | 19,64 | -9,75 |
| Saída esq. | 0,00416 | 14,89 | -16,85 |
| Saída dir. | 0,00416 | 16,87 | -13,69 |
| Parede Abdominal | 0,00416 | 9,29 | -28,66 |
| Parede Íliaca esq. | 0,00416 | 5,10 | -42,52 |
| Parede Íliaca dir. | 0,00416 | 4,80 | -42,78 |

Na Tabela 2 apresentam-se os valores das tensões de corte desenvolvidas nas paredes (TCP) para o modelo newtoniano e os valores respetivos de C_{nn} . O modelo de Carreau apresenta valores positivos o que significa que as taxas de corte são mais elevadas do que as obtidas com o modelo newtoniano. O comportamento contrário é observado para o modelo de Walburn-Schneck. Os efeitos não newtonianos são mais pronunciados no modelo de Walburn-Schneck do que no modelo de Carreau o que poderá ser explicado em parte pelo ajuste no modelo Carreau do valor da viscosidade do patamar newtoniano, para as taxas de corte mais elevadas, ao valor newtoniano de 0,00416 Pa.s.

Tabela 2. TCP para o modelo newtoniano e C_{nn} para as TCP obtidas como os modelos não newtonianos.

| | Newtoniano (Pa) | Carreau (%) | Walburn-Schneck (%) |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Parede Abdominal | 3,45 | 5,91 | -22,06 |
| Parede Íliaca esq. | 10,39 | 2,38 | -28,02 |
| Parede Íliaca dir. | 9,22 | 2,82 | -27,58 |

3. CONCLUSÕES

A hemodinâmica não pode ser dissociada do modelo de viscosidade sanguínea usado pelo que se torna importante ajustar o modelo da viscosidade ao sangue do paciente;

Os efeitos não-newtonianos do sangue alteram o escoamento, e podem ser significativos em vasos sanguíneos que apresentam geometrias que favorecem o desenvolvimento de taxas de deformação $< 200 \text{ s}^{-1}$ para o modelo Carreau;

Os modelos não newtonianos de viscosidade usados nas condições estudadas alteram significativamente a viscosidade sanguínea e conseqüentemente toda a hemodinâmica;

No modelo de Carreau os efeitos não newtonianos aumentam as TCP enquanto que no modelo de Walburn-Scheck os efeitos não newtonianos diminuem as TCP.

REFERÊNCIAS

- [1] Buchanan J. R., Kleinstreuer C., Comer J. K. Rheological effects on pulsatile hemodynamics in a stenosed tube. *Compt. Fluid* 29, 695-724, 2000.
- [2] Johnston B.M, Johnston P.R, Corney S., Kilpatrick D. Non-Newtonian blood flow in human right coronary arteries: steady state simulations. *Journal of Biomechanics* 37 (5), 709-720, 2004.
- [3] Soares A. A., Gonzaga S., Silva J. S., Marinho D., Silva A., Rouboa A. Non-Newtonian Blood Flow in Portal Vein with Thrombosis: A Study by Computational Fluid Dynamics. In *American Institute of Physics Conference Series*, 1389, 171-174, 2011.
- [4] Yilmaz F., Yasar G. M. A critical review on blood flow in large arteries; relevance to bloodrheology, viscosity models, and physiologic conditions. *Korea-Australia Rheology Journal* 20 (4), 197-211, 2008.
- [5] Lee S. W., Steinman D. A. On the relative importance of rheology for image-based CFD models of the carotid bifurcation. *J. Biomech. Eng.* 129, 273-278, 2007.

NOVO MÉTODO DE FABRICAÇÃO DE MICRO-LENTE PARA PINÇAS ÓPTICAS

Simão Sá¹, Rita S. Rodrigues Ribeiro¹, Ariel Guerreiro¹, Pedro A. S. Jorge¹

¹ Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC-TEC)
E-mail: simao_pedro_teixeira@hotmail.com

RESUMO

As pinças óticas têm-se revelado excelentes ferramentas para manipulação de partículas micrométricas. Neste trabalho pretende-se estudar novos métodos de fabricação de micro-lentes em fibra ótica através da fusão de micro-segmentos de fibra multimodo na extremidade de uma fibra monomodo, onde estes segmentos são usados para controlar o diâmetro da micro-lente.

Os resultados comprovaram que o diâmetro da micro-lente cresce linearmente com o comprimento dos micro-segmentos multimodo (20-180µm), validando um novo método de controlo da produção de micro-lentes.

INTRODUÇÃO

Desde 1970, ano em que A. Ashkin [1] reportou o aprisionamento estável de partículas micrométricas entre dois feixes laser contra propagantes devido à pressão de radiação, que o progresso nesta área tem sido constante. Isto acontece porque as pinças óticas apresentam imensas possibilidades de utilização. Por exemplo, na biomedicina, ou até no campo da criogenia à escala atómica, têm-se feito imensos avanços no uso de pinças óticas para arrefecimento de átomos [2].

A força que se faz sentir numa partícula dielétrica aprisionada origina-se na transferência de momento entre o feixe e a partícula durante a reflexão e refração de fotões na sua superfície. Normalmente esta força divide-se em duas, a força de ‘scattering’ e a força do gradiente. A força de espalhamento é proporcional a intensidade do campo elétrico e por isso é responsável por empurrar as partículas, já a força do gradiente é proporcional ao gradiente da intensidade do campo elétrico, atraindo as partículas à zona de maior intensidade.

O uso de pinças óticas convencionais tem normalmente associado a si uma parafernália de equipamento; o laser, os componentes para o redirecionar e expandir o feixe, uma objetiva de grande abertura numérica, um sistema de observação e um dispositivo para suporte das amostras. Isto reduz a aplicabilidade das pinças óticas.

As pinças óticas produzidas em fibra ótica, apresentadas pela primeira vez em 1993 por Constable *et al.* [3], vieram expandir substancialmente as possibilidades para esta tecnologia. Além de ser necessário menos equipamento o custo associado a este é mais reduzido, abrindo assim caminho para um desenvolvimento mais rápido da tecnologia. Neste caso, é apenas necessário um laser acoplado a uma fibra que contenha uma lente na sua extremidade que permita fazer manipulação ótica. Acresce ainda o facto deste equipamento ser facilmente transportável. Presentemente existem ainda alguns desafios na tentativa de combinar esta tecnologia com as mais diversas aplicações no contexto da biologia.

Neste artigo debruçar-nos-emos sobre as pinças óticas baseadas numa micro-lente na extremidade de uma fibra ótica monomodo, que cria as condições necessárias para que ocorra aprisionamento ótico. Este artigo procura demonstrar uma nova forma de fabricar micro-lentes

poliméricas no topo de fibras óticas que apresentam uma versatilidade superior às fabricadas pelos métodos convencionais.

Este método consiste em fundir um pedaço de fibra multimodo com uma fibra monomodo de forma a alargar o *spot* de luz que é usado no processo de polimerização. Isto permite fabricar micro-lentes com maiores diâmetros de acordo com comprimento do segmento multimodo, tal como pode ser visto na Figura 1. Isto acontece, pois, o diâmetro do núcleo da fibra monomodo é de 8 μm e o da fibra multimodo é de 50 μm . O diâmetro exterior de ambas as fibras é de 125 μm .

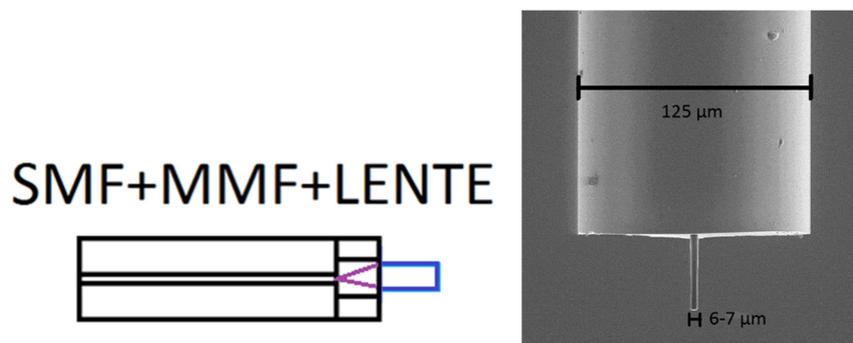


Figura 1. Pictograma do método usado para o aumento do diâmetro das micro-lentes (esquerda) e características das lentes fabricadas com o método normal [5] (direita)

FABRICAÇÃO

Para fabricar estas micro-lentes foi usado um processo dividido em dois passos.

O primeiro passo consiste em fundir um pedaço com 30 cm de fibra ótica monomodo (núcleo 8 μm) com uma ponta de 5 cm de fibra ótica multimodo (núcleo 50 μm). Após isto, é usada uma lupa de 30x para localizar o ponto de fusão, já com a fibra colocada na máquina de corte e colada a uma carruagem com movimento micrométrico. Esta é deslocada o comprimento necessário para que a secção multimodo seja clivada à distância pretendida, para que no final se possa fabricar uma micro-lente na extremidade da mesma. O segundo passo consiste na fabricação propriamente dita. Para fabricar as micro-lentes um díodo laser (LuxX CW, 405 nm, 60 mW, Omicron) foi acoplado a uma fibra ótica com aproximadamente 1 m na ponta da qual se fundiu a ponta preparada no passo anterior. Foi então colocada num suporte, e uma gota de polímero foi depositada na sua ponta, gota essa que adere à ponta da fibra pelo efeito da tensão superficial. Um feixe laser (405 nm) foi então emitido durante 10 segundos através da fibra, causando a polimerização da micro-estrutura na ponta da fibra ótica por irradiação através do núcleo. O esquema de fabricação pode ser visto na Figura 2.

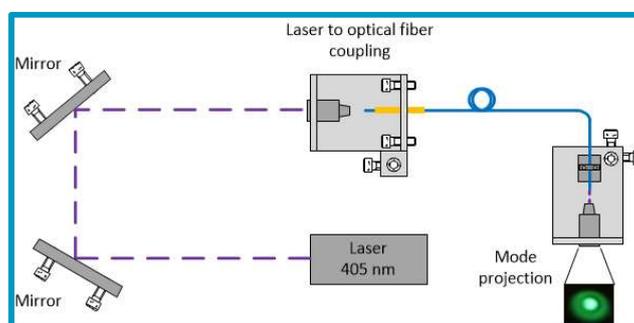


Figura 2. Setup experimental usado na fabricação das micro-lentes poliméricas. Manipulando o ângulo de injeção da luz na fibra (através da objetiva x10) controlando os espelhos, pode selecionar-se o modo a excitar. O processo pode ser controlado verificando a projeção do padrão de luz à saída da fibra numa superfície plana.

A micro-lente é formada por um processo de foto-polimerização (Figura 3) auto-guiada. À medida que o polímero vai solidificando, o seu índice de refração aumenta, criando assim um

efeito de guiagem que não deixa que a radiação se espalhe pelo resto da gota. As dimensões da gota controlam o comprimento da microestrutura e o raio de curvatura da ponta polimérica é controlada pelos parâmetros óticos, estrutura do modo selecionado, intensidade e tempo de irradiação. A micro-lente presente na Figura 3 possui um diâmetro de 6-7 μm (fibra de 125 μm)

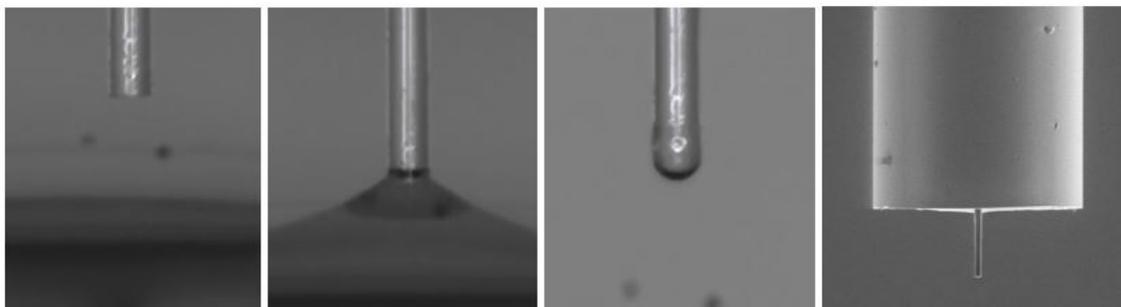


Figura 3. Processo de fabricação das micro-lentes. A fibra é clivada e disposta verticalmente acima do polímero, depois é imersa no mesmo. Por tensão superficial, uma gota adere à superfície da mesma, como pode ser visto na terceira imagem. Depois é emitido o feixe laser e por fim limpo o excesso de polímero com etanol revelando a micro-lente.

Durante todo o processo é crucial uma monitorização do modo que se esta a excitar na fibra dado que a micro-lente reproduz na ponta os padrões de intensidade do modo excitado. Sendo assim e para obter uma micro-lente esférica o modo a ser usado deve ser o LP_{01} . No entanto embora tenha sido este o modo excitado no início do processo, a distribuição modal foi mudando por instabilidade do sistema de alinhamento. Apesar de tudo, mesmo não tendo sido obtidas lentes perfeitamente esféricas, continuou a ser possível analisar a influência da secção multimodo no comprimento e diâmetro da micro-lente.

A nível molecular, a fotopolimerização consiste na ligação de monómeros, formando polímeros onde a luz é utilizada como ativador. A polimerização é iniciada por um processo fotoquímico induzido pela energia da radiação incidente de um comprimento de onda adequado. A polimerização é uma reação em cadeia que ocorre até um inibidor a parar. Neste caso, o monómero usado foi triacrilato de *pentaeritritol* (PETIA), e o fotoiniciador usado foi Irgacure 819, que é sensível a radiação com e comprimento de onda entre 375 nm e 450 nm.

RESULTADOS

As micro-lentes foram caracterizadas avaliando as suas dimensões e o perfil de intensidade projetado. A escolha dos parâmetros de fabricação (tempo de exposição, energia, etc) foi feita de acordo com estudos anteriores, dado que é crucial o correto doseamento de energia transmitido ao polímero. A sobredosagem produz lentes planas e que não reproduzem o modo excitado na ponta (embora este último parâmetro não tenha sido analisado) [6]. A caracterização da dimensão foi feita utilizando um microscópio e medindo a imagem obtida. Os resultados são apresentados na Figura 4.

Foi observado um comportamento linear de crescimento entre o comprimento de fibra multimodo usado e o diâmetro da micro-lente produzida. Variando de 10 μm a 50 μm . Deixa assim o fabrico de estar limitado a lentes de 6-7 μm (determinadas pelo perfil modal da fibra monomodo). Observa-se ainda que o comprimento das micro-lentes se mantém dentro dos parâmetros normais, isto acontece, pois, o comprimento depende das características da gota de polímero agarrada à fibra como a viscosidade ou a densidade e que dependem das condições atmosféricas do laboratório, condições essas que não foram variadas.

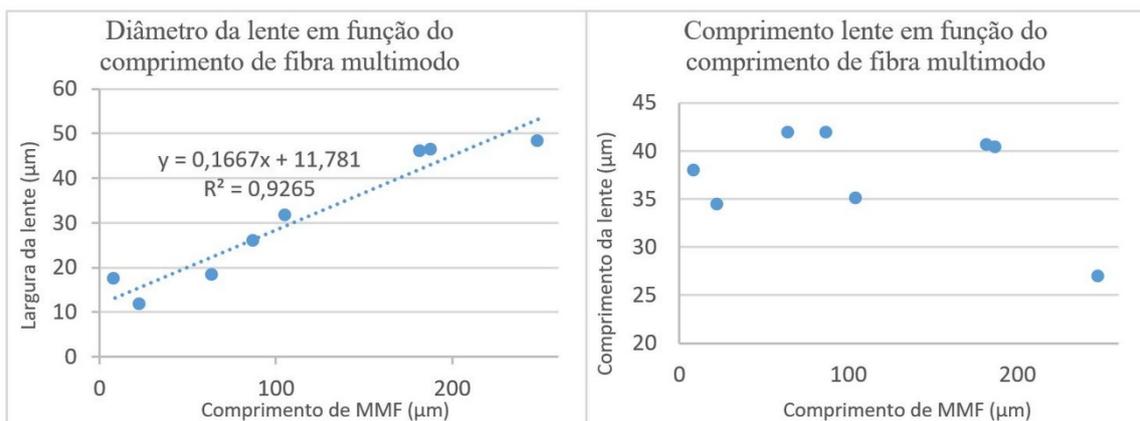


Figura 4. Gráficos do diâmetro da lente e do seu comprimento em função da dimensão da fibra multimodo aplicada.

Para caracterizar o perfil de intensidade, usando o mesmo suporte em que a fibra foi fabricada, foi projetado num alvo o padrão emitido pela fibra, foi depois analisado com o software ImageJ de maneira a ser representado em 3 dimensões de acordo com a intensidade de cada pixel.

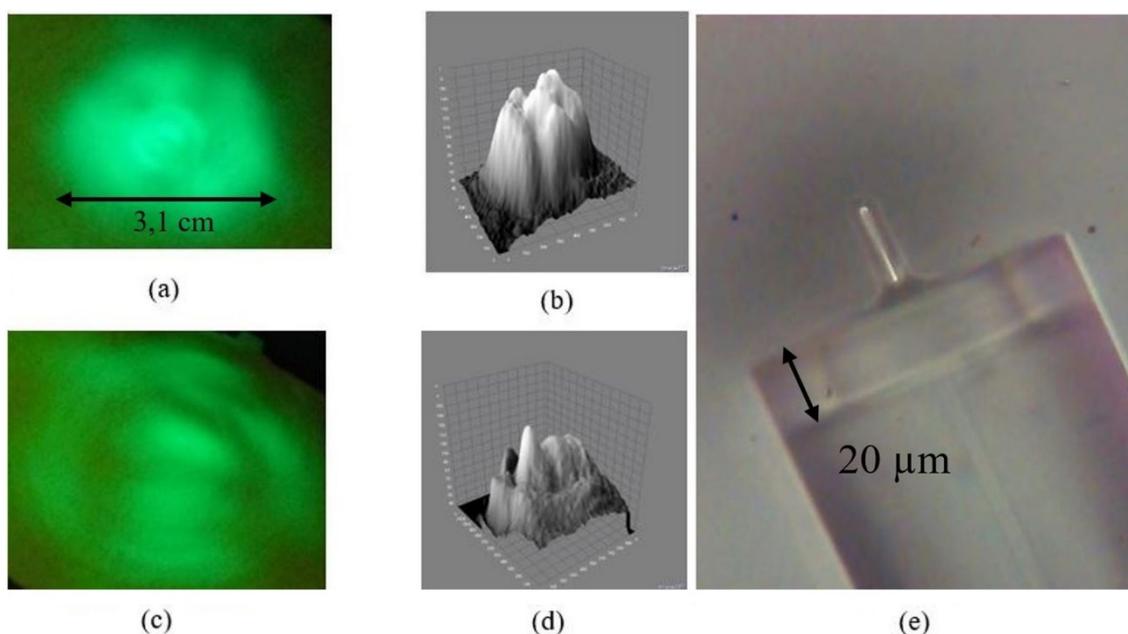


Figura 5. Perfil de intensidade obtido antes da fabricação da lente e sua reconstrução 3d (a,b) as figuras possuem a mesma escala; Perfil de intensidade obtido após a fabricação da lente e sua reconstrução 3d (c,d) a caixa de representação e um cubo de lado 3 cm; ambos os perfis pertencem a uma fibra com 20 µm de fibra multimodo aplicada na sua ponta (e).

É possível reparar que o modo excitado não era o modo fundamental, mas sim uma sobreposição de diferentes modos, Figura 5(a), no entanto observa-se que após a construção da lente existe uma concentração da radiação (mais evidente na reconstrução 3D, onde se observa também uma grande assimetria na distribuição da intensidade).

CONCLUSÃO

Foi verificado que é possível controlar o diâmetro de micro-lentes poliméricas usadas para implementar pinças óticas através da introdução de uma secção de fibra multimodo fundida à fibra monomodo tipicamente usada. Este método não interfere na rapidez e diligência do método habitual, sendo assim de fácil aplicação e sem aumento de custos. Foi ainda verificado o que se previa, a relação entre o comprimento de fibra multimodo, fundido à fibra monomodo, e

o diâmetro da micro-lente produzida é linear. Passamos assim de um processo que permitia obter lentes de diâmetro fixo entre 6-7 μm , correspondendo ao perfil modal da fibra monomodo, para a possibilidade de ajustar o seu diâmetro entre 6 μm e 50 μm , por simples adição de um segmento multimodo, que permite a expansão do perfil modal de forma controlada.

A fabricação mais controlada, com ajuste preciso do modo excitado no momento da fabricação, deverá permitir obter lentes de elevada qualidade, adequadas a aplicações de pinças óticas mais robustas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos feder através do programa operacional competitividade e internacionalização – compete 2020 no âmbito do projeto «poci-01-0145-feder-006961» e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto uid/eea/50014/2013

REFERÊNCIAS

- [1] A. Ashkin, “Acceleration and trapping of particles by radiation pressure,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 156–159, Jan. 1970
- [2] W. D. Phillips, J. V. Prodan, and H. J. Metcalf, “Laser cooling and electromagnetic trapping of neutral atoms,” *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 2, pp. 1751–1767, 1985
- [3] A. Constable, J. Kim, J. Mervis, F. Zarinetchi, and M. Prentiss, “Demonstration of a fiber-optical light-force trap,” *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 21, pp. 1867–1869, Nov. 1993.
- [4] R. S. Rodrigues Ribeiro; R. B. Queirós; C. Ecoffet; O. Soppera; A. Oliva, et al." Rapid fabrication of polymeric micro lenses for optical fiber trapping and beam shaping ", *Proc. SPIE 9164, Optical Trapping and Optical Micromanipulation XI*, 91642M (September 16, 2014); doi:10.1117/12.2060374; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2060374>
- [5] Rita S. Rodrigues Ribeiro, Olivier Soppera, Abel González Oliva, Ariel Guerreiro, and Pedro A. S. Jorge, "New Trends on Optical Fiber Tweezers," *J. Lightwave Technol.* 33, 3394-3405 (2015)
- [6] Jradi, S.; Soppera, O.; Lougnot, D. J.; Bachelot, R.; Royer, P. “Tailoring the Geometry of Polymer Tips on the End of Optical Fibers via Control of Physico-Chemical Parameters.” *Opt. Mater. (Amst)*. **2009**, 31, 640–646

CONCENTRATION ASSESSMENT IN WATER SOURCES OF PUBLIC DRINKING OF COVILHÃ'S COUNTY, PORTUGAL

M. Inácio^{1,3}, S. Soares^{1,2,3}, P. Almeida⁴

¹ Faculdade de Ciências da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

E-mail: minacio@ubi.pt

² Centro de Matemática e Aplicações da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

E-mail: shsoares@ubi.pt

³ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Lisboa, Portugal

⁴ Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal

E-mail: galmeida@ubi.pt

ABSTRACT

Radon, a natural element found on water, soils and rocks, is radioactive and the heaviest of the noble gases on the periodic table of elements.

The presence of natural radionuclides in water is associated with the geological features of the sampling region. The slow dissolution of these elements steadily increases its concentration in ground water. The most important contribution of natural radiation for most populations is from inhaled radon (generic term used commonly to refer to the isotope ^{222}Rn progeny). In some circumstances, exposure to natural radionuclides, through drinking water, could exceed acceptable levels.

The main goal of this work is to present an evaluation of radon concentration on samples of water used for human consumption, collected on uranium-rich granitic rock areas.

Radon in ground water can be released into the air during household activities such as showering, dishwashing and laundry. When radon accumulates on indoor air, it can pose an increased health risk, primarily lung cancer. Radon concentrations were measured with the radon gas analyzer DURRIDGE RAD7.

Radon concentration measurements were performed on thirty three samples collected from water wells at different depths and types of aquifers, at Covilhã county, Portugal. Radon concentration measurements, in twenty three, of the total water sample collected, give, values over 100 Bq/L.

1 INTRODUCTION

Radon formed by radioactive desintegration of ^{226}Ra (a natural element found on soils and rocks) is the heaviest of the noble gases in the periodic table of elements. It's an odourless, tasteless and colourless radioactive gas, with on half-life of 3.8 days, that occurs naturally in the environment resulting from the natural radioactive decay of uranium, found in different quantities in most rocks, soils and water [1]. The most important contribution of natural radiation for most populations is from inhaled radon (generic term used commonly to refer the isotope ^{222}Rn) progeny, resulting in radiation to the lung and to a lesser degree other organs through radon gas dissolved in blood [2]. In some circumstances, exposure to natural radionuclides, through drinking water, could exceed normal levels. So, in conditions with very high concentrations on drinking water, ingestion can be the primary source of exposure of organs other than the lung. In terms of ingested radon, the radiation exposure is primarily due to radon gas itself, being the contribution of its progeny less than in the case of indoor radon [3]. The organ that receives the highest radon dose is the stomach, about 90% of the total effective dose [4]. On the radiological evaluation of water, concentration and doses are the many

parameters, and the relevant isotopes are those that have a long half-life allowing them to circulate on the public water distribution systems and reach the user.

2 LOCATION OF STUDY AND GEOLOGY

Covilhã municipality as an area of 550 km² and an estimated population of 51.797 people. Partially locate on the Serra da Estrela Natural Park, it is mainly constituted of granitic bedrock aged between 340 and 280 My, enclosed on metamorphic formations as schists and greywackes with 650 to 500 My. These main geological formations are crossed by an extensive filonian network of quartz, pegmatites and dolerites [5]. Sampling sites are shown on the map of Figure 1.

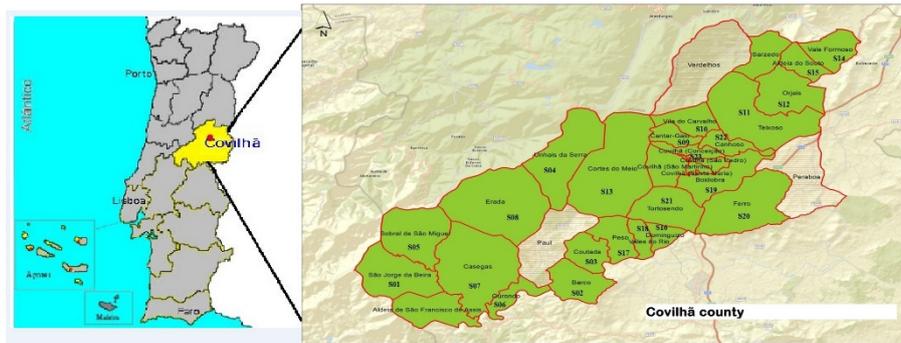


Figure 1: Location map of Covilhã in Portugal.

3 MATERIAL AND METHODS

In order to determine the radon concentration on water sample a Rad 7 radon equipment from the american manufactures DurrIDGE can used [6]. The RAD H2O was developed by the manufacturer specifically to perform radon concentration measurements on water (figure \ref{fig:fig2}) and is able to present results after 30 minutes analysis [6]. A ²²²Rn nucleus, that decays within the cell leaves its transformed nucleus, ²¹⁸Po, as a positively charged ion. The electric field within the cell drives this positively charged ion to the detector, to which sticks. When the short-lived ²¹⁸Po nucleus decays upon the detector's active surface, its alpha particle has 50% probability of entering the detector and producing an electrical signal proportional, in strength, to the energy of the alpha particle. Subsequent decays of the same nucleus produce beta particles, which are not detected, or alpha particles of different energy. Different isotopes have different alpha energies, and produce different strength signals in the detector. The RAD7 amplifies, filters, and sorts the signals according to their strength and uses only the ²¹⁸Po signal to determine radon concentration [6].

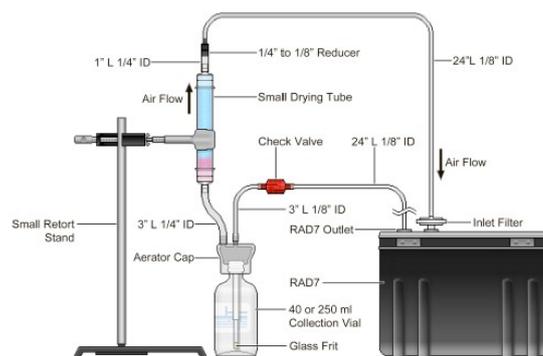


Figure 2: Schematic representation of Radon on water concentration experimental setup [6].

The ingestion of drinking water containing large concentration of radon and its progeny, contributes to the increased radiation dose exposure on stomach. The average effective annual dose for ingestion is calculated through the following equation:

$$E_{ing} = K_{ing} \times C_{Rn} \times C_w \times t \quad (1)$$

Where E_{ing} is the annual effective dose due to water ingestion containing radon and is expressed in Sv, K_{ing} is the conversion factor for ingestion dose of radon ($1 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq for adults and $2 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq for children), C_{Rn} is the radon concentration expressed in Bq/L, C_w is water consumption and t the time span of the consumption (on this paper a consumption of 2 L/day during 365 days was considered)[7,8].

4 MEASUREMENT RESULTS

Measurements of the radon concentration, held in water samples collected from public sources located in Covilhã's municipality, allowed the determination of the average annual dose in the stomach, for adults and children. From the graphic, represented on Figure 3, is clear that, in twenty three, of the total water sample collected, show, values over 100 Bq/L, the recommended reference value of the Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013.

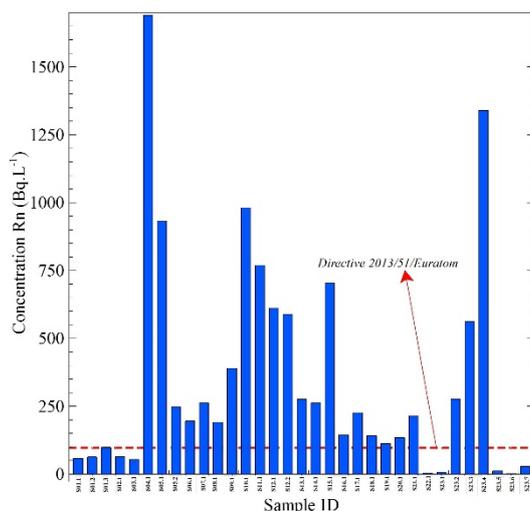


Figure 3: Radon concentration distribution on collected samples.

Results show that the annual effective dose due to ingestion, E_{ing} , are clearly over the recommended reference limit value (Reference Dose Level - RDL), that advises an effective mean dose of 0.1 mSv/y [7].

The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) suggests that the contribution of ingestion of radon in water for the total mean annual dose should be 0.002 mSv [9].

The average of the results on this study, as we can see in figure 4, are 2.575 mSv/y, for adults, and 5.151 mSv/y, for children, clearly above the aforementioned reference values.

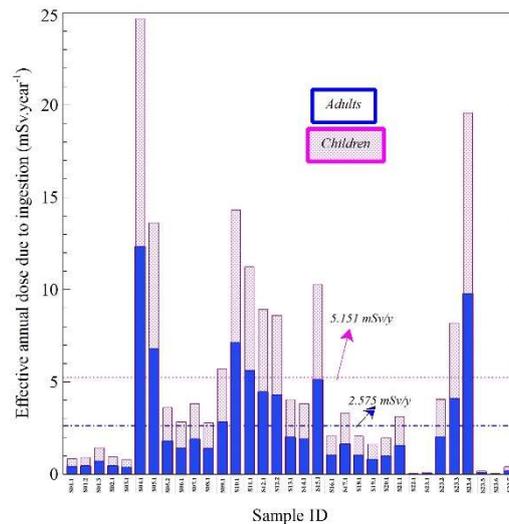


Figure 4: Annual effective dose due to ingestion.

The observed values of radon concentration in water from the collected samples is dependent not only of the geological setting on the geographic location of this study, but also of the public water supply source and track to the public distribution point. The correlation between geology and radon concentration is clear when overlapping the geological information map where metamorphic terrains on the south tend to show smaller concentration on radon in water, Figure 5, and granitic areas show an increased values.

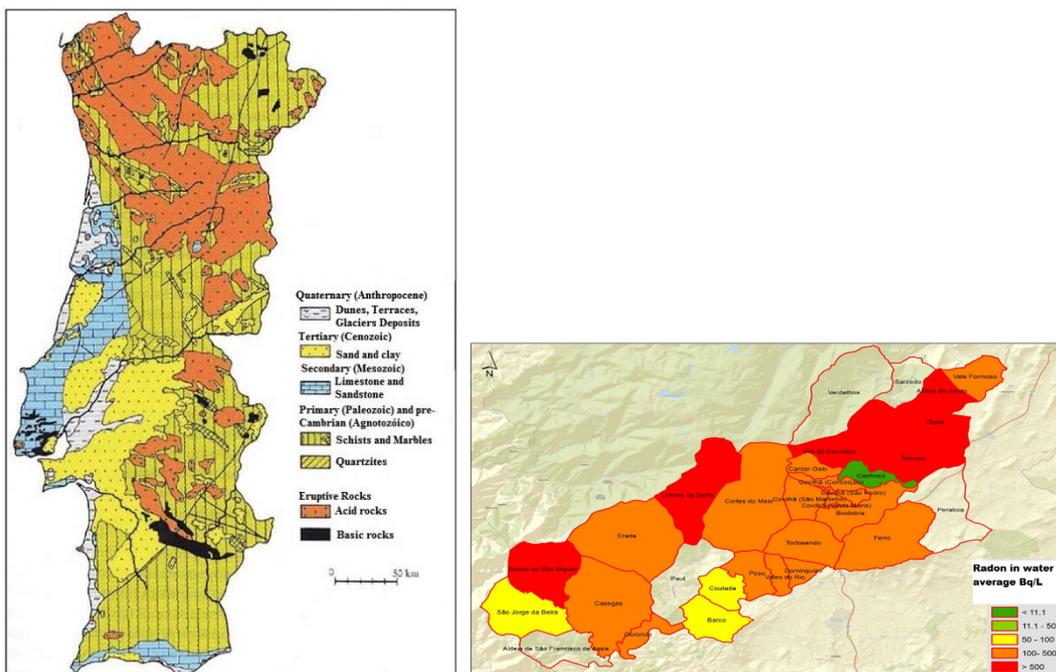


Figure 5: Map on the Geology of Portugal [10], and concentration of radon in water on Covilhã county.

5 CONCLUSIONS

Uranium, parent material of radon daughter isotope, are widely distributed in rocks and soils of the Covilhã's county. From a health viewpoint, ^{222}Rn is the most important radon isotope because its decay products, ^{218}Po and ^{214}Po , can have a marked adverse effect in human tissues. We decided measuring radon in underground water because about 50% of natural exposure of people is from this radioactive gas and, as far as we know, the highest percentage of radon enters in the human body by breathing, during bath, and from drinking water. Based on the portable device RAD 7, radon was measured in water and the results shows that its

concentration average value in thirty three samples of water collected are greater than the Council Directive 2013/51/EURATOM advised level of 100 Bq/L. Taking into account public health it is recommended that the measured water is not safe for drinking purposes, accordingly to those international limits, and will be advantageous boiling it if it were used for drinking purpose.

REFERENCES

- [1] Nuclear, C. C., september 2010. Radon in canada uranium industry. Tech. rep., Canada.
- [2] Anssi Auvinen, Laina Salonen, J. P. E. P. T. I. P. K., March 2005. Radon and other natural radionuclides in drinking water and risk of stomach cancer: A case-cohort study in finland. International Journal of Cancer 1 (114), 109-113.
- [3] Tech. rep., United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic. Council, N. R., 1999. Risk assessment of radon in drinking water.
- [4] G Kendall, T. S., 2002. Doses to organs and tissues from radon and its decay products. Radiologic Protec (22), 389-406.
- [5] Centro de Interpretação da Serra da Estrela, C. d., october 2015. Parque natural da serra da estrela. <http://www.cise.pt/pt/index.php/serra-daestrela/geologia-e-geomorfologia/13-serra-da-estrela>.
- [6] DURRIDGE, C., 2015. Radon in Water Accessory. Revision 2015-07-28 Edition.
- [7] WHO, 2004. Guidelines for Drinking Water Quality. World Health Organisation, Geneve, 3rd Edition.
- [8] Károly Somlai, Shinji Tokonami, T. I. P. V., march 2007. 222Rn concentration of water in the balaton highland and in the southern part of hungary, and the assessment of the resulting dose. Radiation Measurements 42, 491-495.
- [9] Committee, U. N. S., 1993. United nations scientific committee on the effects of atomic radiation, annex a: Exposures from natural sources of radiation.
- [10] Coelho, S., 1996. Carta Geológica de Portugal Continental.

IMPACT OF PROSTATIC FIDUCIAL MARKERS IN ORTHOGONAL RAY IMAGING - ORTHOCT: A SIMULATION STUDY

Ana Luísa Lopes^{1:2,*}, Hugo Simões^{1:3,*}, Paulo Crespo^{1:3}, João A. S. Barata^{1:2}, Joana Lencart⁴, João A. M. Santos⁴

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Coimbra, Portugal
E-mail: ana.lobes@coimbra.lip.pt; hugo.simoese@coimbra.lip.pt; crespo@lip.pt

² Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
Email: jabarata@ubi.pt

³ Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal

⁴ Instituto Português de Oncologia do Porto Francisco Gentil E.P.E., Porto, Portugal
E-mail: joana.lencart@ipporto.min-saude.pt; j.a.miranda.santos@gmail.com

*Ana Luísa Lopes and Hugo Simões contributed equally to this work.

ABSTRACT

A new very-low-dose imaging technology to assist external-beam radiotherapy treatments has been proposed. The technique is based on the detection of photons emitted at almost right angles in respect to the incoming photon flux. This radiation presents a good visual correlation with patient morphology as well as the tumor. In terms of prostate cancer irradiation, the use of implanted fiducial markers allows a more precise verification of the gland position relative to the bony anatomy. The prostate target normally exhibits intra- and interfraction motion induced by the daily variation in rectal and bladder filling. In order to solve this issue, three or more metallic gold fiducial markers are inserted into the prostate. The main purpose of this study is to evaluate through simulation the benefit of the display of gold fiducial markers implanted into the prostate gland in orthogonal ray images, using the Geant4 simulation toolkit and a digital anthropomorphic phantom.

1 INTRODUCTION

Orthogonal ray imaging (OrthoCT) is a new imaging technique under investigation by means of experiments [1] and Monte Carlo simulation [2,3], designed for assisting external-beam radiotherapy treatments (EBRT). This new technique consists in operating a dedicated X-ray detection system specially built for collecting selected patient-scattered radiation [1,2]. Unlike some of the other imaging techniques applied in treatments based on image-guided radiotherapy (IGRT) such as cone-beam computed tomography (CBCT), OrthoCT does not require rotational irradiation of the target since it is based on the detection of photons emitted at almost right angles in respect to the incoming photon flux. The detection can be achieved by positioning one or more collimator-based, 1D detector systems parallel to the beam axis, hence collecting such orthogonal rays (Figure 1) [3]. This technique provides CT-like images with very-low-dose, sparing the healthy tissues around the tumor to an unnecessary irradiation, since the X-ray source rotation is not required. The purpose of this imaging technology is twofold: (1) to image the tumor region when the patient is already immobilized on the patient couch, just moments before the irradiation treatment begins (so-called on-board imaging); and (2) to image the region of the patient being irradiated with a multi-sliced detector positioned at 90 degrees in respect to the direction of the incoming beam in case thin beamlets are being applied [3].

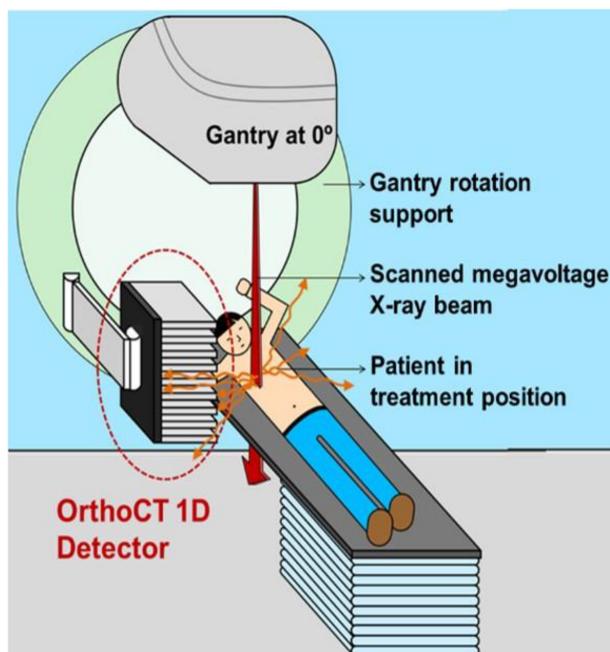


Figure 1. OrthoCT concept applied to a lung irradiation treatment. The bidimensional position of the irradiation beam together with the detector slice that collects the scattered photons provides tridimensional information of the patient morphology [3].

Nowadays, EBRT is one of the primary treatment modalities applied in cases of prostate cancer. Normally, generous safety margins are applied around the target so that under- or overtreatment caused by geometric uncertainties can be avoided with acceptable probability [4]. These uncertainties are mainly caused by internal organ motion and patient misalignments. Besides the techniques and protocols implemented, the prostate gland is located in a region affected by bladder and rectum volume variations so it is still very difficult to ensure that the gland is always in the same place. One of the main methods used in IGRT to control these variations is the placement of gold fiducial markers inside the gland. Normally, three to four gold seeds are implanted transrectally into the prostate at the base, posterior midline, and apex position [5]. The position of these markers are then used to guide the daily interfractional patient alignment during the entire treatment process [6]. With OrthoCT being a new imaging technique developed to support EBRT treatments, the main purpose of this simulation study is to evaluate the possible advantages in terms of the display of intraprostatic gold fiducial markers in orthogonal ray images, so that the location of the target and patient alignment could be more accurate.

2. SIMULATION STUDY

In order to analyse the display of intraprostatic fiducial markers in orthogonal ray imaging, a setup similar to that presented in Figure 2 was implemented in the version 9.3 of Geant4 [7,8], with the NCAT antropomorphic software phantom [9] adapted into Geant4 [10]. A 6-MV bremsstrahlung spectrum [11] corresponding to a linac from Varian Medical System was implemented as input to the Geant4-based simulation, once this photon energy is widely used in EBRT applications. The beam had a cross-section of $5 \times 5 \text{ mm}^2$, performing a beam scan of 50 mm along the craniocaudal direction. The OrthoCT images were created with mathematical collimation (discrimination of angle and energy). Initially, to evaluate the impact of the fiducial markers on the accuracy and reproducibility of daily prostate target alignment in orthogonal ray images, one small cuboid of gold with the dimensions of two contiguous voxels ($4.68 \times 4.68 \times 9.36 \text{ mm}^3$ total) was implemented into the prostate gland. Due to the original size of the phantom voxels we were not able to simulate a cylindrical fiducial marker with its real dimensions (1.2 mm of diameter and 3.0 mm of length). Aiming at an accurate simulation study, in a second stage of this investigation the phantom was manipulated so the size of the voxels could be reduced to $2.34 \times 2.34 \times 4.68 \text{ mm}^3$ and then three gold fiducial markers were

introduced inside the prostate volume (each one corresponding to a cuboid with the dimensions of $2.34 \times 2.34 \times 4.68 \text{ mm}^3$). In order to analyse the imaging potentialities of OrthoCT in the detection of small deviations induced by the filling variations of the rectum and/or bladder, a new simulation study was made with the fiducial markers deviated 4.68 mm in the craniocaudal direction regarding its original position.

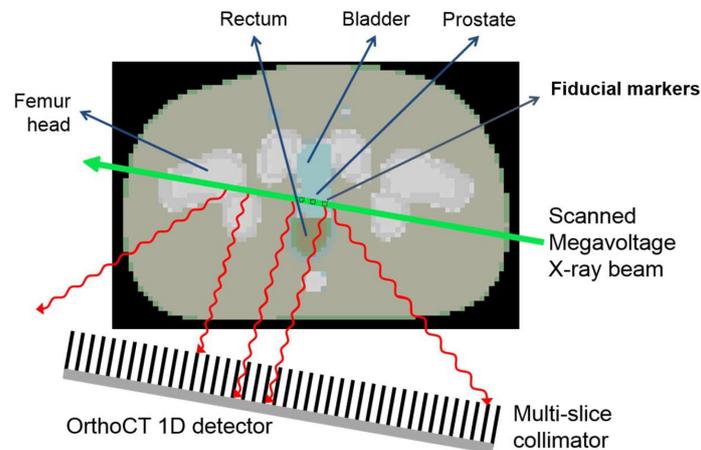


Figure 2. Schematic view of the concept applied in the present investigation to obtain orthogonal ray images of the prostate gland with three gold fiducial markers implanted.

3. SIMULATION RESULTS

Figure 3 shows the sagittal (left) and axial (right) views of the simulated dose distributions obtained after the implementation of one gold fiducial marker with dimensions $4.68 \times 4.68 \times 9.36 \text{ mm}^3$. It is possible to notice that with this imaging technique the irradiated region is strongly reduced.

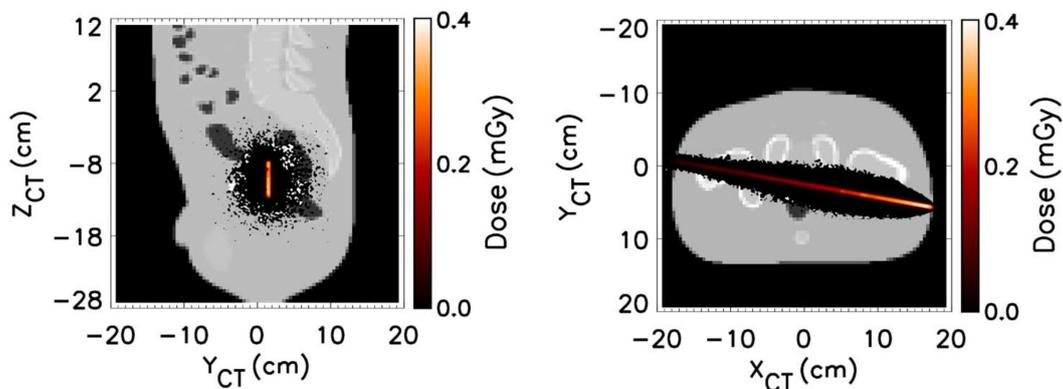


Figure 3: Sagittal (left) and axial (right) views of the simulated dose distributions obtained on the irradiation of the prostate with one gold fiducial marker implanted ($4.68 \times 4.68 \times 9.36 \text{ mm}^3$). Due to the resemblance of the results, these views will not be presented in the other simulated scenarios.

In Figures 4 and 5 the OrthoCT images obtained with mathematical collimation are presented. Only photons hitting the detector within an angle $\theta_{X'_{CT}} \leq 1.5^\circ$ and an energy $E_\gamma \geq 200 \text{ keV}$ were considered to produce such images. To decrease some of the noise, a median filter with a span of 4 voxels was applied to all images. The X'_{CT} axis was obtained via a cut with 10° inclination regarding the xy plane, since that the incidence of the beam was 100° .

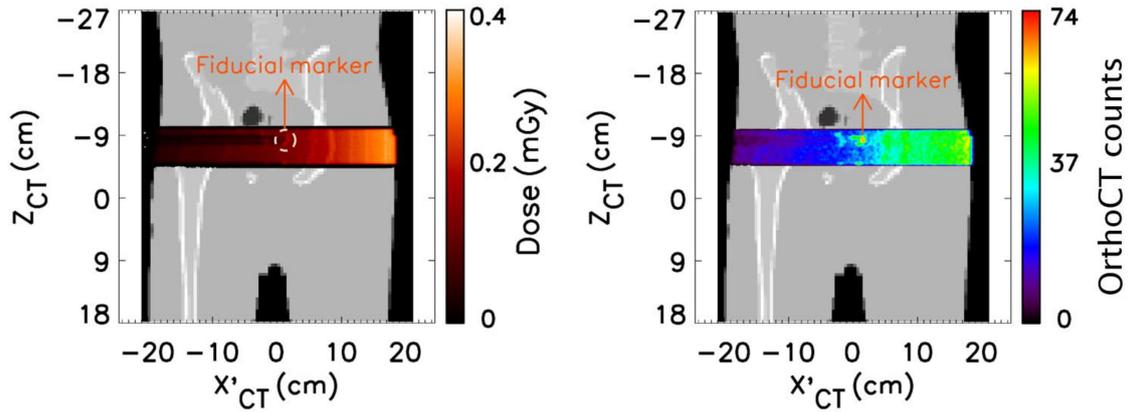


Figure 4: Simulated dose distribution (left) and OrthoCT image (right) obtained with one gold fiducial marker with $4.68 \times 4.68 \times 9.36 \text{ mm}^3$. Due to its dimensions it is possible to observe a significant amount of shadow effect in both images.

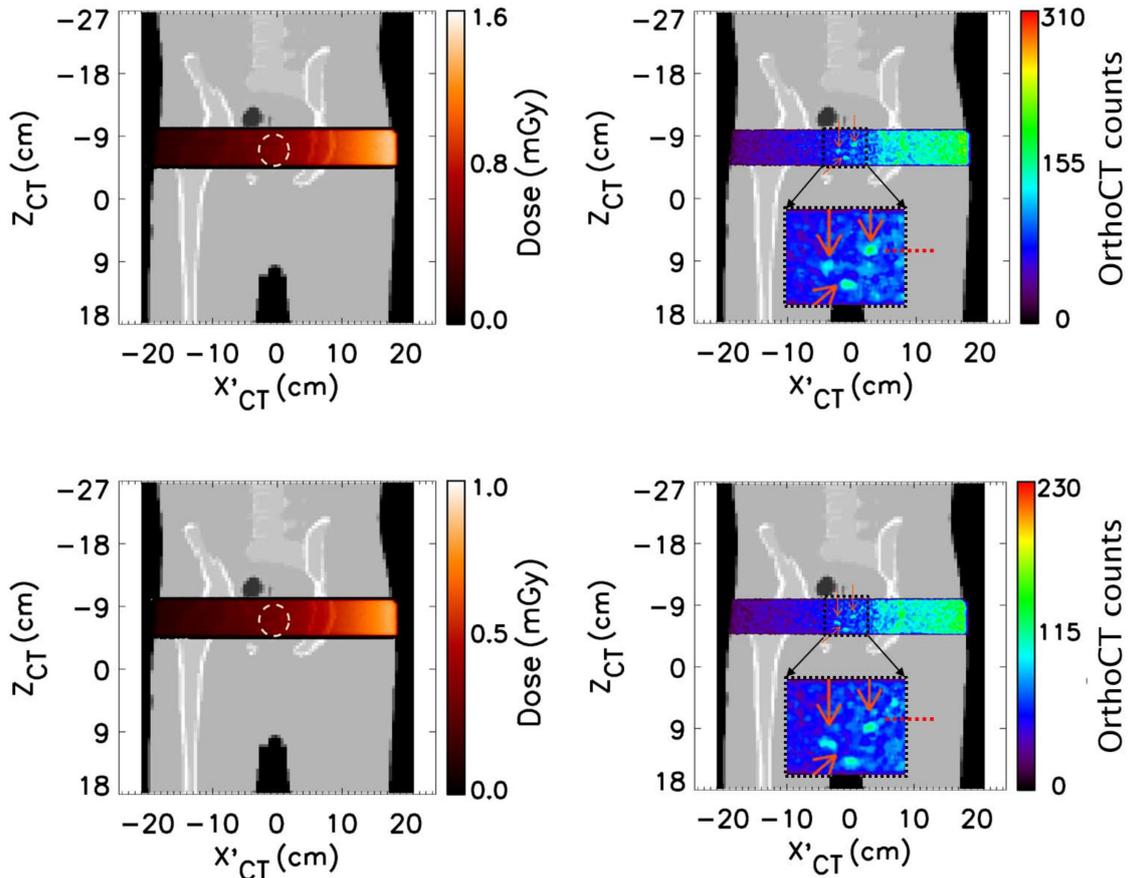


Figure 5. Simulated dose distributions and OrthoCT images obtained with three gold fiducial markers with $2.34 \times 2.34 \times 4.68 \text{ mm}^3$ implanted into the prostate. Top: simulated dose distribution (left) and OrthoCT image (right) obtained with the fiducial markers located in its original position. Bottom: simulated dose distribution (left) and OrthoCT image (right) obtained with the fiducial markers deviated 4.68 mm in the cranio-caudal direction, regarding its original location. Despite the low statistics, this small deviation is clearly detected by these orthogonal ray images.

4. CONCLUSION AND FUTURE WORK

- Despite the low simulated statistics, it is noticeable a good visual correlation between the OrthoCT images and the simulated dose as well as the phantom anatomic structures and the fiducial markers location;

- Potentially, the OrthoCT images can provide an automatic, real-time detection of a small deviation of the fiducial markers of 4.68 mm. This early detection could reduce the treatment inherent uncertainties;
- This new potential imaging technique provides morphological images of the patient without the need for X-ray source rotation, decreasing the amount of area under irradiation. This feature could minimize the dose received by the normal tissues surrounding the tumor.
- Since the size of the fiducial markers simulated in this study do not match the real dimensions clinically applied, in the future the size of the voxels of the phantom could be reduced so that the results will become more accurate. Considering the shadow effect produced by the gold in the OrthoCT images, another materials with less density (e.g. stainless steel) can be tested to decrease this effect.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the informatics support provided by the Laboratory of Advanced Computing of the University of Coimbra.

REFERENCES

- [1] H. Simões, M.C. Battaglia, M. Capela, et al., Rotation-free computed tomography with orthogonal ray imaging: first milimetric experimental results, 2012 IEEE NSS&MIC, M18-64, 2012.
- [2] M.C. Battaglia, H. Simões, V. Bellini, et al., Orthogonal ray imaging with megavoltage beams: simulated results with an anthropomorphic phantom, 2012 IEEE NSS&MIC, M22-6, 2012.
- [3] H. Simões, M. Barros and P. Crespo, Monitoring tumor lung irradiation with OrthoCT (orthogonal ray imaging): a full system simulation study, 2016 IEEE NSS&MIC, M04A-12, 2016 (in press).
- [4] M. van Herk, Different styles of image-guided radiotherapy, *Sem Rad Onc*, 17:258-267, 2007.
- [5] J.C.L. Chow and G.N. Grigorov, Monte Carlo simulations of dose near a nonradioactive sold seed, *Med Phys* 33(12):4614-4621, 2006.
- [6] R. Kudchadker, A.K. Lee, Z.H. Yu, et al., Effectiveness of using fewer implanted fiducial markers for prostate target alignment, *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 74:1283-1289, 2009.
- [7] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al., Geant4: a simulation toolkit, *Nucl Instrum Meth A*, 506(3):250-303, 2003.
- [8] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al., Geant4: developments and applications, *IEEE Trans Nucl Sci*, 53(1):270-278, 2006.
- [9] P. Segars, Ph.D. dissertation, University of North Carolina, May 2001.
- [10] P. Crespo, J. Reis, M. Couceiro, et al., Whole-body single-bed time-of-flight RPC-PET: simulation of axial and planar sensitivities with NEMA and anthropomorphic phantoms, *IEEE Trans Nucl Sci*, 59(3):520-529, 2012.
- [11] F. Verhaegen and J. Seuntjens, Monte Carlo modelling of external radiotherapy photons beams, *Phys Med Biol*, 48:R107-164, 2003.

ESQUEMA DE INTERPOLAÇÃO ALTERNATIVO PARA A RESOLUÇÃO NUMÉRICA DE PROBLEMAS DE DIFUSÃO COM CONVECÇÃO USANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Luís J.M. Amoreira

Departamento de Física, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal
E-mail: amoreira@ubi.pt

RESUMO

Neste trabalho é proposto um esquema de discretização alternativo para a resolução de problemas de difusão com convecção baseado no esquema de diferenças centrais mas com coeficientes de interpolação que dependem da importância do transporte convectivo face ao difusivo.

É feita uma análise comparativa do esquema proposto com esquemas tradicionais (diferenças centrais, *upwind*, híbrido) em termos da estabilidade, da exatidão e da taxa de convergência. O problema usado para a comparação é o da difusão estacionária unidimensional sem fontes, num fluido incompressível em escoamento com velocidade constante, para o qual existem soluções analíticas.

Verifica-se que o esquema proposto é estável mesmo em problemas com convecção intensa e que produz, em geral, resultados mais aproximados da solução analítica dos que os obtidos com os restantes esquemas considerados. Como o esquema de diferenças centrais, o esquema proposto é de segunda ordem em malhas homogêneas centradas.

1 INTRODUÇÃO

Na resolução numérica de equações de conservação como as que normalmente surgem em problemas de dinâmica de fluidos usando o método dos volumes finitos [1], define-se uma partição do domínio de integração com um conjunto de subdomínios finitos chamados *volumes de controle* (VC) e integram-se as equações diferenciais a resolver em cada um desses subdomínios. Resulta deste procedimento um sistema de equações algébricas que relacionam os valores dos fluxos característicos do problema através das fronteiras dos vários VC. A resolução deste sistema de equações algébricas produz os valores numéricos aproximados dos campos a determinar nos pontos característicos de cada VC (frequentemente, os seus centros geométricos). Este procedimento passa por estabelecer relações entre os fluxos nas faces dos VC e os valores dos campos nos pontos da malha de discretização. Na prática, essas relações obtêm-se a partir de fórmulas de cálculo dos valores dos campos (para fluxos do tipo convectivo, proporcionais aos campos) e dos seus gradientes (para os de tipo difusivo, proporcionais aos gradientes dos campos) nas faces dos VC a partir dos valores dos campos no centros dos VC. Essas fórmulas definem o chamado *esquema de discretização* usado.

Os esquemas de discretização mais simples considerados no estudo de problemas de difusão acompanhada de convecção (os abordados no presente trabalho) são (1) o *esquema de diferenças centrais* (CDS) [2,3], em que se estimam os valores dos campos nas faces por interpolação linear e os dos seus gradientes com a fórmula de derivação central; (2) o *esquema de diferenças upwind* (UWS) [2,3], que difere do CDS apenas na expressão dos valores dos campos nas faces dos VC, tomando-se simplesmente iguais aos seus valores no VC “a montante” no escoamento; (3) o *esquema de híbrido* (HDS) [2,3,4] em que se adota o CDS em situações de escoamento lento e o UWS (desprezando-se ainda os termos difusivos) quando o

escoamento é rápido. Outros esquemas frequentemente usados, mas de ordem superior, como o QUICK [5] ou outros [6], não foram, por agora, considerados.

O esquema de diferenças centrais apresenta problemas de estabilidade em situações em que em que o transporte convectivo domina o difusivo. A causa destes problemas reside na regra de interpolação usada no cálculo do campo nas faces entre VC, que dá igual peso aos valores do campo nos dois VC. Ora, é de esperar que o VC a montante tenha uma maior importância na determinação do valor dos campos nos pontos internodais, do que o VC a jusante. No UWS, leva-se ao extremo essa valorização do VC a montante, desprezando-se completamente a influência do VC a jusante. Isto resolve o problema da instabilidade numérica, mas à custa de soluções afetadas de maior erro, especialmente quando o escoamento do meio material é lento, ou seja, quando o transporte difusivo é o dominante. O esquema híbrido é satisfatório principalmente nos casos extremos (escoamento muito lento ou muito rápido) mas menos em regimes próximos da situação discriminante. Além disso, pode gerar soluções com descontinuidades temporais em problemas não estacionários, quando as condições do escoamento se alteram de modo a ser trocado o esquema (CDS ou UWS) adotado.

Neste trabalho propõe-se um esquema simples alternativo (designado adiante por *esquema de ajuste contínuo*, CAS), em que se estimam por interpolação os valores dos campos nas faces dos VC (como no CDS), mas tomando coeficientes de interpolação dependentes continuamente da importância relativa dos transportes convectivo e difusivo, de modo a atribuir-se nessa estimativa um peso maior ao valor do campo no VC a montante no escoamento.

DIFUSÃO COM CONVECÇÃO ESTACIONÁRIA UNIDIMENSIONAL

Os quatro esquemas considerados neste trabalho são comparados por aplicação na resolução de um problema particularmente simples, o da difusão estacionária e unidimensional de uma propriedade extensiva conservada num fluido incompressível com densidade de massa ρ em escoamento com velocidade de módulo v , na ausência de fontes. Seja ϕ o valor da propriedade por unidade de massa $\rho\phi$ é, assim a sua densidade espacial) e Γ o coeficiente de difusão relevante (considerado uniforme). A equação que descreve a conservação desta propriedade ao nível local é [3]

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \mu \frac{d\phi}{dx}, \quad \mu = \frac{\rho v}{\Gamma}. \quad (1)$$

A solução analítica desta equação no intervalo $0 < x < L$ que satisfaz as condições fronteira $\phi(0) = \phi_0$ e $\phi(L) = \phi_L$ é

$$\phi(x) = \phi_0 + (\phi_L - \phi_0) \mu \frac{e^{\mu x} - 1}{e^{\mu L} - 1}. \quad (2)$$

Faça-se agora uma abordagem numérica a este problema usando o método dos volumes finitos. Considera-se uma partição do intervalo de integração em subintervalos, como se ilustra na Figura 1. A integração da eq. (1) no volume do VC destacado na figura resulta em

$$\left(\frac{d\phi}{dx}\right)_e - \left(\frac{d\phi}{dx}\right)_w = \mu(\phi_e - \phi_w). \quad (3)$$

Aplicando a fórmula da derivada central no cálculo das derivadas no lado esquerdo (esse procedimento é seguido nos vários esquemas discutidos), obtém-se

$$\phi_E - 2\phi_P + \phi_W = P(\phi_e - \phi_w). \quad (4)$$

onde o parâmetro adimensional $P = \mu \delta x / \Gamma$, chamado *número de Peclet*, é usado para indicar a importância relativa dos transportes convectivos e difusivos. Quanto maior o seu módulo, maior a importância da convecção; ao contrário, $|P| \ll 1$ sinaliza situações em que a difusão é dominante.

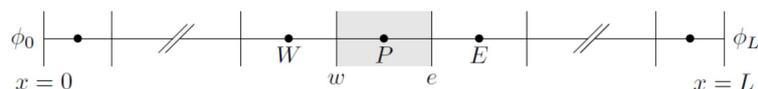


Figura 1: Partição do domínio de integração num conjunto de volumes de controle.

2 O ESQUEMA DE AJUSTE CONTÍNUO (CAS)

No esquema de ajuste contínuo, tal como no esquema de diferenças centrais, estimam-se os valores dos campos nas faces dos VC [ϕ_e e ϕ_w na eq. (4)] por interpolação, mas consideram-se no cálculo coeficientes que dependem da importância relativa da difusão face à convecção. Concretamente, e considerando para simplificar uma malha homogênea e centrada (em que as faces dos VC se encontram a iguais distâncias dos dois pontos da malha vizinhos), aplicam-se as igualdades

$$\phi_e = f(P)\phi_P + [1 + f(P)]\phi_E \quad \phi_w = f(P)\phi_W + [1 + f(P)]\phi_P, \quad (5)$$

onde os coeficientes de interpolação f e $(1-f)$ são as função do valor do número de Peclet seguintes:

$$f(P) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{P}{\xi + |P|} \right), \quad \xi > 0. \quad (6)$$

O parâmetro real positivo ξ pode ser escolhido da forma considerada mais conveniente em cada caso. Neste trabalho, em que as soluções analíticas estão disponíveis, ξ é fixado de modo a minimizar o erro das soluções numéricas numa gama alargada de regimes de escoamento, como se discute na próxima secção. Na Figura 2 está representado o gráfico desta função.

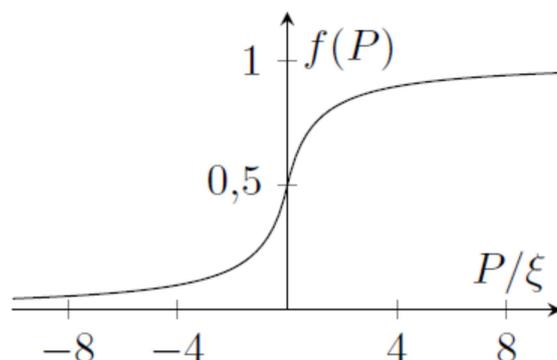


Figura 2: Coeficiente de interpolação f como função do número de Peclet.

Com os coeficientes de interpolação assim definidos, dá-se uma maior importância ao valor do campo no ponto de malha situado a montante, e essa valorização é tanto maior quanto maior (em módulo) for o número de Peclet, ou seja, a velocidade de escoamento.

3 ANÁLISE COMPARATIVA

Uma vez estabelecido o esquema de discretização, a resolução numérica da eq. (1) segue linhas bem estabelecidas (ver, por exemplo, qualquer das referências). Usaram-se os quatro esquemas referidos para obter soluções considerando um fluido com densidade $\rho=1,0 \text{ kg/m}^3$ e coeficiente de difusão $\Gamma=0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$, movendo-se com velocidade $v=2,5 \text{ m/s}$ no sentido positivo ($\mu=25 \text{ m}^{-1}$), com $\phi_0 > \phi_L$, numa malha com cinco pontos equidistantes. Na aplicação do esquema de ajuste contínuo, foi inicialmente fixado o valor do parâmetro ξ da função de interpolação. Escolheu-se a média aritmética dos valores que minimizam o erro dos resultados obtidos para cinquenta valores da velocidade de escoamento definidos no intervalo $[0,5]$, correspondendo a números de Peclet na gama $0 < P < 10$. O valor obtido foi $\xi \approx 7,293$.

Na Figura 3 à esquerda mostram-se os valores das soluções numéricas obtidas com os quatro esquemas nos pontos da malha usada, juntamente com a representação gráfica da solução

analítica da eq. (2). São patentes na figura os problemas de estabilidade do esquema CDS. É também claro que o esquema CAS é o que produz resultados mais próximos da solução analítica, sendo essa exatidão notável dada a malha grosseira usada nesta análise.

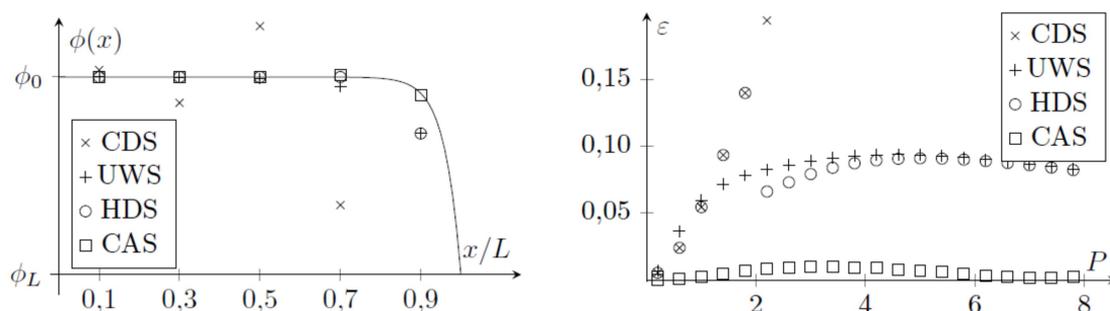


Figura 3: Soluções obtidas com os quatro esquemas num problema com $\mu=25m^{-1}$, usando uma malha de cinco pontos (à esquerda) e comparação do valor do erro das soluções para diferentes valores do número de Peclet (à direita).

Esta superior exatidão do esquema de ajuste contínuo verifica-se para diferentes velocidades de escoamento. Para o verificar, foi comparado o erro das diferentes soluções numéricas para diferentes valores da velocidade do escoamento. Como medida do erro usou-se a norma $_{12}$ da diferença entre as soluções numérica e analítica, definida como

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i^* - \phi(x_i))^2}, \quad (7)$$

onde N é o número de pontos na malha de discretização, e ϕ_i^* e $\phi(x_i)$ são, respetivamente, as soluções numérica e analítica para o i -ésimo ponto. Naturalmente, o valor do parâmetro ξ do esquema de ajuste contínuo foi mantido sempre com o valor já indicado. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3 à direita, como função do número de Peclet. Constata-se que o CAS apresenta de facto erros significativamente menores que os restantes esquemas e revela uma muito menor sensibilidade ao regime de escoamento. A figura revela também uma descontinuidade gerada pelo esquema híbrido do tipo das referidas na introdução: para $P=2$, o valor do erro cai bruscamente (indicando uma alteração igualmente descontínua da solução encontrada), quando o HDS substitui o procedimento adotado em escoamentos lentos (CDS) pelo adotado em escoamentos rápidos (UWS sem difusão).

Para valores do número de Peclet próximos de zero, o esquema híbrido e o de diferenças centrais são equivalentes, e o esquema de ajuste contínuo vai-se tornando cada vez mais semelhante a esses dois à medida que $P \rightarrow 0$. Por isso, o HDS e o CAS apresentam ambos taxas de convergência semelhantes à do CDS, que, em malhas homogêneas e centradas, é um esquema de segunda ordem [3]. Esta propriedade é ilustrada na Figura 4: os erros dos três esquemas referidos dispõem-se ao longo de linhas paralelas que, na escala logarítmica do gráfico, têm declive $m \approx 2$. Já o UWS, que desvaloriza de forma grosseira os fluxos difusivos nas faces dos VC, apresenta uma taxa de convergência muito menor ($m \approx 0,77$).

4 CONCLUSÕES

O esquema proposto neste trabalho revelou-se superior, em termos de estabilidade e de exatidão, aos esquemas simples tradicionalmente considerados. O CAS é mais robusto que os esquemas tradicionais, no sentido em que o erro das suas soluções é praticamente insensível às condições do escoamento. Apesar disso, o CAS é ainda um esquema de dois pontos, de implementação simples e numericamente muito ligeiro. Parece, assim, claramente superior aos restantes esquemas considerados neste trabalho.

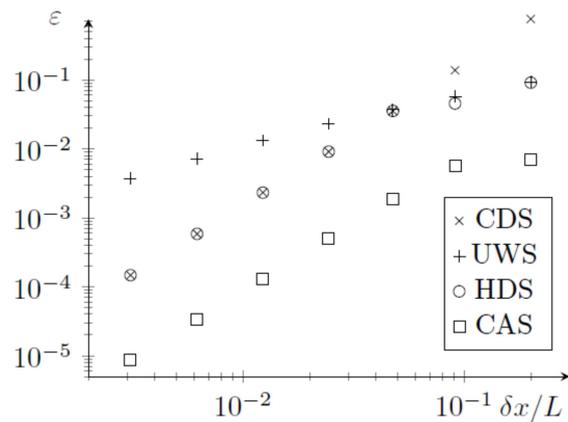


Figura 4: Erros das soluções obtidas para o problema considerado, como função do passo de integração δx .

REFERÊNCIAS

- [1] Ferziger J., Perić M., Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, 2002.
- [2] Patankar S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Pub. Corp. McGraw-Hill, 1980.
- [3] Versteeg H., Malalasekera W., An Introduction to Computational Fluid Mechanics. Prentice Hall, 2007.
- [4] Spalding D., A Novel Finite-difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives. Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 4, p. 551, 1972.
- [5] Leonard B., A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., Vol. 19, p. 59, 1979.
- [6] Jing H., Li C., Zhou B., A Hybrid Five-Point Finite Difference Scheme for Convection-Diffusion Equations. Eur. Conf. Comp. Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006.

HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF NANOFUIDS IN A FLAT TUBE

Rui Ribeiro¹, Armando A. Soares^{2,3}, P.L.Silva^{1,4}

¹ Dep. de Engenharias-ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: rui.ribeiro1@sapo.pt, plsilva@utad.pt

² Dep. de Física-ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: asoares@utad.pt

³ Ciener-INEGI/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

⁴ CQ-VR, UTAD, 5001-801 Vila Real, Portugal

ABSTRACT

The forced convection heat transfer is dependent on the nature of the flow. In this work nanofluids were used to study its performance in the convective heat transfer in a flat tube. The heat transfer characteristics of nanofluids are compared with a base fluid (water). Numerical results, obtained from the flow simulation, were validated for water flow by comparing the friction factor and the Nusselt number in the flat tube with accurate results available in the literature. Heat transfer results are presented for the averaged Nusselt number as well as friction factor in the range of conditions studied.

INTRODUCTION

The forced heat transfer convection is an important process of heating and cooling used in many industrial applications. The heat convection can possibly be enhanced by enhancing fluid thermophysical properties, changing flow geometry or boundary conditions. Many investigators have investigated the convective heat transfer of nanofluids. They show that use of nanofluids does enhance heat transfer coefficient for heat transfer applications. Such enhancement mainly depends upon factors such as the shape of particles, the dimensions of particles, the volume fractions of particles in the suspensions and the thermal properties of particle materials [1-4]. In this work was investigated numerically the performance of nanofluids flow solutions of water/Al₂O₃ into a flat tube to improve the convective heat transfer. The tube has 35 cm of length with an almost oval transversal section with a width of 3 mm and thickness 9 mm. These are the geometric dimensions of a flattened tube in an automobile radiator. The tube walls are considered at a constant temperature of 30 °C. Different concentrations of Al₂O₃ (0-10%) were tested. The uniform axial velocity at the inlet was assumed in the present study. In the entrance of the tube the nanofluid at 90 °C has a constant velocity of 4.44 cm /s ($Re = 250$ for water only). At the walls of the tube the flow was considered with $v=0$ m/s. The Navier-Stokes and energy were solved numerically using the computation fluid dynamics (CFD) software Fluent.

The main objective of this study was to investigate the influence of the temperature-dependent thermophysical properties of the base fluid (water) on the nanofluid heat transfer characteristics.

PROBLEM FORMULATION

Recently many studies have shown that the low particle volumetric concentration of the nanoparticles in the base fluid makes it behave like a single-phase fluid. For instance, Shah and London [5] summarized many analytical and some experimental results for laminar flow characteristics and heat transfer with a single-phase fluid in flat tubes. Akbarinia and Behzadmehr [6] presented a numerical study of nanofluids under mixed laminar convection in a curved tube. They compared the variations of Nusselt numbers with Grashof numbers for various volumetric concentrations of Al₂O₃ nanoparticles in water.

Thus, for a single-phase fluid, the government equations of a stationary and incompressible laminar nanofluid flow are

Continuity

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

Momentum

$$\rho_{nf} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} + \rho_{nf} \mathbf{g} \quad (2)$$

Energy

$$\rho_{nf} c_{p_{nf}} (\nabla \cdot \mathbf{v}) T = k_{nf} \nabla^2 T, \quad (3)$$

where, v is the velocity (m/s), ρ_{nf} the nanofluid density (kg/m³), $c_{p_{nf}}$ the specific heat, k_{nf} the thermal conductivity, g is the gravitational acceleration (m/s²), τ_{ij} the stress tensor (Pa), p the static pressure (Pa). Then the Reynolds number is

$$Re = \frac{\rho_{nf} \bar{v} d_h}{\mu_{nf}}, \quad (4)$$

where μ_{nf} is the nanofluid viscosity, d_h the hydraulic diameter and \bar{v} the average velocity.

To make the simulations, the mesh was built to ensure the independence of the numerical results of the mesh resolution. Test made with higher resolution meshes showed variations in results less than 2%.

For average Nu the correlation of the circular tube geometry for pure liquids presented by Shah and London [5] did not agree with the present computational values for nanofluid flow in flat tubes. With differences until 35%, due to the fact that the present computation is based on a prescribed isothermal flatted tube boundary, whereas the Shah and London correlation is based on a constant axial wall heat flux boundary condition. The difference between the friction factor calculated in this study and the value given by Darcy–Weisbach equation for laminar flow in a circular tube is less than 13%.

RESULTS

Figure 1 shows the temperature along the tube for the temperature-independent and the temperature-dependent properties with different concentrations of alumina. For both cases, the temperature decreases with the concentration, but this decrease is more pronounced for the case of temperature-independent properties and for the higher particle volumetric concentrations.

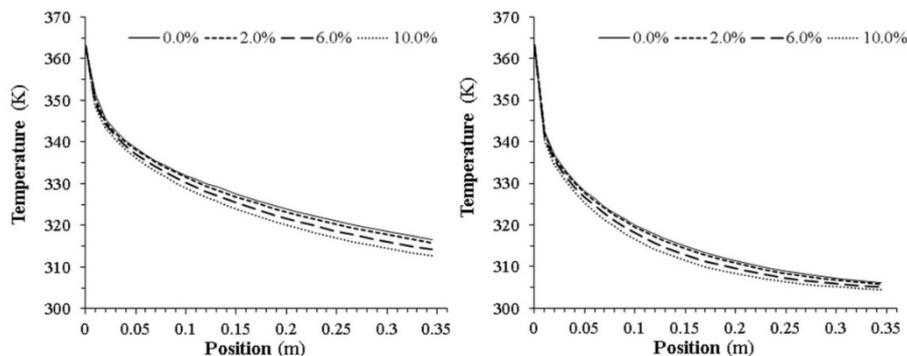


Figure 1. Nanofluid temperature along the tube for the temperature-independent (left) and the temperature-dependent (right) properties, for different volumetric concentrations of alumina.

The Table 1 shows some properties of the water/Al₂O₃ with the temperature-independent properties. Density ρ_{nf} , thermal conductivity k_{nf} and viscosity μ_{nf} increase with increasing concentration of Al₂O₃, whereas the specific heat $c_{p_{nf}}$ decreases.

Table 1. Temperature-independent properties of water/Al₂O₃.

| | Al ₂ O ₃ (%) | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0 | 0.25 | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 4.0 | 6.0 | 8.0 | 10.0 |
| <i>Re</i> | 258.81 | 236.79 | 217.22 | 184.37 | 137.18 | 84.45 | 57.64 | 42.23 | 32.55 |
| ρ_{nf} (kg/m ³) | 995.35 | 1002.56 | 1009.77 | 1024.20 | 1053.04 | 1110.74 | 1168.43 | 1226.12 | 1283.81 |
| μ_{nf} (mPas) | 0.8000 | 0.8807 | 0.9669 | 1.1553 | 1.5962 | 2.7342 | 4.2138 | 6.0350 | 8.1978 |
| k_{nf} (W/mK) | 0.6146 | 0.6190 | 0.6235 | 0.6323 | 0.6504 | 0.6875 | 0.7262 | 0.7664 | 0.8083 |
| $c_{p_{nf}}$ (J/kgK) | 4179.64 | 4146.68 | 4114.19 | 4050.59 | 3928.60 | 3703.64 | 3500.90 | 3317.23 | 3150.07 |

Figure 2 shows the evolution of the density, thermal conductivity, specific heat and viscosity along the tube, for the case of temperature-dependent properties. The average values of these properties have the same behaviour that was observed for the case of temperature-independent properties, Table1. For a fixed concentration of Al₂O₃, the density and viscosity increase along the tube, whereas the thermal conductivity decreases and the specific heat remains almost constant. This behaviour can be explained by the fact of that the water temperature decreases along the tube, Figure1.

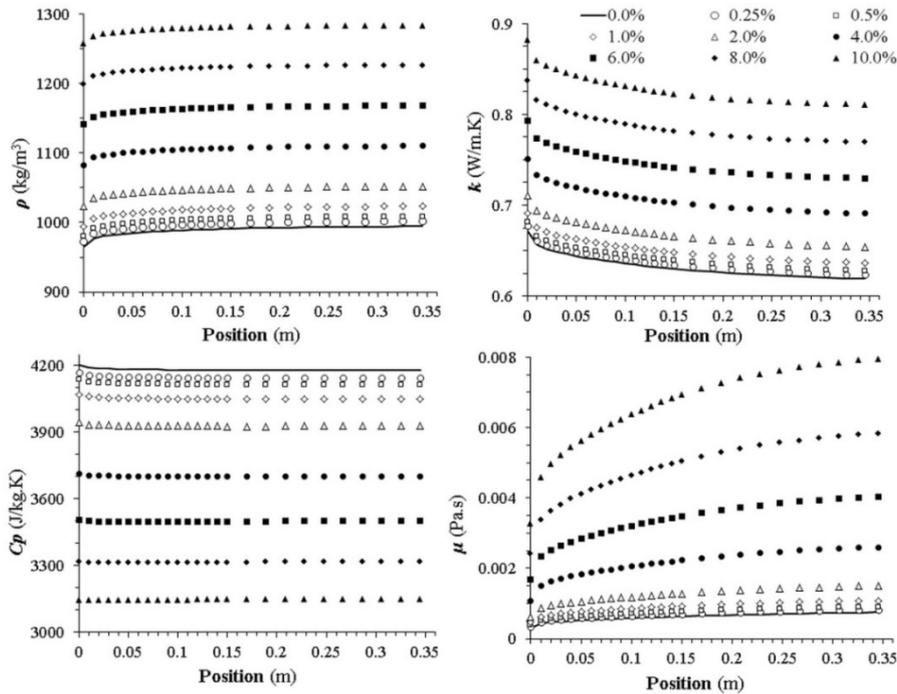


Figure 2. Density, thermal conductivity, specific heat and viscosity along the tube for the temperature-dependent properties, for different volumetric concentrations of alumina.

Figure 3 shows the heat transfer coefficient h along the line-1 and line-2 represented at the top right corner of the figure. Line-1 is on a flat section and line-2 on a curved section of the tube. Heat transfer coefficient decreases along the tube more rapidly under the condition of the temperature-dependent properties then for the case of temperature-independent properties. Heat transfer coefficient shows a complex behaviour with the volumetric concentration of alumina

and the heat transfer coefficient over line-1 shows a more pronounced dependence of the alumina concentration than over the line-2. Consequently the heat transfer coefficient between de nanofluid and the tube walls is greater in the flat sections than in the curved sections of the tube.

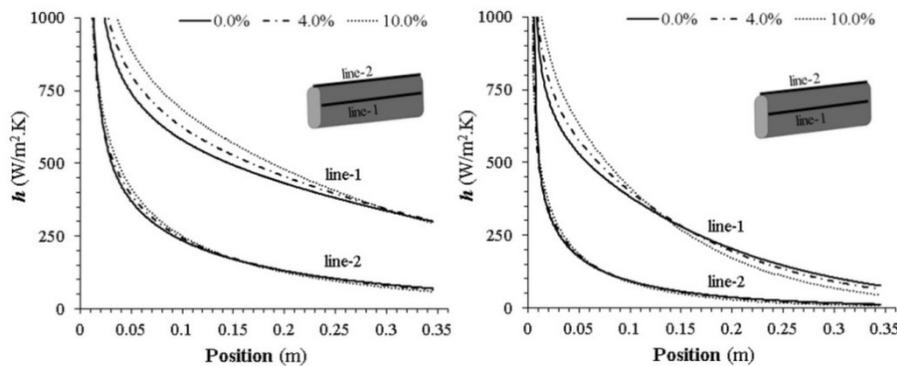


Figure 3. Heat transfer coefficient h along the line-1 and line-2 for the temperature-independent (left) and temperature-dependent (right) properties, for different volumetric concentrations of alumina.

Nusselt number Nu along the line-1 and line-2 decreases and this decrease is greater for higher concentrations of alumina, Figure 4. This behaviour is in line with that observed with for h , Figure 3. The comparison between the cases temperature-independent and temperature-dependent properties shows that the decrease of Nu is more pronounced for the temperature-dependent properties. The values of Nu are lower for the case temperature-dependent properties which correspond to a decrease of the ratio between the convective heat transfer and conduction heat transfer.

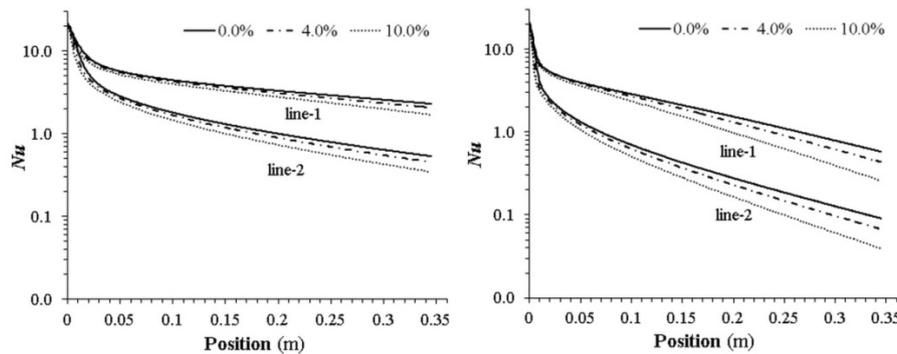


Figure 4. Nusselt number Nu along the line-1 and line-2 for the temperature-independent (left) and temperature-dependent (right) properties, for different volumetric concentrations of alumina.

Figure 5 shows the friction coefficient C_f along the line-1 and line-2 for the temperature-independent and temperature-dependent properties, for different concentrations of alumina. For both cases C_f has smaller values for line-1 than for line-2. For the case temperature-independent properties C_f remains constant after the first 3 cm, however for the case temperature-dependent properties C_f is a crescent function of the position.

CONCLUSIONS

Heat transfer numerical simulations for Al_2O_3 nanofluids flow, for $Re = 250$, with varying particle volumetric concentrations exhibit substantial increase in the density, thermal conductivity, heat transfer coefficient and Nusselt number with concentration, and a substantial decrease in the specific heat.

For constant inlet velocity, an increase in the particle volumetric concentration results in an increase in the friction coefficient along the tube.

For an accurate evaluation of the heat transfer performance of nanofluids we cannot ignore the temperature-dependence of the thermophysical properties of the nanofluids.

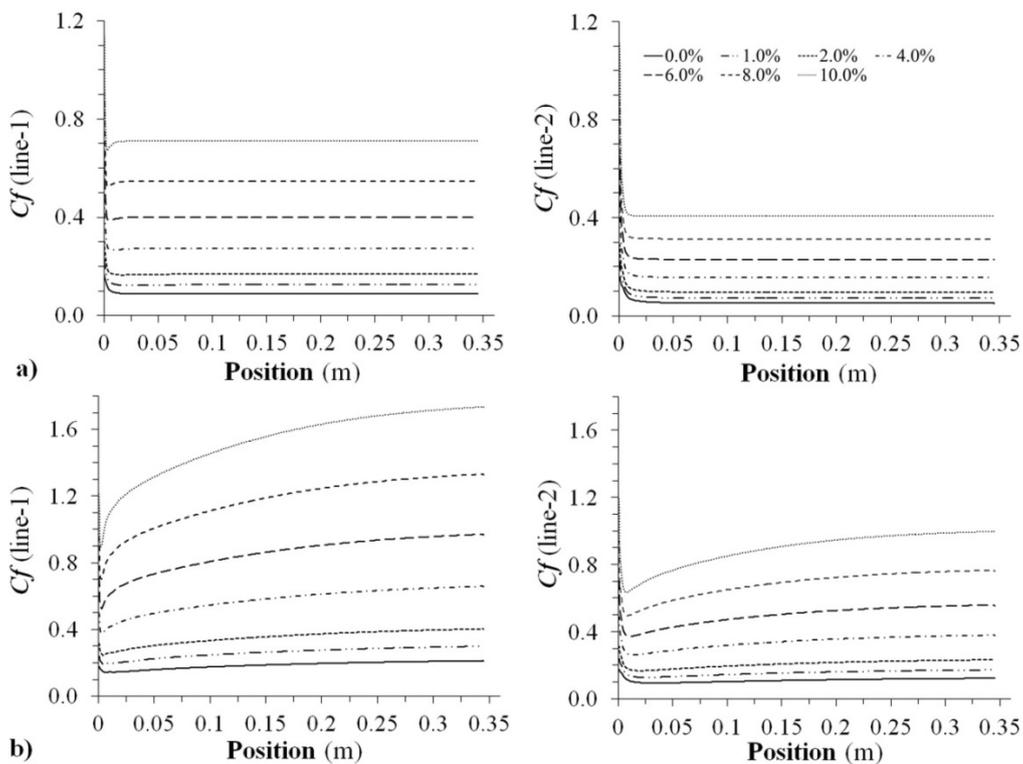


Figure 5. Friction coefficient C_f along the line-1 and line-2 for the temperature-independent (a) and temperature-dependent (b) properties, for different volumetric concentrations of alumina.

REFERENCES

- [1] Duangthongsuk W., Wongwises S. Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(6), 616-624, 2010.
- [2] Nasiri M., Etemad S. G., Bagheri R. Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 958-963, 2011.
- [3] Darzi A. A. R., Farhadi M., Sedighi K., Aallahyari S., Delavar M. A. Turbulent heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid inside helically corrugated tubes: Numerical study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 41, 68-75, 2013.
- [4] Nield D. A., Kuznetsov A. V. Forced convection in a parallel-plate channel occupied by a nanofluid or a porous medium saturated by a nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 430-433, 2014.
- [5] Shah R. K., London A.L. *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*. Academic Press (New York) 1978.
- [6] Akbarinia A., Behzadmehr A. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes. *Appl. Therm. Eng.* 27 (8-9), 1327-1337, 2007.

LABORATORY IEEE 802.11 A OPEN PTMP LINKS

J. A. R. Pacheco de Carvalho^{1,2}, H. Veiga^{1,3}, C. F. F. P. Ribeiro Pacheco¹, A. D. Reis^{1,2}

¹ APTEL Research Group, ² Departamento de Física, ³ Centro de Informática,
Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal
E-mails: pacheco@ubi.pt; hveiga@ubi.pt; a17597@ubi.pt; adreis@ubi.pt

ABSTRACT

Performance of wireless communications is a most relevant issue, resulting in more reliable and efficient communications. Laboratory measurements were made on several performance aspects of Wi-Fi (IEEE 802.11 a) Open point-to-multipoint links. Our study contributes to the performance evaluation of this technology, using available equipments (HP VM-200 access points and Linksys WPC600N adapters). New detailed results are presented and discussed, namely at OSI levels 4 and 7, from TCP, UDP and FTP experiments: TCP throughput, jitter, percentage datagram loss and FTP transfer rate data. Comparisons are made to corresponding results obtained for point-to-point links. Conclusions are drawn about the comparative performance of the links. *Keywords:* WLAN, Wi-Fi, IEEE 802.11 a, Open Point-to-multipoint and Point-to-Point Links, Wireless Network Laboratory Performance.

INTRODUCTION

Wi-Fi is a wireless communications technology working in the 2.4 and 5 GHz frequency bands. Nominal transfer rates are specified up to 11 (802.11b), 54 (802.11a, g) and 600 Mbps (802.11n) [1]. CSMA/CA is the medium access control method. Communications performance has been of prime importance, leading to increasing reliability and efficiency. Studies have been published on wireless communications, wave propagation [2,3], practical setups of WLANs [4], performance analysis of the effective transfer rate for 802.11b PTP links [5], 802.11b performance in crowded indoor environments [6]. Telematic applications have specific performance requirements, depending on application. New telematic applications are specially sensitive to performance, when compared to traditional applications [7]. Several Wi-Fi performance measurements have been made in the 2.4 and 5 GHz bands for open and secure point-to-point (PTP) links [8,9]. In the present work new Wi-Fi results are obtained, mainly through OSI levels 4 and 7, for IEEE 802.11a Open point-to-multipoint (PTMP) links. Comparisons are made to corresponding results obtained for point-to-point links.

RESULTS

The experimental arrangement for TCP, UDP and FTP measurements is shown in Figure 1. The experiments were made under far-field conditions using interference free communication channels. No encryption was activated in the AP and the wireless adapters of the PCs [10,11]. The experiments were made under far-field conditions. No power levels above 30 mW (15 dBm) were required, as the wireless equipments were close. For each nominal transfer rate, an average TCP throughput was determined from several measurements. This value was used as the bandwidth parameter for every corresponding UDP test, giving average jitter and average percentage datagram loss. Jitter, which gives the smooth mean of differences between consecutive transit times, was continuously computed by the server, as specified by the real time protocol RTP, in RFC 1889 [12]. The statistical analysis, including calculations of confidence intervals, was carried out as in [13]. FTP transfer rate measurements were made using FTP server and client applications. Batch command files were written to permit the TCP, UDP and FTP tests. The results were obtained through remote control from the official IP University network, via switch, and written as data files to the client PC disk. Figures 2-3 show TCP throughput results for Open PTP and PTMP links, respectively. Figure 4 shows UDP-jitter results for Open PTMP links.

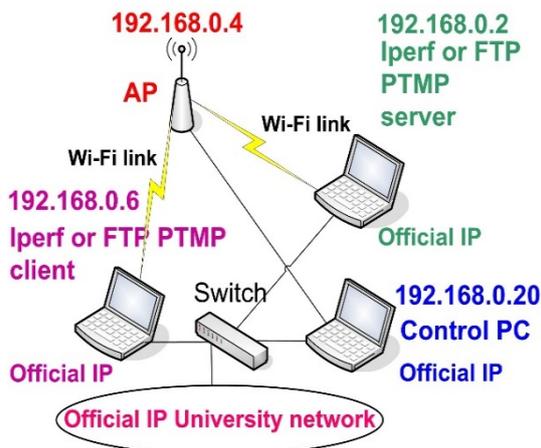


Figure 1. Laboratory setup scheme.

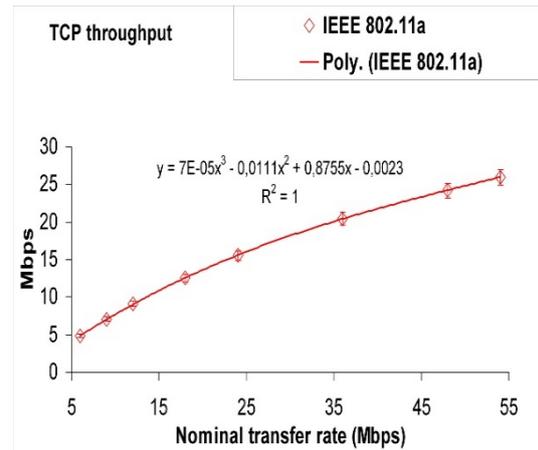


Figure 2. TCP throughput versus technology and nominal transfer rate; Open PTP.

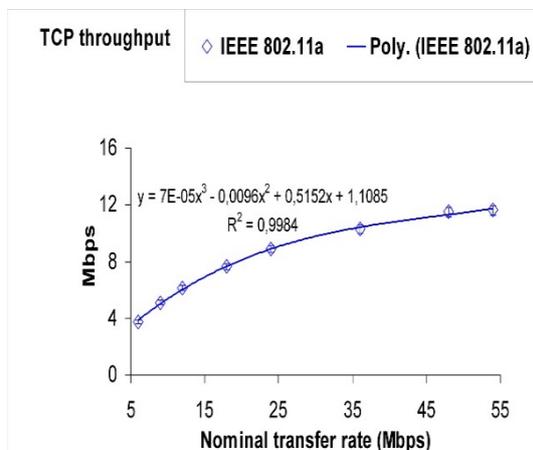


Figure 3 TCP throughput versus technology and nominal transfer rate; Open PTMP.

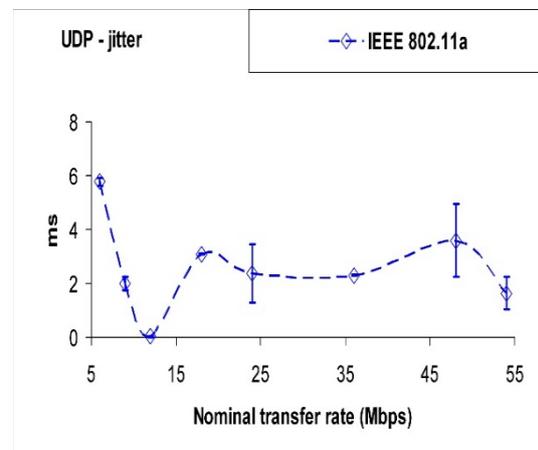


Figure 4. UDP – jitter results versus technology and nominal transfer rate; Open PTMP.

CONCLUSIONS

The best average TCP throughput, jitter and percentage datagram loss performances were found for PTP links. In comparison to PTP links, performance degradations were found for PTMP links, where the access point has to maintain links between PCs and processing requirements increase.

Further performance studies are planned using several equipments, standards, topologies and security settings, not only in laboratory but also in outdoor environments involving, mainly, medium range links.

REFERENCES

- [1] IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11i standards, <http://standards.ieee.org>.
- [2] Mark J. W., Zhuang W., *Wireless Communications and Networking*, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [3] Rappaport T. S., *Wireless Communications Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 2002.
- [4] Bruce III W. R., Gilster R., *Wireless LANs End to End*, Hungry Minds, Inc., NY, 2002.
- [5] Schwartz M., *Mobile Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2005.

- [6] Sarkar N., Sowerby K.: High Performance Measurements in the Crowded Office Environment: a Case Study, in *Proc. ICCT'06-International Conference on Communication Technology*, Guilin, China, 27-30 November 2006, pp. 1-4, 2006.
- [7] Boavida F., Monteiro E., *Engenharia de Redes Informáticas*, 10th ed., Lisbon: FCA-Editora de Informática Lda, 2011.
- [8] Pacheco de Carvalho J. A. R., Veiga H., Gomes P. A. J., Ribeiro Pacheco C. F., Marques N., Reis A. D.: Wi-Fi Point-to-Point Links- Performance Aspects of IEEE 802.11 a,b,g Laboratory Links, in *Electronic Engineering and Computing Technology, Series: Lecture Notes in Electrical Engineering*, Sio-Iong Ao, Gelman L, Editors. Springer, Netherlands, Vol. 60, pp. 507-514, 2010.
- [9] Pacheco de Carvalho J. A. R., Veiga H., Marques N., Ribeiro Pacheco C. F., Reis A. D.: Wi-Fi Point-to-Point Links- Extended Performance Studies of IEEE 802.11 b,g Laboratory Links Under Security Encryption, in *Electronic Engineering and Intelligent Systems, Series: Lecture Notes in Electrical Engineering*, Sio-Iong Ao, Len Gelman, Eds. Netherlands: Springer, Vol. 130, pp. 171-182, 2012.
- [10] HP V-M200 802.11n access point management and configuration guide, 2010, <http://www.hp.com>.
- [11] WPC600N notebook adapter user guide, 2008, <http://www.linksys.com>.
- [12] Network Working Group. “RFC 1889-RTP: A Transport Protocol for Real Time Applications”, <http://www.rfc-archive.org>.
- [13] Bevington P. R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, Mc Graw-Hill Book Company, 1969.

Project funded by FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia)/PEst-OE-FIS/UI0524/2014 (Projecto Estratégico-UI524-2014).

APPLICATIONS OF LOW ENERGY MEV ION BEAMS AND COMPUTER SIMULATION TO SURFACE ANALYSIS OF MATERIALS

J. A. R. Pacheco de Carvalho ^{1,2}, C. F. F. P. Ribeiro Pacheco ¹, A. D. Reis ^{1,2}

¹ APTEL Research Group, 2 Departamento de Física, Universidade da Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal
E-mails: pacheco@ubi.pt; a17597@ubi.pt; adreis@ubi.pt

ABSTRACT

This work is about surface analysis by nuclear techniques, which are essentially non-destructive, and computer simulation. The energy analysis method for nuclear reaction analysis is used. Elastic scattering is a particular and important case. Energy spectra are computer simulated and compared to experimental data, giving target composition and concentration profile information. The simulations use, mainly, target parameterization and available nuclear data. The method is successfully applied to determination of a uniform concentration profile of ¹⁸O from the (p,α) reaction in a thick oxide target. Uniform concentration profiles of ¹²C are obtained from the (d,p) reaction for a thick target. Uniform concentration profiles of ¹⁶O are also obtained from (d,p) and (d,α) reactions along large depths. Elastic scattering is used for depth profiling of Al and O in a thick target. *Keywords:* Surface analysis; Nuclear reaction analysis; Carbon; Oxygen; Elastic scattering; Computer simulation.

INTRODUCTION

A broad range of surface analysis techniques has been developed, involving e.g. ion, electron and photon beams interacting with a solid target. The techniques are, generally, complementary and provide target information for depths near the surface. Both nuclear and non-nuclear techniques have been available. Nuclear techniques, which are essentially non-destructive, provide for analysis over a few microns close to the surface giving absolute values of concentrations of isotopes and elements. Their main applications have been in areas such as scientific, technologic, industry, arts, archaeology and medicine, using low energy MeV ion beams [1-6]. Nuclear reaction analysis permits tracing of isotopes with high sensitivities. We use ion-ion reactions and the energy analysis method where, at a conveniently chosen energy of the incident ion beam, an energy spectrum is recorded of ions from the reaction, coming from several depths in the target. Θ_L and Θ_R are the laboratory detection and the target rotation angles, respectively. Such spectra are computationally predicted, giving target composition and concentration profile information [4-6]. Elastic scattering is a particular and important case. A computer program has been developed in this context, mainly for flat targets [4-6]. The non-flat target situation arises as an extension. Applications of the method are given using (p,α), (d,p), (d,α) reactions and elastic scattering of (⁴He)⁺ ions.

RESULTS AND CONCLUSIONS

Energy spectra were obtained for four main samples. Published nuclear data, namely for reaction differential cross section and stopping power, were used in the computer predictions. Sample S1 was a fairly flat pyrolytic graphite target, as checked with SEM microscopy. S1 was analysed through a deuteron beam at a bombarding energy $E_d=1.86$ MeV, $\Theta_R=-30^\circ$ and $\Theta_L=165^\circ$. A good computer fit to data of the ¹²C(d,p)₀¹³C reaction was obtained, as shown in Figure 1. A probed depth with $X_1=15$ μm and uniform concentration profile of ¹²C were found. Sample S2 was an austenitic steel sample. It was obtained by high temperature oxidation in C¹⁸O₂ gas. A 4.2 μm oxide thickness was provided by weight gain measurements. A uniform concentration profile of ¹⁸O was expected. SEM microscopy has shown a reasonably flat oxide. S2 was analysed through a proton beam at a bombarding energy $E_p=1.78$ MeV, an energy

slightly above the resonance energy at 1.766 MeV in the differential cross section of the $^{18}\text{O}(p,\alpha_0)^{15}\text{N}$ reaction, $\Theta_R=27^\circ$ and $\Theta_L=165^\circ$. A good computer fit to data was obtained, as shown in Figure 2. A uniform concentration profile of ^{18}O was found with $X_1=4.5\ \mu\text{m}$. Sample S3 was a thick flat sample of quartz (SiO_2) with a very thin surface film of carbon. S3 was analysed through a deuteron beam at $E_d=0.993\ \text{MeV}$, $\Theta_R=0^\circ$ and $\Theta_L=135^\circ$. A good computed fit to data was obtained. A very thin surface film of ^{12}C was found with uniform concentration and thickness $X_1=0.061\ \mu\text{m}$. A uniform step concentration profile distribution of ^{16}O was found in the quartz substrate. The corresponding thickness parameters X_2 of the predictions were, by diminishing order, 5.49 μm for (d,p₀), 5.20 μm for (d,p₁) and 3.39 μm for (d,α₀). Details of the fit are shown in Figure 3. Sample S4 was a thick flat sample of sapphire (Al_2O_3). Uniform distributions of Al and O were expected in the sapphire substrate. S4 was analysed through a (^4He)⁺ beam at $E_\alpha=1.5\ \text{MeV}$, $\Theta_R=0^\circ$ and $\Theta_L=165^\circ$. A good computer fit to data was obtained, as shown in Figure 4. Uniform concentration profiles of Al and O were obtained with X_1 parameters of 0.53 and 0.23 μm , respectively.

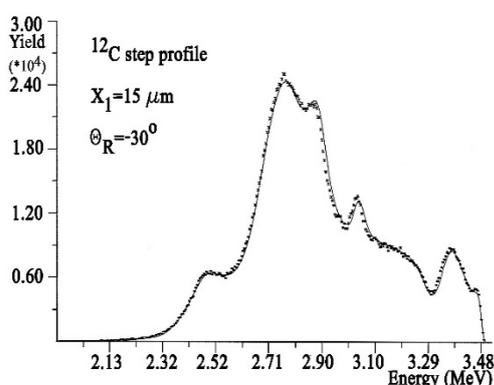


Figure 1. Computed fit to data of the $^{12}\text{C}(d,p_0)^{13}\text{C}$ reaction from the pyrolytic graphite target, (S1), for $E_d=1.86\ \text{MeV}$, $\Theta_R=30^\circ$, $\Theta_L=165^\circ$.

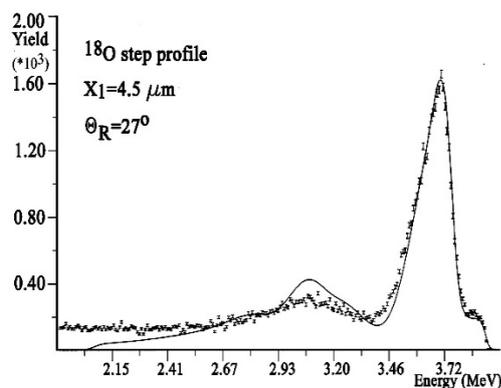


Figure 2. Computed fit to data of the $^{18}\text{O}(p,\alpha_0)^{15}\text{N}$ reaction from the oxidised steel target, (S2), for $E_p=1.78\ \text{MeV}$, $\Theta_R=27^\circ$, $\Theta_L=165^\circ$.

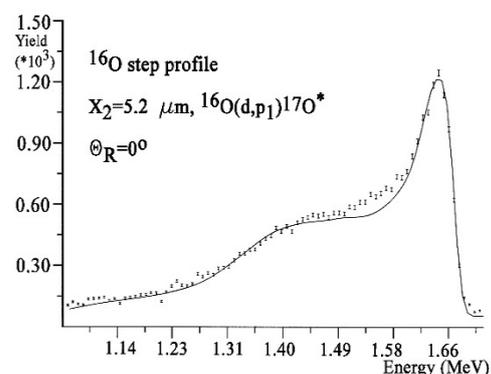


Figure 3. Computed fit to data of the $^{16}\text{O}(d,p_1)^{17}\text{O}^*$ reaction peak from the quartz target, (S3), for $E_d=0.993\ \text{MeV}$, $\Theta_R=0^\circ$, $\Theta_L=135^\circ$.

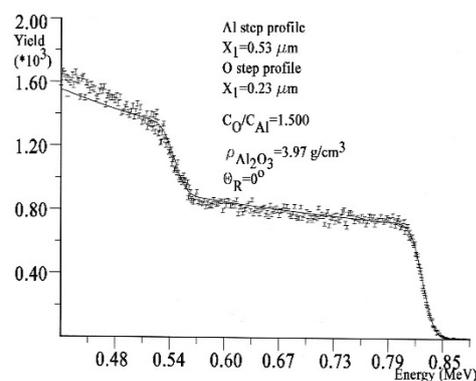


Figure 4. Computed fit to the elastic scattering data from the sapphire target, (S4), for $E_\alpha=1.5\ \text{MeV}$, $\Theta_R=0^\circ$, $\Theta_L=165^\circ$.

Nuclear techniques have shown to be highly powerful and important analytical tools in surface analysis. The results presented would be very difficult to obtain by non-nuclear techniques.

REFERENCES

- [1] Wang Y., Nastasi M. (Eds.): Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis, 2nd edition, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, U. S. A., 2009.

[2] Amsel G., Battistig G.: The impact on materials science of ion beam analysis with electrostatic accelerators, Nucl. Instr. and Meth. B, 240,1-12, 2005.

[3] Calvert J. M., Derry, D. J., Lees, D. G.: Oxygen diffusion studies using nuclear reactions, J. Phys. D: Appl. Phys., 7, 940-953, 1974.

[4] Pacheco de Carvalho J. A. R., Ph. D. Thesis, University of Manchester, England, 1984.

[5] Pacheco de Carvalho J. A. R., Reis A. D.: Differential cross-section measurements for the $^{12}\text{C}(d,p_0)^{13}\text{C}$ reaction and applications to surface analysis of materials, Nucl. Instr. and Meth. B, 266, 10, 2263-2267, 2008.

[6] Pacheco de Carvalho J. A. R., Ribeiro Pacheco C. F. F. P., Reis A. D.: Applications of spectral computer simulation to surface analysis of materials, Nucl. Instr. and Meth. B, 269, 24, 3054-3056, 2011.

Project funded by FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia)/PEst-OE-FIS/UI0524/2014 (Projecto Estratégico-UI524-2014).

DETERMINATION OF OPTICAL CONSTANTS OF SINGLE-MINERAL ASSEMBLAGES

T. M. Seixas^{1,2}, M. A. Salgueiro da Silva^{1,2}

1 Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto

2 Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra, Av. Dr. Dias da Silva, 3000-134 Coimbra

E-mails: tmseixas@fc.up.pt, massilva@fc.up.pt

ABSTRACT

We describe a methodology for determination of optical constants of minerals from bidirectional reflectance spectra of single-mineral assemblages with experimentally measured grain size distribution.

INTRODUCTION

Hapke's radiative transfer theory [1] provides a complete framework for modeling reflectance spectra of minerals and intimate mixtures of minerals, as those forming asteroidal regoliths. Deconvolving reflectance spectra of intimate mineral mixtures to determine grain size and abundance of each component mineral is crucial to study the mineralogy of asteroids [2]. According to Hapke's theory, reflectance can be calculated provided measurement geometry, phase function, grain size, internal scattering coefficient and the wavelength-dependent optical constants (real and imaginary parts of refraction index) are known. In practice, however, this information is barely known and/or cannot be independently obtained with sufficient accuracy. Backward modeling of mineral radiative transfer properties from reflectance spectra of single mineral assemblages can be a solution to this problem [3-5]. In this work, we performed simulated annealing fits to visible/near-infrared reflectance spectra of single-mineral assemblages of varying nominal grain sizes to retrieve optical constants, phase function, internal scattering coefficient and grain size. Our results show that considering a grain size distribution has a major impact in improving fit quality. Other factors affecting fit results will also be identified and discussed.

REFLECTANCE MIXING MODEL

According to Hapke's radiative transfer theory [1], the radiance coefficient (r_c) of a mineral assemblage at a wavelength λ is given by:

$$r_c(i, e, g; \lambda) = \frac{w_{\text{mix}}(\lambda)}{4(\mu_0 + \mu)} \{ [1 + B(g)]p(g) + H(\mu_0)H(\mu) - 1 \} \quad (1)$$

where i, e, g are the incidence, emission and phase angles, respectively; $\mu_0 = \cos(i)$ and $\mu = \cos(e)$; $B(g)$ is the opposition effect function, $p(g)$ is the single particle phase function and $H(x)$ is the Chandrasekhar's isotropic H function; $w_{\text{mix}}(\lambda)$ is the albedo of the mixture. The albedo of a mineral mixture is a linear combination of the albedos of the component minerals weighted by their areal fractions (x_i):

$$w_{\text{mix}}(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i(\lambda)}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (2)$$

Albedos w_i are not, however, intrinsic properties of respective minerals, because they depend strongly on grain size (D). According to the equivalent slab approximation [1], for a mineral with complex refraction index $n+jk$:

$$w(D, \lambda) = S_E + \frac{(1-S_E)(1-S_I) \{ r_l + \exp[-2\sqrt{\alpha(\alpha+s)}D/3] \}}{1-r_l S_I + (r_l - S_I) \exp[-2\sqrt{\alpha(\alpha+s)}D/3]} \quad (3)$$

where S_E and S_I are, respectively, the external and internal surface reflection coefficients; r_l is the bihemispherical reflectance of a semi-infinite medium; α is the internal absorption coefficient and s is the internal scattering efficiency. These quantities are given by:

$$S_E \approx \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} + 0.05 \quad (3a)$$

$$S_I \approx 1.014 - \frac{4}{n(n+1)^2} \quad (3b)$$

$$r_l \approx \frac{1 - \sqrt{\alpha/(\alpha+s)}}{1 + \sqrt{\alpha/(\alpha+s)}} \quad (3c)$$

$$\alpha \approx \frac{4\pi n}{\lambda} \quad (3c)$$

For a single-mineral assemblage ($n = 1$) with a continuous grain size distribution (GSD) $N(D)$, we need to take into account this size dependence:

$$w_{\text{sma}}(\lambda) = \frac{\int_0^\infty N(D)D^2w(D,\lambda)dD}{\int_0^\infty N(D)D^2dD} \quad (4)$$

To avoid computational overload, we replace (D) by a histogram with n_b bins of width ΔD , obtaining

$$w_{\text{sma}}(\lambda) = S_E + \frac{(1-S_E)(1-S_I)}{\sum_{i=1}^{n_b} N(D_i)D_i^2} \left\{ r_l \sum_{i=1}^{n_b} \frac{N(D_i)D_i^2}{Z(D_i)} + \sum_{i=1}^{n_b} \frac{N(D_i)D_i^2 T(D_i)}{Z(D_i)} \right\} \quad (5)$$

where $T(D_i) \equiv \exp\left(-2\sqrt{\alpha(\alpha+s)}D_i/3\right)$ and $Z(D_i) \equiv 1 - r_l S_I + (r_l - S_I)T(D_i)$.

DETERMINATION OF COMPLEX REFRACTION INDEX

Using reflectance spectra $\{r_c^{(j)}; j = 1, \dots, n_s\}$ of n_s sample assemblages of the same mineral with different granulometries, it is possible to retrieve the mineral's intrinsic $k(\lambda)$ spectrum assuming that the real refraction index can be satisfactorily described by the relation $n(\lambda) = c_0 + c_1/\lambda$. For this purpose, we introduced some improvements in the method first presented in [4]. Avoiding computational overload and reducing minimization time requires a simplifying approximation to the form of the GSD function. We adopted the simplest two-bin (discrete bimodal) GSD:

$$N^{(j)}(D) = \delta\left(D - D_1^{(j)}\right) + \beta^{(j)}\delta\left(D - D_2^{(j)}\right) \quad (6)$$

The modified algorithm can be summarized as follows:

Step 0: Read reflectance $\{r_c^{(j)}; j = 1, \dots, n_s\}$ spectra.

Step 1: Initialize the mineral's real (n) refraction index parameters $\{c_0, c_1\}$, sample phase functions $\{p^{(j)}\}$, sample GSD parameters $\{D_1^{(j)}, D_2^{(j)}, \beta^{(j)}\}$, and sample internal scattering coefficients $\{s^{(j)}\}$.

Step 2: For samples $j = 1, \dots, n_s$, do:

Solve equation (1) for albedo $w_{\text{sma}}^{(j)}(\lambda)$

Solve equation (5) for $k^{(j)}(\lambda)$

Step 3: Calculate average $\bar{k}(\lambda)$:

$$\bar{k}(\lambda) = \frac{\sum_{j=1}^{n_s} k^{(j)}(\lambda)}{n_s}$$

Step 4: Calculate merit function:

$$\psi = \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{\lambda} \left[1 - \frac{k^{(j)}(\lambda)}{\bar{k}(\lambda)} \right]^2$$

Step 5: Adjust model parameters and repeat 2-4 to minimize ψ .

Steps 4-5 are implemented through simulated annealing. It should be remarked that minimizing the relative rather than the absolute (as in [4]) difference between $k^{(j)}(\lambda)$ and $\bar{k}(\lambda)$ has the advantage of preventing favouring low k -values.

APPLICATION EXAMPLE

For application of present method, we selected six single-mineral assemblages of clinopyroxene diopside, whose reflectance spectra are publically available in RELAB database [6]. Table 1 below shows sample's details.

Table 1. Details of the clinopyroxene diopside samples used in this study.

| # Sample | RELAB file | Mean grain size (μm) |
|----------|------------|-----------------------------------|
| 1 | C19921 | 22.5 |
| 2 | C19922 | 60.0 |
| 3 | C19923 | 100.0 |
| 4 | C19924 | 12.5 |
| 5 | C19925 | 44.0 |
| 6 | C19926 | 94.0 |

The original VIS-NIR reflectance spectra of the six chosen assemblages is shown in Figure 1 [7]. The corresponding albedo spectra, as calculated using optimized parameters, are plotted in Figure 2. The obtained k -spectra retrieved applying present method are shown in Figure 3. For comparison, we show also, in Figure 4, the k -spectra retrieved applying the method described in [4], where the GSD was not accounted for. The results show that incorporating a GSD in the model improves significantly consistency in the determination of k -spectrum, as can be seen in the smaller differences among the six $k^{(j)}(\lambda)$ curves.

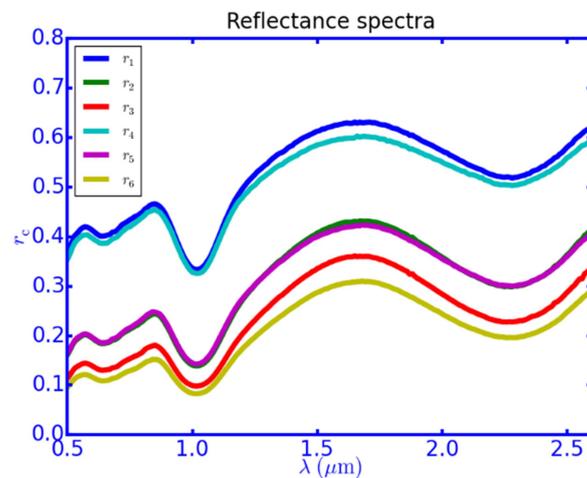


Figure 1. VIS-NIR reflectance spectra of six clinopyroxene diopside assemblages of different grain sizes.

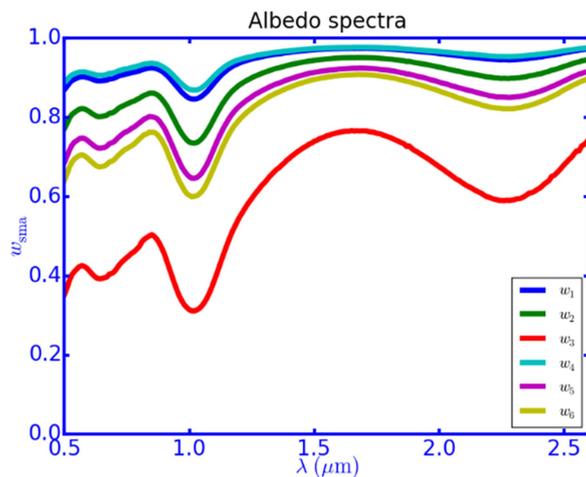


Figura 2. Albedo spectra obtained after parameter optimization.

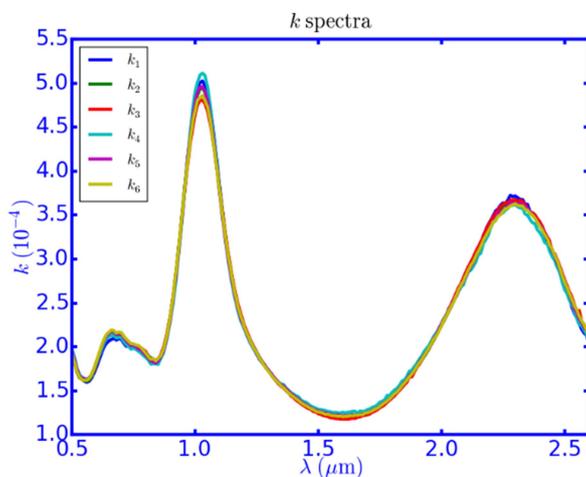


Figura 3. k -spectra retrieved applying present method.

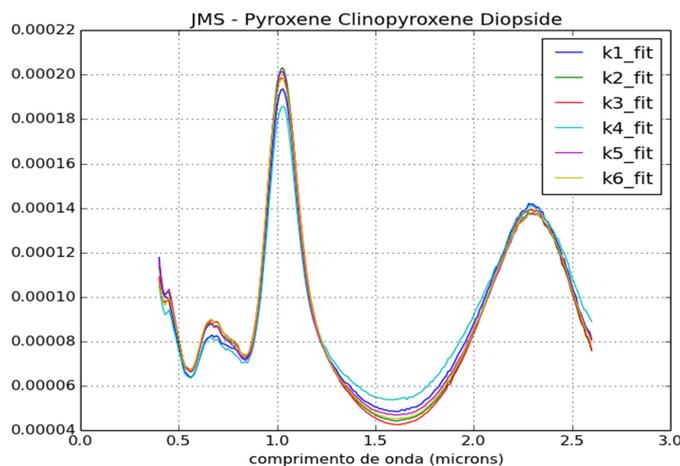


Figura 4. k -spectra retrieved applying the method described in [4].

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Our results show that incorporating a GSD in the reflectance model improves significantly consistency in the determination of the complex refractive index spectrum of single-mineral

assemblages. Moreover, if experimentally determined GSD is available, additional improvements are expected. Given the comparatively poor performance of the method described in [4], it is impossible to correctly model asteroidal regoliths based on k -spectra of component minerals without taking into account GSD information.

For low albedos (in the range $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ for the application example), equations for S_E and S_I are poor approximations. Therefore a finer calibration of S_E and S_I is required. Alternatively, we can parametrize the numerical coefficients involved in the equations for these coefficients. Another crucial step for accurate modelling of reflectance spectra of mineral assemblages is to compare k -spectra retrieved with the present method with direct experimentally determined k -spectra of single-mineral assemblages.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is financed by FCT through UID/Multi/00611/2013.

REFERÊNCIAS

- [1] Hapke, B.: Theory of reflectance and emittance spectroscopy, 2nd ed., Cambridge University Press, 2012.
- [2] Batista, S.F.A., Seixas, T. M., Sagueiro da Silva, M. A., Albuquerque, R. M. G., Planetary and Space Science, 104(B), 295-309, 2014.
- [3] Hiroi, T., & Pieters, C. M., J. Geophys. Res., 99(E5), 10867–10879, 1994.
- [4] Lucey, P. G., J. Geophys. Res., 103(E1), 1703–1713, 1998.
- [5] Lawrence, S. J., & Lucey, P. G., J. Geophys. Res., 112(E7), E07005, 2007.
- [6] This research utilizes spectra acquired by J. M. Sunshine with the NASA RELAB facility at Brown University.
- [7] Hunter J. D.: Matplotlib: A 2D graphics environment, Computing in Science & Engineering, 9(3), pp. 90-95, 2007.

QUANTIFICAÇÃO DE BIODIESEL EM COMBUSTÍVEL DIESEL MINERAL USANDO SENSORES EM FIBRA ÓTICA

André L. Almeida¹, Alexandra R. S. Ferreira¹, João S. Cabaço¹, José L. Santos¹, Luís Coelho¹, José M.M.M. de Almeida^{*1,2}

¹INESC-TEC e Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

²Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

*E-mail: jmma@utad.pt

RESUMO

O biodiesel é obtido a partir da transesterificação de triglicerídeos provenientes de óleos vegetais em ésteres metílicos usando um reagente (metanol) e um catalisador (hidróxido de sódio). É um combustível renovável e o seu uso permite reduzir as emissões na atmosfera não tendo compostos aromáticos. Pode ser utilizado em motores na sua forma pura (B100) mas requer modificações para evitar problemas de manutenção. As redes de período longo em fibra ótica são sensíveis ao índice de refração do meio envolvente. Apresentam-se neste trabalho como uma solução para a medição da concentração de biodiesel em combustíveis diesel derivados do petróleo.

INTRODUÇÃO

A presença do biodiesel [1] nos motores dos veículos é cada vez mais comum como alternativa aos combustíveis provenientes unicamente do petróleo. Porém, nem todos os motores dos vários fabricantes se encontram preparados para os vários tipos de mistura. A deteção precisa da concentração de biodiesel através de redes de período longo [2] é interessante dado que o índice de refração da mistura varia conforme a percentagem de biodiesel presente [3,4].

As redes de período longo (conhecidas por LPFG – *Long Period Fiber Gratings*) são produzidas através da introdução de uma modulação no índice de refração efetivo ao longo da fibra resultando no acoplamento de luz do núcleo para modos específicos da bainha (do inglês *cladding*). O resultado espectral em transmissão é o aparecimento de várias bandas de atenuação correspondentes a cada modo da bainha excitado. As características das bandas de atenuação dependem essencialmente do período da rede e dos índices de refração e que relacionam através da expressão:

$$\lambda = [n_{eff}(\lambda) - n_{clad}^i(\lambda)] \Lambda$$

em que λ é o comprimento de onda da banda de atenuação correspondente ao modo i , n_{eff} é o índice efetivo do modo fundamental, n_{clad}^i é o índice de refração do modo i da bainha da rede e Λ é o período da rede.

Os modos guiados na bainha têm um pequeno campo evanescente que interage diretamente com o meio externo alterando as suas propriedades espectrais para índices de refração distintos com elevada sensibilidade [5]. Com um ajuste apropriado das características espectrais é possível utilizar estas estruturas como dispositivos sensores da concentração de biodiesel em combustível diesel mineral.

MATERIAL E MÉTODOS

As redes são produzidas por descargas elétricas ânodo - cátodo distanciados de 1 mm, seguindo o método descrito em [6]. Estas descargas provocam um aquecimento local da fibra tornando-a maleável e que se estica quando sujeita a uma tensão constante, usando uma massa de 5g.

Repetindo-se o mesmo procedimento durante aproximadamente 45 descargas ao longo da fibra e separadas de 397 μm forma-se a rede de período longo.

Apesar da rede produzida ter uma elevada sensibilidade ao meio externo, esta depende do índice de refração. Quando o índice de refração do meio se aproxima do índice da bainha é necessário revestir a rede com uma camada fina de materiais transparentes com elevado índice de refração. Neste caso revestiu-se a rede com uma camada de alumínio (Al) numa câmara de vácuo com feixe de electrões tendo sido posteriormente oxidada num forno com 400°C numa atmosfera de ar dando origem a uma camada de 50 nm de óxido de alumínio Al_2O_3 .

A figura 1 representa uma rede de período longo revestida com o óxido quando colocada na montagem experimental de caracterização em transmissão que inclui a utilização de uma fonte de luz branca (BBS – *Broad Band Source*) e um analisador de espectros óticos (OSA – *Optical Spectrum Analyser*).

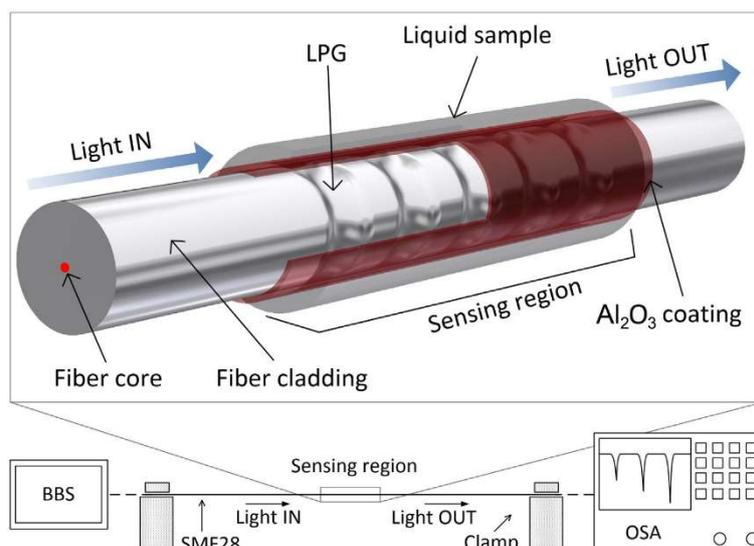


Figura 1. Rede de período longo em fibra ótica com revestimento em óxido de alumínio. Montagem experimental para medir o espectro de transmissão.

Foi adquirido gasóleo no mercado local, livre de biodiesel. A fabricação de biodiesel foi feita através de óleos vegetais, seguindo um processo de mistura com hidróxido de sódio (NaOH) e Metanol (CH_3OH). Deixando repousar esta mistura algumas horas, no fundo do recipiente deposita-se uma camada de glicerina e o fluido presente na parte superior é biodiesel. Com medidas precisas de volume fizeram-se misturas desde 0 a 75% v/v de biodiesel e armazenou-se as amostras num frigorífico ($\approx 7^\circ\text{C}$). Mediu-se o índice de refração dessas amostras num refractómetro de Abbe.

Colocaram-se dois LPFGs numa câmara de fluxo com dois orifícios para entrada e saída de fluidos, conforme ilustrado na Figura 2. Previamente cada LPFG foi unido a uma rede de Bragg (conhecidas por FBG – *Fiber Bragg Gratings*) para monitorização da temperatura. A mistura de biodiesel preparada foi injectada na camara com uma seringa ficando em contacto com ambas as redes, LPFG e FBG. Após a aquisição do espectro de transmissão com o OSA a mistura foi retirada e a camara limpa com etanol. O mesmo procedimento foi efectuado para as restantes misturas.

Para medir os espectros no OSA, fez-se incidir uma fonte luminosa de larga banda espectral (no infravermelho) e comparou-se, através de processo de normalização, a luz obtida em transmissão. Dependendo da mistura, ou seja, do índice de refração, há uma variação no comprimento de onda pico, bem como uma variação da sua amplitude. Os espectros adquiridos foram exportados para um programa de tratamento de dados.

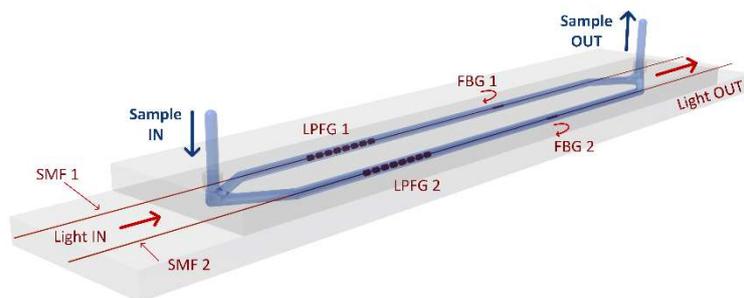


Figura 2. Câmara de fluxo com orifícios para entrada e saída de fluidos e para colocação de dois sensores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 observa-se uma clara dependência da variação em comprimento de onda da banda de atenuação em função da concentração. Existe também uma pequena variação da amplitude da banda de atenuação, em que se observa um pico bem definido para menores concentrações, tal que a ausência de biodiesel representa uma maior perda de potência ótica (-3.64 dB), a cor-de-laranja (⊖). Conforme a concentração de biodiesel da mistura aumenta, maior é a variação em comprimento de onda. Também se verifica que a atenuação é muito menor quando comparada com a obtida quando o meio envolvente é o ar.

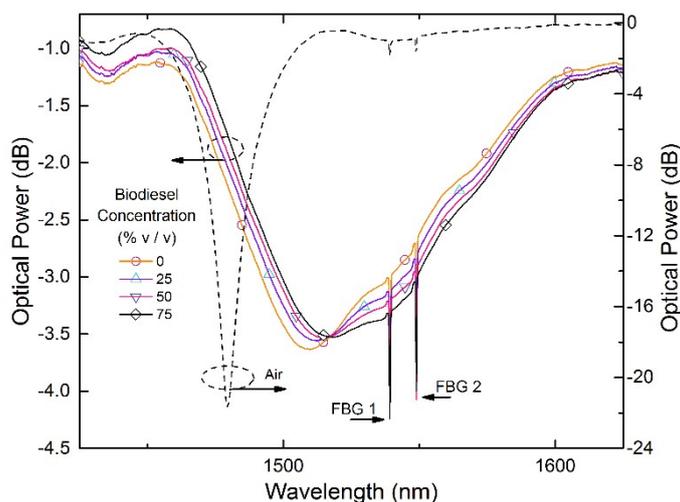


Figura 3. Espectros de transmissão da rede de período longo, para as várias misturas medidas.

A Figura 4 mostra a evolução das medições efectuadas em intervalos aproximadamente constantes, entre os 8 e 10 minutos, sendo este o tempo necessário para completar o processo de aquisição de espectros no OSA e que inclui a circulação de amostra no interior dos canais. Observa-se que para determinada concentração, ao longo do tempo as variações de comprimento de onda são bastante estáveis. Desta figura prevê-se uma evolução linear com a concentração de biodiesel, uma vez que a variação desta é constante (5 %).

Verifica-se claramente, pela Figura 5, que a variação em comprimento de onda da banda de atenuação é varia linearmente com a concentração de biodiesel presente na solução analisada. Por outro lado, pela Figura 6, também se verifica uma relação linear entre a concentração em causa e o índice de refração da mistura. Sendo a concentração uma variável comum torna-se assim possível relacionar o índice de refração e a variação em comprimento de onda.

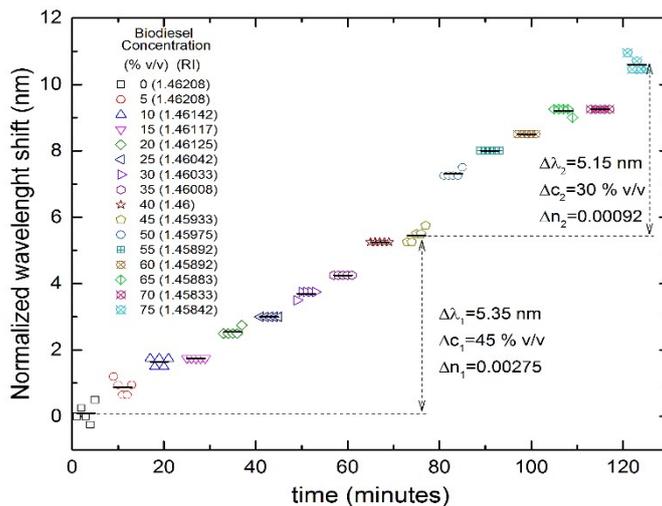


Figura 4. Posição normalizada do pico ao longo da evolução temporal de execução prática

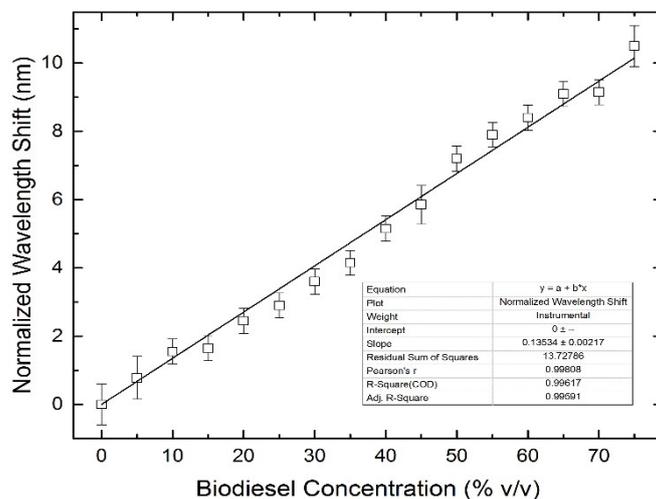


Figura 5. Posição relativa do pico da banda de atenuação em função da concentração de biodiesel.

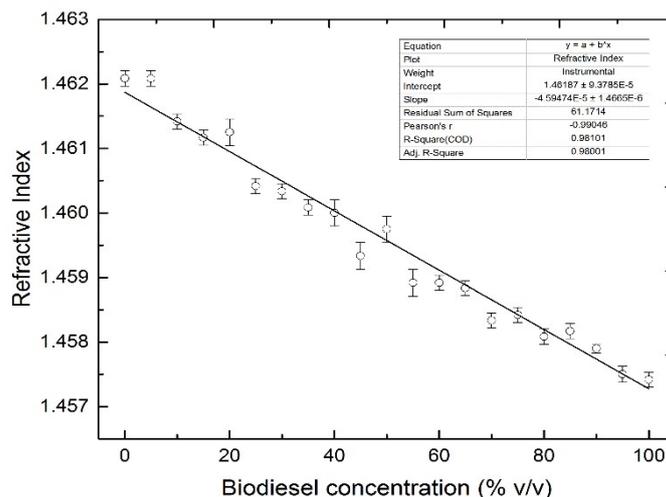


Figura 6. Índice de refração em função da concentração de Biodiesel, medido com refratômetro de Abbe.

CONCLUSÕES

Verificou-se que as redes de período longo em fibra ótica permitem medir índices de refração maiores do que os da bainha da fibra ótica, devido à deposição do filme de 50 nm de óxido de alumínio. Verificou-se ser possível caracterizar a concentração de biodiesel presente numa amostra de combustível, tendo como base a medição e determinação local do pico analisando p espectro em transmissão. Este método tem ainda a vantagem de fornecer a informação em tempo real, bem como permitir rápidas comparações. Em conclusão, verifica-se ser um método fiável, rápido e eficiente de se obter valores relativos à concentração de biodiesel.

AGRADECIMENTOS

"Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização – COMPETE 2020 no âmbito do projeto «POCI-01-0145-FEDER-006961» e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto UID/EEA/50014/2013".

REFERÊNCIAS

- [1] Kim, H.-J., et al., Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. *Catalysis Today*, 2004. 93–95: p. 315-320.
- [2] Coelho, L., D. Viegas, J.L. Santos, J.M.M.M. de Almeida, Enhanced refractive index sensing characteristics of optical fibre long period grating coated with titanium dioxide thin films, *Sens. Actuators B: Chem.* 202 (2014) 929–934.
- [3] Irina NITA, Sibel GEACAI, Anisoara NEAGU and Elis GEACAI, Estimation of the refractive index of diesel fuel+biodiesel blends. *Versita* 24, 2013: p. 24-26
- [4] Coelho, L., et al., Optical sensor based on hybrid FBG/titanium dioxide coated LPFG for monitoring organic solvents in edible oils. *Talanta*, 2016. 148: p. 170-176.
- [5] G. Rego, J. Santos, H. Salgado, Refractive index measurement with long-period gratings arc-induced in pure-silica-core fibres, *Opt. Commun.* 259 (2006) 598–602.
- [6] Coelho, L., et al., Fabrication and Characterization of Metal Oxide-Coated Long-Period Fiber Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 2016. 34(10): p. 2533-2539.

MONITORIZAÇÃO DA TRANSESTERIFICAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS USANDO REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRA ÓTICA

Alexandra R. S. Ferreira¹, André L. Almeida¹, João S. Cabaço¹, José L. Santos¹, Luís Coelho¹, José M.M.M. de Almeida*^{1,2}

¹ INESC-TEC e Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

² Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

*E-mail: jmma@utad.pt

RESUMO

A transesterificação de triglicéridos de óleos vegetais ou gorduras animais em ésteres metílicos usando metanol e hidróxido de sódio como catalisador permite obter biocombustíveis compatíveis com motores a diesel. No entanto, a evolução da reacção de transesterificação de triglicéridos depende da fonte de óleo ou gordura usada. Assim, é conveniente proceder à monitorização e o controlo da reacção em tempo real. As redes de período longo em fibra ótica são sensíveis à composição química e à temperatura do meio envolvente. Neste trabalho apresenta-se a monitorização da transesterificação de óleo vegetal utilizando redes de período longo em fibra ótica.

INTRODUÇÃO

Devido à crescente consciencialização ecológica, a procura de uma alternativa aos combustíveis fósseis tem-se intensificado dia após dia. Os biocombustíveis, sendo energias renováveis, surgem como soluções ao problema [1]. Dentro deste grupo encontra-se o biodiesel obtido por transesterificação de óleo vegetal usando metóxido de sódio, CH_3NaO .

No entanto, estes biocombustíveis podem não ser compatíveis com motores a diesel, sendo, portanto, relevante uma análise da composição do combustível em causa [2]. Esta análise é possível através de redes de período longo em fibra ótica (LPFG – Long Period Fiber Gratings) pois são sensíveis a variações do índice de refração do material que a envolve e, portanto, à constituição do combustível em análise [3].

A sensibilidade é devida à dependência do comprimento de onda e da amplitude da banda de atenuação com o índice de refração dos modos da bainha (cladding), que por sua vez são dependentes do material envolvente. Esta característica das fibras permite o uso de LPFGs na análise química e bioquímica de materiais.

É possível variar a banda espectral onde ocorre a banda de atenuação, pela alteração do período da rede de modo a ser compatível com os materiais em estudo, tendo em conta que o período da rede deve ser tal que o modo do núcleo e o modo da bainha estejam em fase para o comprimento de onda

$$\lambda = [n_{eff}(\lambda) - n_{clad}^i(\lambda)]\Lambda$$

em que n_{eff} é o índice de refração do modo de propagação no núcleo no comprimento de onda λ , n_{clad}^i o índice de refração do modo da bainha i e Λ o período do LPFG.

MATERIAL E MÉTODOS

As redes de período longo em fibra ótica são produzidas através de descargas eléctricas separadas por distâncias da ordem da fracção do milímetro, segundo o processo descrito em [3]. Este processo torna a fibra sensível a variações de índices de refração do material que a envolve, sendo que a luz que a atravessa sofre tanto espalhamento como absorção.

As redes de período longo foram posteriormente revestidas com um óxido de um metal na região da rede, conforme ilustrado na Figura 1, de modo a melhorar a sensibilidade a índices de refração superiores ao da bainha (1456 a 1550 nm). Neste caso foi utilizado óxido de alumínio Al_2O_3 , depositando alumínio na fibra por evaporação térmica e expondo-o a oxidação no ar a 400 °C.

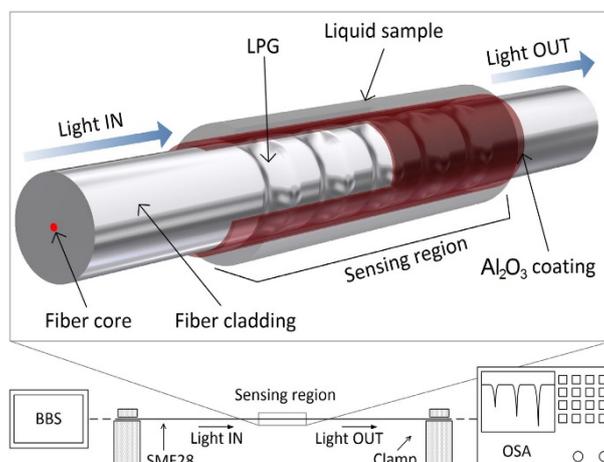


Figura 1. Estrutura de uma rede de período longo em fibra ótica com revestimento em óxido de alumínio. Montagem experimental para medir o espectro de transmissão.

Para a medição das perdas referidas, foi comparado espectro da luz antes e após a transmissão na fibra, utilizando um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*). Estes resultados foram posteriormente tratados num programa de análise de dados. Esta comparação foi realizada para diferentes misturas de CH_3NaO e óleo de girassol.

Iniciou-se a experiência com 500 mL de óleo de girassol adicionando-se, 10 mL de CH_3NaO em intervalos de 10 min até um total de 100 mL, sendo que o instante $t = 0$ corresponde a 10 mL de CH_3NaO na amostra. A constituição da mistura foi analisada periodicamente inserindo numa câmara de fluxo uma amostra (1 mL) de modo a cobrir as redes de período longo, conforme ilustrado na Figura 2. Foram também usadas duas redes de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Gratings*) para monitorizar a temperatura.

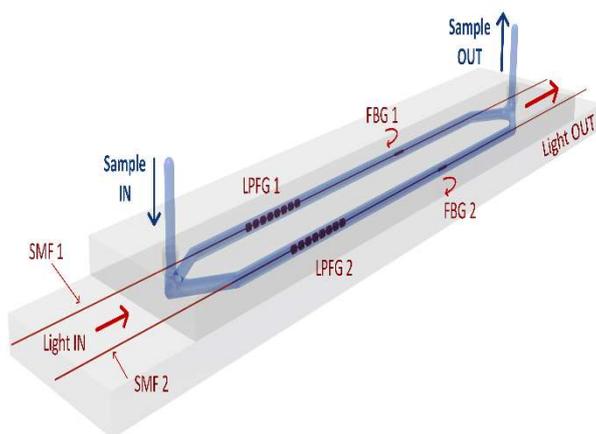


Figura 2. Montagem experimental usada para medir o espectro das redes de período longo quando em contacto com amostras de óleo vegetal e metóxido de sódio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 destaca-se uma variação linear do índice de refração da mistura em função da concentração de CH_3NaO , na gama de concentrações estudada. O índice da mistura diminuiu no decorrer da experiência, desde o valor 1,472 correspondente ao óleo de girassol puro. É evidente

que a partir de 100 mL de CH_3NaO , o índice de refração do composto não varia da mesma forma, passando a ter variações pequenas, o que indica que a mistura nesse ponto se trata de biodiesel.

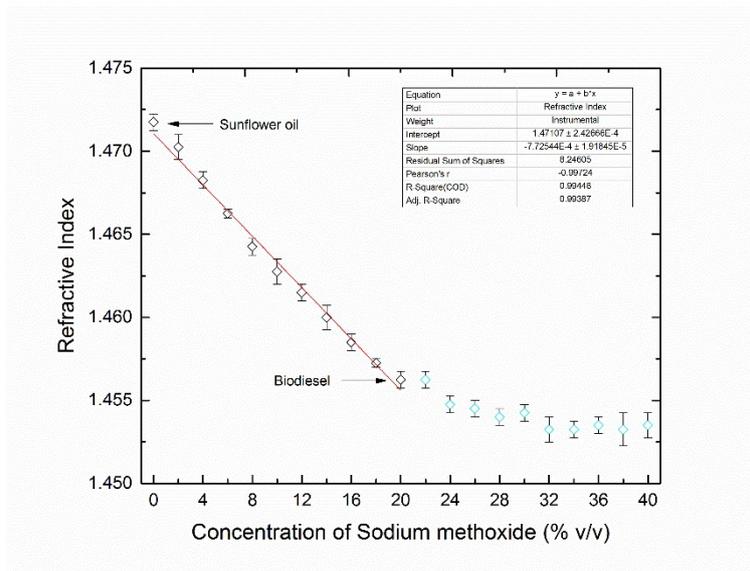


Figura 3. Índice de refração da mistura em análise em função da concentração de CH_3NaO .

A Figura 4 ilustra a clara dependência da variação de comprimento de onda e amplitude do pico em função da concentração de CH_3NaO . Conclui-se que a ausência de CH_3NaO resulta numa menor amplitude do pico ($\sim -6,8$ dB) e sua ocorrência num menor comprimento de onda (~ 1455 nm).

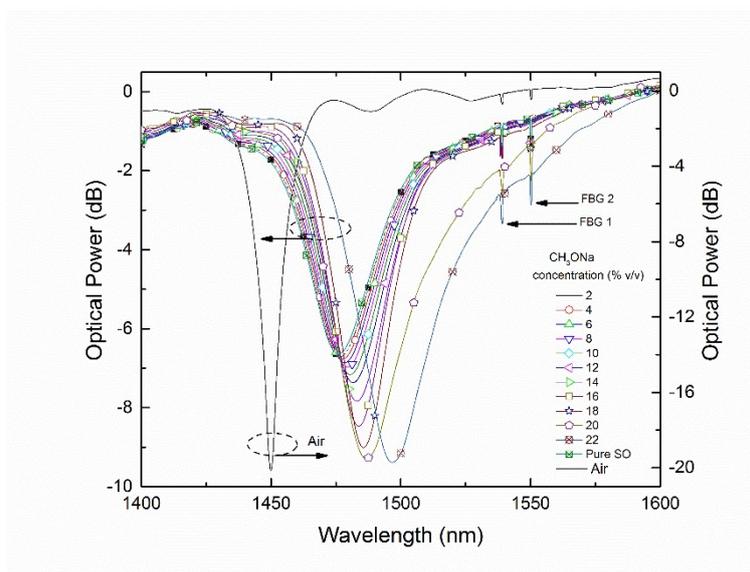


Figura 4. Espectros das redes de período longo em transmissão observadas as concentrações de CH_3NaO estudadas.

A Figura 5 ilustra a variação da banda de atenuação com a concentração de CH_3NaO . Esta variação é linear, tendo sido realizado um ajuste linear para a determinação da concentração de CH_3NaO a partir da variação de comprimento de onda da banda de atenuação da rede de período longo.

Para cada concentração foram adquiridos 5 espectros e é possível observar, na Figura 6, variação posição em comprimento de onda da banda de atenuação varia com o tipo de mistura medido, mantendo-se constante em intervalos de 10 minutos, durante os quais a concentração de

CH_3NaO não era alterada. Sendo assim, é possível relacionar o desvio em comprimento de onda da banda de atenuação com o índice de refração da mistura.

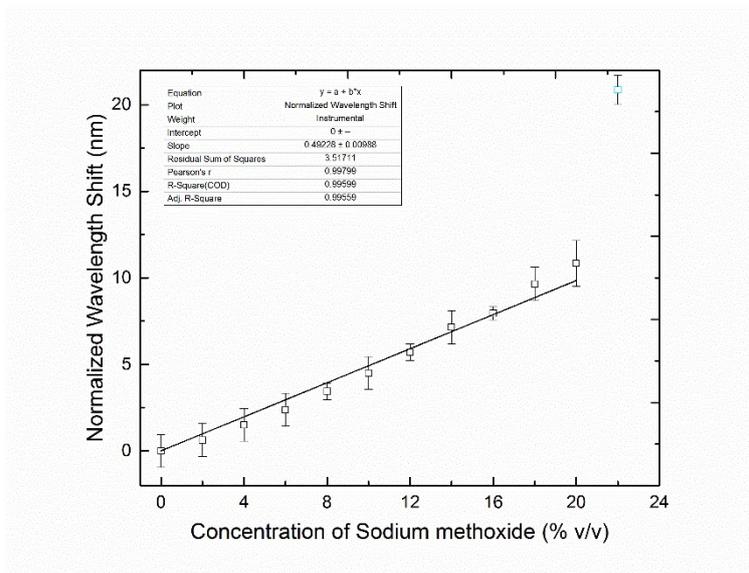


Figura 5. Variação do comprimento de onda do pico da banda de atenuação em função da concentração de CH_3NaO .

A partir da análise do gráfico na Figura 6 calculou-se ainda a resolução espectral, R , para dois índices de refração do meio envolvente da fibra ótica diferentes, tendo-se obtido uma resolução espectral melhor do que 0,79 %v/v (ou $5,7 \times 10^{-4}$ RIU).

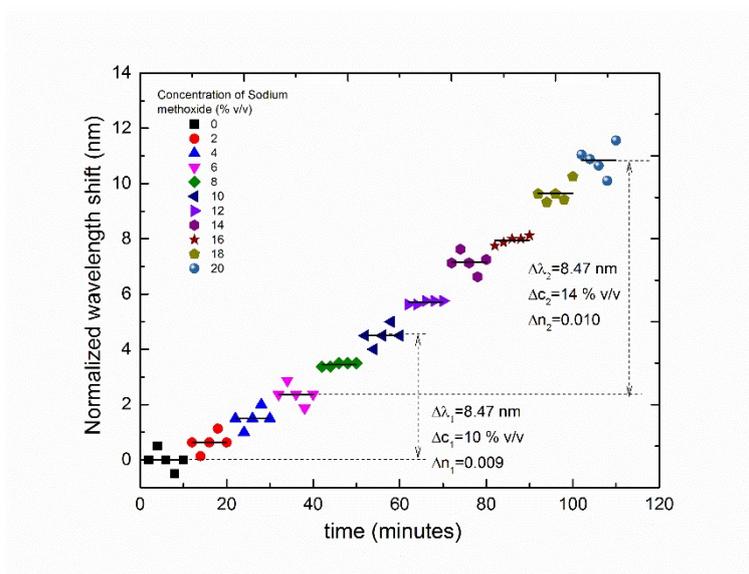


Figura 6. Variação temporal do comprimento de onda do pico da banda de atenuação em função da concentração de CH_3NaO .

CONCLUSÕES

Constatou-se que as redes de período longo com revestimento de Al_2O_3 , tiveram um bom comportamento na gama de índices de refração estudada. Concluiu-se ainda ser possível, em tempo real, monitorizar a formação de biodiesel, sendo suficiente medir a variação de comprimento de onda da banda de atenuação na zona de ressonância.

Tendo-se obtido uma resolução superior a 0,79 %v/v verifica-se que se trabalhou com sensores bastante sensíveis e que, portanto, se obtiveram resultados fiáveis e precisos. A sua

sensibilidade, aliada à facilidade de produção, revela que este sensor é uma boa ferramenta no estudo em tempo real de alterações na composição de determinadas substâncias.

AGRADECIMENTOS

"Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização – COMPETE 2020 no âmbito do projeto «POCI-01-0145-FEDER-006961» e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto UID/EEA/50014/2013".

REFERÊNCIAS

- [1] Kim, H.-J., et al., Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst. *Catalysis Today*, 2004. 93–95: p. 315-320.
- [2] Singh, S.P. and D. Singh, Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010. 14(1): p. 200-216.
- [3] Coelho, L., et al., Fabrication and Characterization of Metal Oxide-Coated Long-Period Fiber Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 2016. 34(10): p. 2533-2539.
- [4] Coelho, L., D. Viegas, J.L. Santos, J.M.M.M. de Almeida, Enhanced refractive index sensing characteristics of optical fibre long period grating coated with titanium dioxide thin films, *Sens. Actuators B: Chem.* 202 (2014) 929–934.
- [5] Coelho, L., et al., Optical sensor based on hybrid FBG/titanium dioxide coated LPFG for monitoring organic solvents in edible oils. *Talanta*, 2016. 148: p. 170-176.

APLICAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO EM FIBRA ÓTICA À QUANTIFICAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ETANOL EM GASOLINA

João S. Cabaço¹, Alexandra R. S. Ferreira¹, André L. Almeida¹, José L. Santos¹, Luís Coelho¹, José M. M. M. de Almeida^{*1,2}

¹ INESC-TEC e Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre 687, 4169-007 Porto, Portugal

² Departamento de Física, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

*E-mail: jmma@sapo.pt

RESUMO

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos, volátil e inflamável, com propriedades que explicam a sua aplicabilidade como fonte de energia. A inclusão de etanol na gasolina tem algumas vantagens das quais se destacam o aumento do índice de octanas e o melhor desempenho termodinâmico em motores de combustão. A eficiência da combustão depende da exacta proporção de etanol na gasolina, no entanto, o combustível pode ser ilegalmente modificado a fim de maximizar o lucro. Neste trabalho sensores em fibra ótica baseada em redes de período longo, foram aplicados como transdutores de índice de refração para medir concentração de etanol em misturas etanol-gasolina.

INTRODUÇÃO

Uma das motivações para a realização deste estudo foi a de se ter tornando prática comum em países como o Brasil e os Estados Unidos, entre outros, a utilização de misturas de etanol com gasolina [1] de forma a produzir combustível de modo menos dispendioso. No entanto, em termos de eficiência de combustão o etanol é aproximadamente 33% menos eficiente de que a gasolina. Um dos problemas verificados na distribuição comercial destas misturas é a de algumas empresas ultrapassarem as percentagens permitidas por lei. Encontram-se na literatura estudos que referem ser comum encontrar valores bastante acima dos recomendados pela legislação em vigor. Tendo em conta esta prática, tornou-se interessante conseguir medir de forma rigorosa a concentração de etanol presente em amostras de gasolina.

Neste trabalho utilizaram-se redes de período longo em fibra ótica (LPFG – *Long Period Fiber Gratings*), para proceder a esta quantificação [2]. Estas redes podem funcionar como sensores, detectando deformações, temperatura, concentrações, entre outras propriedades.

Na Figura 1, ilustra-se o que acontece aos modos guiados quando se propagam no interior da rede. A luz é acoplada desde o modo fundamental do núcleo (*core*) para modos da bainha (*cladding*), onde é perdida devido a absorção e espalhamento. Este acoplamento tem uma forte dependência com o comprimento de onda e com o índice de refração efectivo, sendo por isso possível obter uma perda espectralmente selectiva. Estes modos da bainha ficam confinados pois o índice de refração é maior do que o meio que os rodeia. As redes de período longo são aparelhos intrínsecos que permitem controlo sobre propriedades da luz que se propaga no interior de uma fibra, sendo utilizados como filtros espectrais, compensando a dispersão. A sensibilidade das suas propriedades a perturbações nas fibras pelas condições do meio em que se inserem tem levado a um estudo extensivo da sua utilização como sensores.

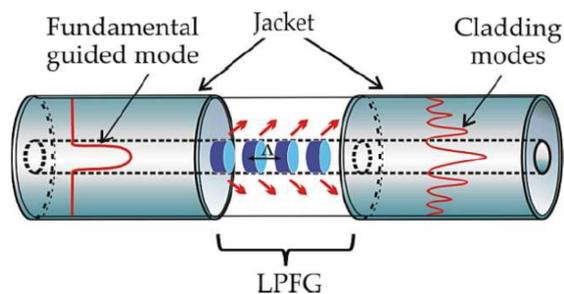


Figura 1. Ilustração do princípio de funcionamento da rede de período longo em fibra óptica.

MATERIAIS E MÉTODOS

As redes de período longo foram produzidas pela técnica do arco eléctrico, descrita em Rego et al [4], em fibra monomodo (SMF28, Corning, Inc). O período da rede é de $396 \mu\text{m}$, valor escolhido para originar uma banda de atenuação a $1.55 \mu\text{m}$, correspondente ao modo de ordem 6 da bainha, LP_{16} . Uma camada de $30 \pm 1.3 \text{ nm}$ de espessura de alumínio foi produzida em volta da zona da rede por evaporação térmica por feixe de elétrons seguida de oxidação numa atmosfera de ar a $400 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 2. Este revestimento tem como objectivo melhorar a sensibilidade do sensor para a gama de índices de refração das misturas em estudo.

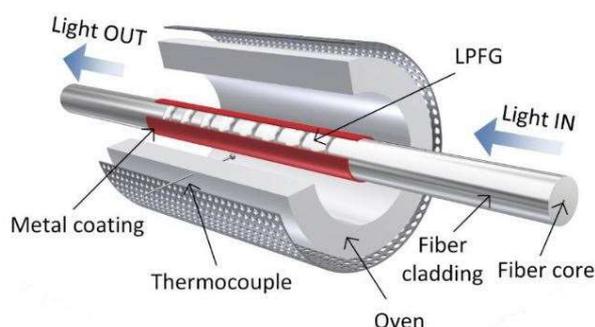


Figura 2. Forno utilizado para oxidação do filme de alumínio.

O revestimento metálico reduz a amplitude das bandas de atenuação. Quando o processo de oxidação se inicia, este efeito diminui e as bandas de atenuação aumentam. A montagem experimental que se utilizou para medir as amostras encontra-se esquematizada na Figura 3, tendo-se utilizado um analisador de espectros óticos (*OSA - Optical Spectrum Analyzer*) para a aquisição dos espectros das redes em transmissão.

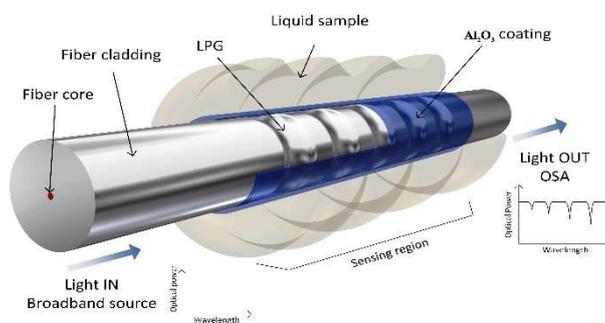


Figura 3. Esquema do princípio de funcionamento da montagem experimental para medir os espectros das redes em transmissão.

A caracterização das misturas de etanol com gasolina foi efetuada através da medição dos índices de refração de cada uma das amostras com um refratômetro de Abbe e relacionadas com a resposta espectral das redes de período longo quando inseridas em casa uma das amostras. Para isso utilizou-se a câmara com microcanais representada na Figura 4. As fibras foram colocadas sob tensão no interior dos canais de forma a evitar possíveis curvaturas e as amostras foram posteriormente injetadas para o interior com um fluxo constante. O processo repetiu-se para todas as amostras estudadas e efetuou-se a aquisição do espectro da rede em transmissão com o OSA. Entre cada amostra os canais foram limpos com etanol para evitar contaminação e reestabelecer as condições iniciais.

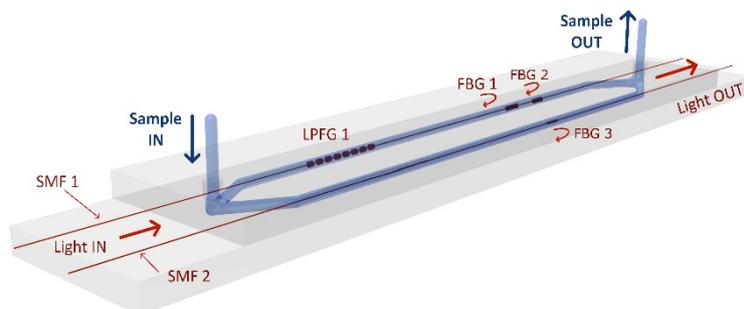


Figura 4. Estrutura da montagem experimental para colocar as misturas em contacto com os sensores.

Uma vez que as redes de período longo também exibem sensibilidade a variações térmicas, devido essencialmente ao coeficiente de expansão térmica da sílica, foram acopladas algumas redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*) que têm a vantagem de apresentar elevada sensibilidade à temperatura, mas não ao índice de refração externo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 pode-se observar o índice de refração em função da concentração de etanol presente. Este vai diminuindo para valores crescentes da concentração de etanol, pois o índice é maior para a gasolina (1.458) do que para o etanol (1.361). Fazendo um ajuste linear aos dados representados na Figura 5, calcularam-se os coeficientes representados do canto superior da figura. Conclui-se que a concentração de etanol pode ser monitorizada de forma indireta através da medição do índice de refração da mistura e que alteram as características espectrais da banda de ressonância da rede de período longo.

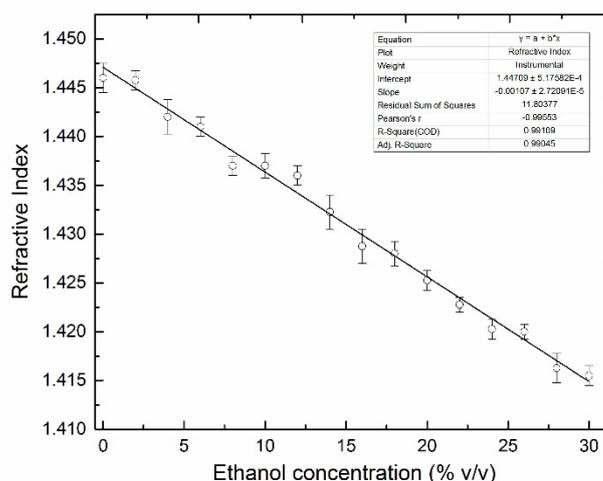


Figura 5. Índice de refração como função da concentração de etanol em % v/v.

Para a análise da variação do comprimento de onda representa-se na Figura 6 o espectro da banda LP₁₆ da rede. Estes dados foram sujeitos a um filtro FFT (*Fast Fourier Transform*) de forma a atenuar o ruído. À medida que o índice de refração diminui, a banda LP₁₆ exhibe um desvio para o vermelho.

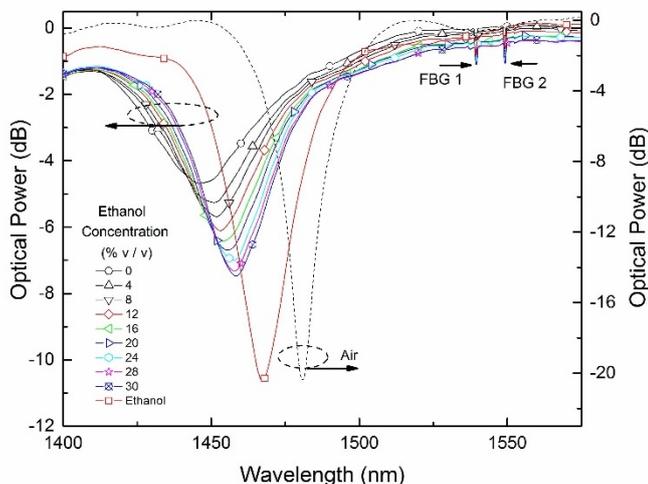


Figura 6. Potência ótica como função do comprimento de onda observado em transmissão nas amostras de gasolina-etanol.

Na Figura 7 observa-se a variação do comprimento de onda transmitido através da rede quando a concentração de etanol aumenta. A linha contínua é um ajuste linear dos dados experimentais. Por último, na Figura 8 representa-se a variação de comprimento de onda, mas agora em função do tempo. Podem-se observar que, mesmo em grupos da mesma amostra há algumas variações nos valores observados, daí a importância de considerar um número razoável de medições. Através dos dados aqui representados, calculou-se a resolução espectral, R , considerando valores obtidos de duas medidas diferentes relacionadas com dois valores diferentes do RI exterior, obtido pela relação $R = \frac{\sigma}{S_{RI}} = \frac{\delta n}{\delta \lambda} \sigma$, em que δn diz respeito à diferença entre RI, S_{RI} é a sensibilidade das variações de RI e $\delta \lambda$ a diferença no comprimento de onda da banda de ressonância, e σ ao desvio padrão associado ao maior espalhamento dos valores obtidos. Tendo em conta os valores experimentais, obteve-se uma resolução espectral melhor do que 0.23 %v/v ou $2.2 \times 10^{-4} RIU$.

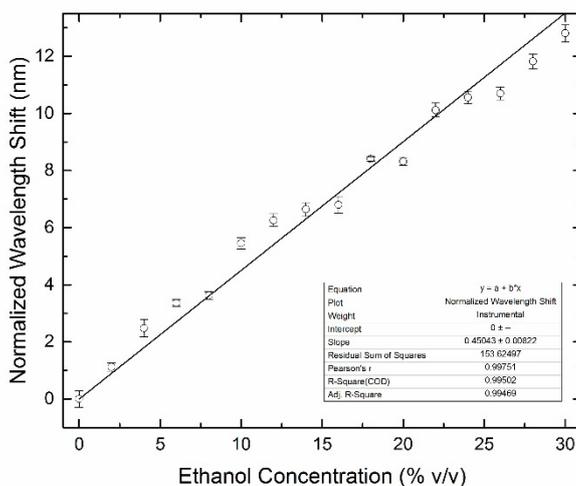


Figura 7. Variação do comprimento de onda da banda de atenuação em função da concentração nas nossas amostras.

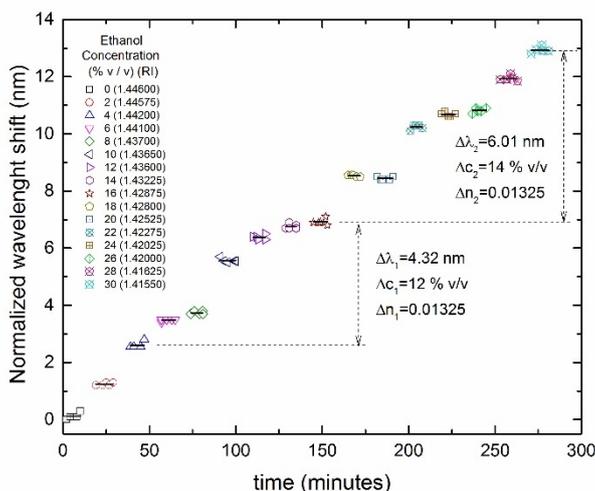


Figura 8. Variação no tempo do comprimento de onda da banda de atenuação como função da concentração de etanol nas nossas amostras.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível atingir resultados interessantes verificando-se que uma rede de período longo com revestimento de Al_2O_3 permite analisar líquidos com um índice de refração numa gama definida. Para ilustrar a aplicabilidade destes sensores mediram-se as concentrações de misturas de gasolina com etanol. Este sensor é relativamente fácil de produzir, utilizando técnicas simples e de baixo custo, tornando-se uma forma eficaz de monitorizar em tempo real índices de refração de misturas do tipo apresentado neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

"Este trabalho é financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização – COMPETE 2020 no âmbito do projeto «POCI-01-0145-FEDER-006961» e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projeto UID/EEA/50014/2013".

REFERÊNCIAS

- [1] Niven, R.K., *Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 9(6): p. 535-555, 2005.
- [2] Coelho, L., et al., *Optical sensor based on hybrid FBG/titanium dioxide coated LPFG for monitoring organic solvents in edible oils*. Talanta, 148: p. 170-176, 2016.
- [3] Coelho, L., D. Viegas, J.L. Santos, J.M.M.M. de Almeida, Enhanced refractive index sensing characteristics of optical fibre long period grating coated with titanium dioxide thin films, Sens. Actuators B: Chem. 202, 929–934, 2014.
- [4] G. Rego, J. Santos, H. Salgado, Refractive index measurement with long-period gratings arc-induced in pure-silica-core fibres, Opt. Commun. 598–602, 259, 2006.

EPICS-CSS BASED FRAMEWORK FOR THE IST BPLASMA EXPERIMENT

Bernardo B. Carvalho¹, Pedro Lourenço¹, João Fortunato¹, Tiago Pereira¹, Horácio Fernandes¹

¹ Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
E-mail: bernardo.carvalho@tecnico.ulisboa.pt

ABSTRACT

Outdated or closed proprietary control and data acquisition solutions for physics experimental facilities frequently tend to limit the possibility of introducing new operating modes and functionalities or even readapt existing ones. The use of open source frameworks provide a valuable and reliable solution to refurbish laboratory experiments on limited budgets. EPICS framework was used in the development of a robust and upgradable control and data acquisition system for the IST Beam-Plasma experimental setup which was based on a obsolete fully analog platform. The implemented solution allowed to perform hardware control under supervisory or automation modes, acquire digitally and record diagnostics signals and make them available throughout the network. Both local and distributed remote operation are possible since the human machine interface can be deployed on any machine connected to the laboratory network. This interface was implemented using the SNS version of CS-Studio, having successfully enabled operation and live data visualization on a user friendly and expandable environment. Finally, several operation trials conducted have shown that reproducibility of experimental conditions and results were much improved as a product of this upgrade.

1 INTRODUCTION

The operation of scientific devices requires that both setup and CODAC systems enable to introduce new functionalities or to update those that already exist. Limitations arise when the systems are based on closed development environments or even on outdated platforms that are no longer supported. A viable and affordable solution to these impairments is to use open source frameworks and standardized communication protocols.

The IST Beam-Plasma experimental setup consists on a cylindrical interaction chamber with a diameter of 80mm and a length of 750 mm[1]. By using a dual stage rotary and a turbo molecular pump it is possible to achieve a background pressure of 10^{-6} mbar. A noble gas is then injected rising the pressure to the operation regime which lies between 10^{-4} to 10^{-2} mbar. An electron beam produced by an incandescent filament under a high voltage accelerating potential interacts with the gas, creating a plasma column along the chamber, with temperatures up to 10eV[1]. The IST Beam-Plasma is equipped with three key diagnostics: Electrostatic probes, microwave resonant cavity and a movable interferometer working on the VHF band. The experiment operation was limited due to a non integrated control system based on outdated technology such as the full analog acquisition system which prevented digital data processing and archiving. Also, several actuators and sensors presented were presenting faulty behaviour due to ageing. In order to overcome these impairments, it was required to find an adequate solution to upgrade the control and data acquisition system of the device.

2 CODAC SYSTEM

The new CODAC framework was developed and implemented on the experiment according to requirements and it is divided into three sections: the embedded microcontroller control and data acquisition boards providing direct interface with actuators, sensors and diagnostics while performing real-time control operations; the Host Linux PC running EPICS IOC (Input-Output Controller) application and CS-Studio Archive Engine constituting the core of the CODAC framework; the operator interface, running on a separate machine and connected to the Host PC using the lab Ethernet network. This is exemplified on Figure 2.

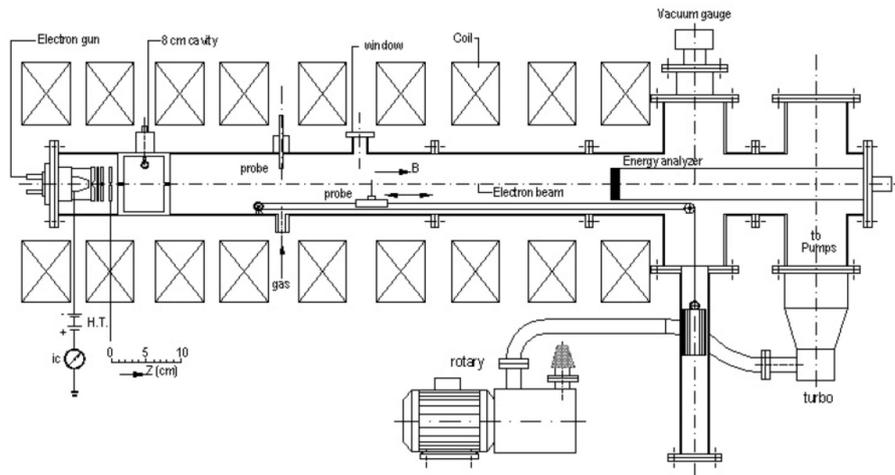


Figura 1: Overall cross section diagram of the IST Beam-Plasma apparatus. Adapted from on reference[1].

2.1 HARDWARE INTERFACING

For this application, two separate microcontroller boards[3] were used, one for control and the other for data acquisition. Each is fitted with a different Microchip dsPIC30F family microcontroller[2] and a custom designed expansion card with the specific electronics to perform the assigned functions. All the firmware, main boards and expansion cards were designed on site.

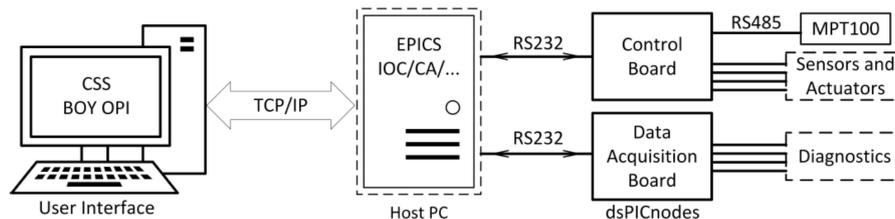


Figura 2: Block diagram of CODAC system description using. Control and data acquisition boards perform the interfacing with the hardware of the experiments, including actuators and sensors, while the Host PC which contains the core of the CODAC system based on the EPICS framework. The user interface is provided by a separate machine, connected using the Lab Ethernet Network.

The dsPIC30F4011 has specific modules that are suitable for the control of the apparatus, such as, the Quadrature Encoder employed in the interface with the movable probe position encoder and the 10-bit ADC which is adequate to acquire the turbo pump rotation and the current on the coils. Conversely, the dsPIC30F4013 has a 12-bit ADC, giving higher resolution to acquire the signals from the diagnostics electronics. This way, control and control related acquisition tasks are performed separately from the diagnostic's data acquisition. These are connected to the Host PC using serial RS-232 communication at a baud-rate of 115200 bit/s through the dsPIC UART2. A Pfeiffer Vacuum MPT100 gauge is also connected to the control board using RS-485 communication at a 9600 bit/s baud-rate on UART1. The firmwares were designed so each board can receive configuration commands from the EPICS IOC, report data and configured parameters, as long as to perform the required tasks. Apart from pressure, probe position and diagnostics acquisition triggering, all the remaining parameters are subject to supervisory control.

Given that the characteristic times of the apparatus fall into the seconds timescale, the microcontrollers running at 30MIPS can perform real-time operations without difficulty. This is the case of the control firmware, which presents a closedloop control cycle PID algorithm to control the gas pressure inside the chamber in the operating range, according to a configurable set-point. Synchronization of the PID algorithm was achieved using microcontroller interrupt

routines, enabling a closed control loop of 100ms. Moreover, the tuning of the PID algorithm was made based on step response and Ziegler-Nichols method[4].

The interferometry diagnostic is strongly dependent on the correct driving and position tracking of the movable probe. It was automated using a Finite State Machine on the firmware that covers the configurations used during the experiments, including sweep, reset and calibration modes. The position of the probe is determined using a position encoder, allowing a resolution of 0.192mm. During a sweep along the interaction chamber, the control board sends a trigger signal to the acquisition board on each encoder position change which happens in intervals of approximately 50ms. The acquisition microcontroller will then sample the input signal from this diagnostic and send it to the Host PC along with an acquisition index number. This way, it becomes possible to track the exact position where a specific measurement was made.

For the resonant cavity, the triggering is based on the reference signal of the microwave oscillator. The sweep oscillator provides a sawtooth shaped reference output voltage where the minimum and maximum correspond to the left and right limits of the swept range, respectively. When set to cavity mode, the acquisition microcontroller tracks the reference at 1ksps until it reaches zero. Then it activates the time-triggered acquisition of the four input channels assigned to the diagnostic. A total of 1000 samples of each channel are acquired at a sample rate of 125sps. As before the data is transmitted directly after each acquisition.

2.2 CODAC INTEGRATION

CODAC integration was achieved through the Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) framework which provided the supervisory control and the Input/Output Controller (IOC), asynDriver and Channel Access (CA) modules employed in this application. IOC Process Variables (PVs) were defined for all the system parameters and separated between raw and processed values, using the available records[6]. The severity alarm limits were defined in the critical records, as well as archive dead-bands and operation limits. Although all records were made available through the network using the configured CA module, only the processed variables were stored on the Record Database (RDB)[7] using the CS-Studio Archive Engine. Also, the built-in webserver provides fundamental information on the engine such as archive channel status and last received values[7].

The serial communication between boards and IOC was implemented using StreamDevice support[5] and a developed communication protocol of I/O messages. It was designed to be as simple as possible and to take into account the limited baud-rate available.

2.3 OPERATOR INTERFACE

The Graphical User Interface (GUI) was developed using the SNS distribution of Control System Studio (CS-Studio) 4.1.1 and consists on BOY a Operator Interface (OPI), containing operation controls and variable monitors corresponding to the PVs present on the IOC. As previously mentioned, this setup runs on a separate computer connected to the Ethernet network of the facilities. The OPI Runtime was configured to access the IOC/CA and the RDB running on the local-host through fixed IP. A sample picture of an early test version of the panel is displayed on Figure 3. Using the Data Browser[7] available on this tool, it becomes possible to observe the diagnostics data being recorded into the RDB and export the data in *.txt*, *.csv* or *.m* files for posterior analysis and processing. This approach provided the possibility to monitor the setup remotely and also operate it on the laboratory.

2.4 EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental data acquired with the CODAC system is stored on the RDB during the execution of the experiment and is made available for posterior analysis. Therefore, it is possible to access the data base through the internet and download data from previous experiments. This means that the operators may export data either during or after the experiment. On figure 4 it is possible to observe sample signals from the microwave resonant cavity.

Both diagnostic techniques aim for the determination of the electron plasma density. The presence of the plasma will induce a shift on the resonance frequency of the cavity which is proportional to the density of the plasma. On the other hand, interferometry sweeps along the plasma column produce a standing wave pattern dependent on the density and frequency imposed to the system, allowing to recover the dispersion relation for electron plasma waves for frequencies below plasma frequency. Fitting the corresponding expression, one may determine the plasma frequency and consequently the electron density of the plasma. Results from both diagnostics are consistent and for normal operation conditions fall into the 10^8 to 10^9 cm^{-3} density range. On figure 4 it is possible to observe sample raw signals from the microwave resonant cavity.

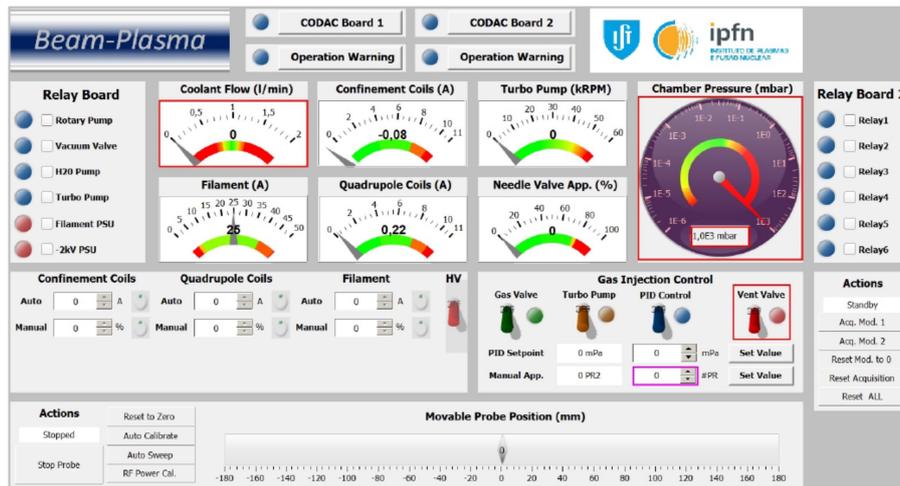


Figure 3: Graphical Operator Interface developed in CS-Studio providing a centralized perspective over the relevant parameters of the apparatus.

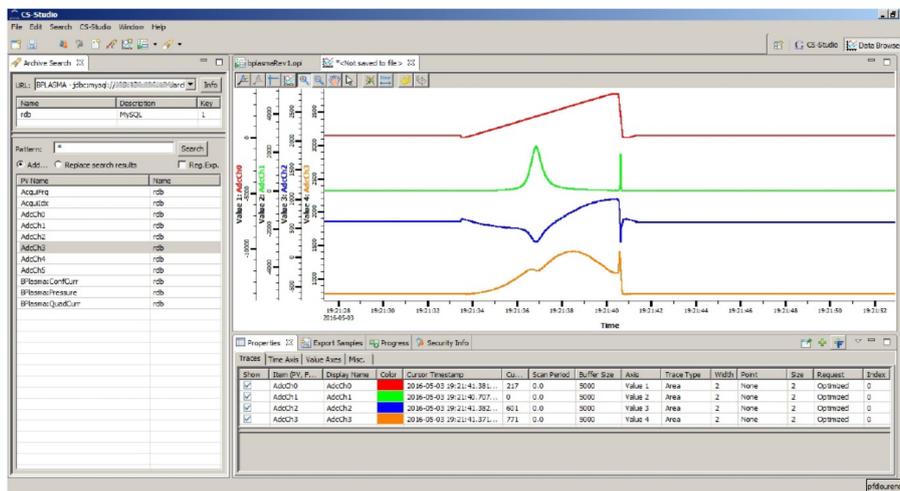


Figure 4: Browsing and exporting resonant cavity data from the RDB using the CS-Studio Data Browser as a practical interfacing tool.

3 CONCLUSIONS

The implementation of this framework empowered the operator with the capability of controlling the experimental setup and to retrieve the experimental data from the diagnostics. Moreover, upgrading the setup ensured that conditions of reproducibility and operation reliability are met through the robust solution here implemented based on EPICS and CS-Studio. It allowed to perform automated or supervisory based operations as well as to collect experimental data, having largely improved user experience. Besides being easily portable into other similar applications, this approach opened the possibility of adding new features to the

setup in the near future. Finally the students performing the renovated lab experiments were showing with a much improved attitude while exposed to a modern and user friendly interface.

REFERÊNCIAS

- [1] Cabral, J., Varandas, F., Suppression of the electron cyclotron instability of a beam-plasma system by selective cyclotron damping. *Plasma Physics* 22, 893{921, 1980.
- [2] dsPIC30F Family Reference Manual, Microchip Technology Inc., 2006.
- [3] IPFN Instrumentation Boards, <http://metis.ipfn.ist.utl.pt/CODAC/Instrumentation/Boards>, accessed on November 2015.
- [4] Bennett, S., *Real-Time Computer Control*, 2nd Ed., Pearson, 1994.
- [5] Zimoch, D., *StreamDevice 2*, <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>, accessed on November 2015.
- [6] EPICSwiki Argonne National Laboratory, *EPICS 3-14 Record Reference Manual*, 2014, https://wiki-ext.aps.anl.gov/epics/index.php/RRM_3-14, accessed on November 2015.
- [7] Kasemir, K., Carcassi, G., *Control System Studio Guide: For installers and maintainers of CS-Studio*, Oak Ridge National Laboratory, 2016.

PARTE III – 26º ENCONTRO IBÉRICO
PARA O ENSINO DA FÍSICA

“LUX MIRABILIS”, UMA CELEBRAÇÃO DA LUZ

Marisa L. Monteiro¹, Manuel B. Marques²

¹ Museu de História Natural e da Ciência da Universidade do Porto, Praça Gomes Teixeira 4099-002 Porto, Portugal

E-mail: mmonteiro@reit.up.pt

² Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e INESC TEC, Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto, Portugal

E-mail: mbmarque@fc.up.pt

RESUMO

Em 2015 celebrou-se o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias a ela associadas. No âmbito das comemorações, decorreu entre 15 de dezembro de 2015 e 17 de abril do corrente ano a exposição “Lux Mirabilis”, organizada pelo Museu de Ciência da Universidade do Porto, em parceria com o Museu Nacional de Soares dos Reis. Socorrendo-se dos acervos históricos de várias instituições e de alguns módulos criados propositadamente, a exposição contemplou os seguintes temas: a Luz na Natureza, a Luz Simbólica, Produzir Luz, a Ciência da Luz, a Luz na Ciência, Luz e Imagem e Luz e Visão.

INTRODUÇÃO

De entre todas as iniciativas da Universidade do Porto no âmbito das comemorações do Ano Internacional da Luz, aborda-se aqui a realização da exposição Lux Mirabilis, da responsabilidade do Museu de Ciência. Foi originalmente desenhada para o edifício da Reitoria da Universidade, mas o agendamento de obras de grande envergadura na área dos museus inviabilizou esta opção. Viria a ser realizada no Museu Soares dos Reis, em parceria com o mesmo. Inaugurada a 15 de dezembro do Ano da Luz, tinha encerramento previsto para 27 de março deste ano, vindo a ser prolongada por mais 3 semanas.

ESTRUTURA E COMUNICAÇÃO

Diversas entidades da Universidade do Porto participaram no seu financiamento – a Reitoria, a Faculdade de Ciências, a Faculdade de Engenharia e o Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências – bem como o INESC-TEC, num total que ascendeu a cerca de 75 mil euros. Contou ainda com o apoio de infraestruturas do Museu de Soares dos Reis, tais como a vigilância da sala e o seguro das peças.

Dada a natureza abrangente desta temática, as 175 peças individuais, montagens ou módulos interativos incorporados na exposição tiveram diferentes origens, sendo que a contribuição mais significativa esteve a cargo dos museus de Ciência e de História Natural que detêm as coleções históricas da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (tabela 1).

Tabela 1. Distribuição das peças de acordo com a proveniência

| Instituição | Número | Instituição | Número |
|-----------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|
| M. Ciência [UP] | 67 | M. História Natural [UP] | 57 |
| M. Nac. Soares dos Reis | 15 | Coleções particulares | 15 |
| Instituto Geofísico [UP] | 5 | M. Inst. Superior Engenharia Porto | 4 |
| M. Fac. Engenharia [UP] | 3 | Fundo Antigo [UP] | 3 |
| Associação Atractor | 2 | Dep. Fís.&Astron./Fac. Ciências [UP] | 2 |
| Observ. Astro. Fac. Ciências [UP] | 1 | Reitoria [UP] | 1 |
| M. Ciência [UCoimbra] | 1 | | |

O Museu Soares dos Reis disponibilizou a sua sala de exposições temporárias junto da entrada principal, com aproximadamente 240 m². O elevado número de peças obrigou, não só a uma organização das mesmas em áreas temáticas (“A Luz na Natureza”, “A Luz Simbólica”, “Produzir Luz”, “A Ciência da Luz”, “A Luz na Ciência”, “Luz e Imagem”, “Luz e Visão”), como também a um projeto de arquitetura com uma hábil gestão do espaço, de forma a evidenciar a existência de um percurso expositivo, e garantir a coexistência de ambientes escurecidos ou bem iluminados, bem como a volumetria requerida em torno das peças de maior dimensão.

Tendo em conta a diversidade de públicos do Museu Nacional de Soares dos Reis e a recente promoção da cidade do Porto a destino turístico de eleição, bem como a aposta da Universidade do Porto na internacionalização, todos os textos associados aos conteúdos da exposição foram apresentados em português e em inglês.

Para a composição da face exterior do desdobrável de divulgação (figura 1), foi escolhida a imagem de um poliprisma do séc. XIX (um instrumento profundamente didático, permitindo a comparação simultânea de espetros de vidros com diferentes poderes refringente e dispersivo), e as primeiras linhas do poema de António Gedeão “Saudades da Terra”, onde o autor, com qualidades de pedagogo e sensibilidade de artista, exprime o seu maravilhamento em face das manifestações da luz. O mesmo excerto figurou num painel na entrada da exposição.

SAUDADES DA TERRA
Uns olhos que me olharam com demora,
não sei se por amor se caridade,
fizeram-me pensar na morte, e na saudade
que eu sentiria se morresse agora.
E pensei que da vida não teria
nem saudade nem pena de a perder,
mas que em meus olhos mortos guardaria
certas imagens do que pude ver.
Gostei muito da luz. Gostei de vê-la
de todas as maneiras,
da luz do pirilampo à fria luz da estrela,
do fogo dos incêndios à chama das fogueiras.
Gostei muito de a ver quando cintila
na face de um cristal,
quando trespassa, em lâmina tranquila,
a poeirenta névoa de um pinhal,
quando salta, nas águas, em contorções de cobra,
desfeta em pedrarias de lapidação ceptro,
quando incide num prisma e se desdobra
nas sete cores do espectro.
...

LONGING FOR THE EARTH
Eyes that looked at me at length,
out of love or compassion, I do not know,
made me think about death, and on the longing
I would feel if I died now.
And I thought that I would not
long for life or regret losing it,
but that in my dead eyes I would keep
some images of what I have seen.
I enjoyed light. I enjoyed seeing it
in every other way,
from the glow of the firefly to the cold starlight,
from the blaze of firestorms to the flames of bonfires.
I much fondled seeing it when sparkling
on the face of a crystal,
when it stabs, as a quiet blade,
the dusty mist of a pinewood,
when it leaps, in snake writhing, on the waters,
shattering in pieces from a bearded sceptre,
when it falls on a prism and unfolds
in the seven colours of the spectre.
...

António Gedeão, *Máquina de Fogo* (1961)
(Tradução de Marisa Monteiro)

Comissária Científica Scientific Commissar: Marisa Monteiro
Arquitetura Architecture project: João Santos e José Leite
Montagem Installation: Jiz, Lda
Grafismo Graphics: Pleniagem
Fotografia capa Cover photo: António Teixeira
Coordenação Coordination:
Universidade do Porto / Museu de Ciência
José Luís Santos / Marisa Monteiro / José Fernandes / Maria João Carvalhal
Museu Nacional de Soares dos Reis
Maria João Vasconcelos / Ana Cristina Macedo / Elisa Soares / Jaime Guimarães
José da Costa Reis / Marília Veiga / Paula Lobo

Horário Schedule:
Terça a domingo | 10h às 18h30 | Entrada gratuita
Tuesday to Sunday | 10 to 18:30 | Free entrance

Contactos Contacts:
Museu Nacional de Soares dos Reis
Palácio dos Carrancas, Rua D. Manuel II, 4050 - 342 Porto | Portugal
+351 223 393 770 | divulgacao@mnsr.dgpc.pt
Universidade do Porto / Museu de Ciência
Praça Gomes Teixeira, 4099-002 Porto | Portugal
+351 220 408 092 | mc@reit.up.pt

LUX MIRABILIS
MUSEU NACIONAL DE SOARES DOS REIS
15 DEZ 2015 > 27 MAR 2016

Organização Organization:
Universidade do Porto / Museu de Ciência
Museu Nacional de Soares dos Reis

Figura 1. Face exterior do desdobrável de três folhas.

Foram produzidos painéis com textos introdutórios das diferentes áreas temáticas, com a intenção de dar ao visitante uma visão abrangente das peças incluídas em cada área, justificando a sua inserção no conjunto. Uma vez que as tabelas de identificação das peças continham uma informação muito reduzida - designação, nome do fabricante ou produtor e museu ou coleção de origem -, para informação mais detalhada sobre cada peça, o visitante era remetido para um livro de sala, uma brochura de 40 páginas a levantar no *hall* de entrada do Museu e a repor no final da visita.

ALGUNS DETALHES DA EXPOSIÇÃO

Em “A Luz na Natureza”, procurou-se dar exemplos de variedade cromática resultantes da interação da luz com a matéria nos seus diferentes estados físicos: o fenómeno da fluorescência

foi demonstrado expondo a radiação ultravioleta, por ação do visitante, amostras de minerais como torbernite, aragonite e fluorite, bem como objetos de vidro dopados com óxido de urânio; o fenómeno da iridescência podia ser observado em diferentes estruturas naturais, tais como penas de colibris, escamas de borboletas, a sílica hidratada da opala nobre e a madrepérola da orelha-do-mar (figura 2). Diversos fenómenos óticos que ocorrem na atmosfera terrestre foram exemplificados por um ciclo de imagens passando num ecrã. A importância da luz no crescimento das plantas foi ilustrada por dois feijoeiros de crescimento rápido colocados num nicho, sujeitos a iluminação localizada e diferente nos dois casos.



Figura 2. Área temática “A Luz na Natureza”.

Na área temática “A Luz Simbólica”, os artefactos em exposição testemunhavam as múltiplas referências à luz em diversas épocas e civilizações, nos mitos e superstições, bem como na iconografia cristã (figura 3).



Figura 3. Áreas temáticas “A Luz Simbólica” e “Produzir Luz”

Na área “A Ciência da Luz”, traçou-se brevemente a evolução das concepções científicas da luz com recurso a instrumentos de ensino das coleções do Museu de Ciência, mostrando-se ainda exemplos tecnológicos decorrentes das teorias atuais (lasers e células solares). A presença de um prisma de água numa plataforma rotativa a abrir este núcleo expositivo - com o qual o visitante interagiu - permitiu justamente alertar para as implicações dos trabalhos de Newton e

seus contemporâneos na construção da Ótica moderna. Numerosos exemplos de instrumentos de observação, medida e análise cujos princípios de funcionamento assentam no conhecimento científico da luz compunham a área temática seguinte, “A Luz na Ciência” (figuras 4 e 5).



Figura 4. Área temática “A Ciência da Luz” com o prisma de água em primeiro plano



Figura 5. Área temática “A Luz na Ciência”

Em “Produzir Luz”, fez-se uma breve história da iluminação artificial recorrendo às coleções de vidro e cerâmica artísticos do Museu Soares dos Reis, às coleções arqueológicas e etnográficas do Museu de História Natural e à coleção de lâmpadas elétricas do Museu de Ciência (figuras 3 e 6). Os instrumentos utilizados em medidas fotométricas no Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na década de 40 do séc. XX, preencheram, por si só, uma vitrina, para vincar a importância de avaliar a qualidade e o desempenho das fontes de luz artificial (figura 6).

“Luz e Imagem” procurou chamar a atenção do visitante para a importância da luz na formação de imagens, fixas ou animadas, projetadas ou permanentes, da pintura à holografia. De telas da coleção de pintura do Museu anfitrião a hologramas de criação artística; de uma lanterna de projeção com diapositivos em vidro, a um aparelho com numerosos acessórios para projetar experiências de Ótica Física e Geométrica, de uma câmara de daguerreótipo a uma máquina

fotográfica digital, de um projetor cinematográfico a filme digitalizado, ao visitante foi também dado apreciar a evolução das técnicas de produção de imagem. Finalmente, “Luz e Visão” pretendeu suscitar uma reflexão sobre a influência do cérebro e da aprendizagem na interpretação das imagens formadas pelo sistema ótico da visão, dando especial destaque à ilusão de tridimensionalidade criada pela visão binocular, com diversos exemplos de estereoscopia permitindo alguma interatividade do visitante (figura 7).



Figura 6. Área temática “Produzir Luz” e a vitrina dedicada à Fotometria.



Figura 7. Áreas temáticas “Luz e Imagem” e “Luz e Visão”; exemplos de estereoscopia.

CONCLUSÃO

Em quatro meses, a exposição Lux Mirabilis contabilizou 7374 visitantes, dos quais 950 integrados em visitas orientadas de grupos: onze de escolas (ensino básico a 11ºano), cinco de centros de emprego e formação, cinco de cidadãos séniores, duas de ocupação de tempos livres e duas de estudantes de mestrado/doutoramento (Museologia e Ótica/Fotónica).

Aproveitando a abrangência e interdisciplinaridade do tema, o objetivo foi, desde sempre, *celebrar a Luz* com uma exposição culta e erudita, ainda que acessível ao grande público. Como ficou expresso no Epílogo da mesma, *apoiando-se no binómio Ciência/Arte, as peças selecionadas (espécimes naturais, objetos do nosso quotidiano, instrumentos de ensino*

científico, produtos de criação artística) atestam a natureza maravilhosa e intangível da Luz, ainda elusiva para a Ciência, após séculos de conhecimento acumulado, bem como a forma como a Luz moldou a nossa evolução e está presente nas nossas realizações. Num tempo em que a informação, mais ou menos detalhada, está ao alcance de um clique, queremos sobretudo dar ao visitante um ponto de partida para a exploração individual, oferecendo-lhe a possibilidade de criar as suas próprias associações... e de se fascinar.

O ENSINO DA FÍSICA E DA QUÍMICA EM PORTUGAL (1927-2013)

Cesarina Augusto¹, José P. Cravino^{1,2}, Armando Soares^{1,3}

¹ Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal

E-mail: csrngst@gmail.com

² Centro de Investigação “Didática e Tecnologia na Formação de Formadores” (CIDTFF), Aveiro, Portugal

E-mail: jcravino2utad.pt

³ INEGI/Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal

E-mail: asoares@utad.pt

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados de uma análise documental da evolução da dimensão das turmas, dos conteúdos programáticos e das cargas horárias da disciplina de Ciências Físico-Químicas no Ensino Secundário Português, entre 1927 e 2013. Esta análise é cruzada com outra elaborada com base na opinião dos docentes recolhida em relatórios dos próprios (n=112, entre 1934 e 1964) e no Livro Branco da Física e da Química [1]. Verifica-se que, apesar das alterações no sistema educativo ao longo deste período, as preocupações, opiniões e críticas dos professores, bem como as sugestões que propõem, permanecem quase inalteradas.

INTRODUÇÃO

O ensino em Portugal tem sofrido várias reformas ao longo dos anos, sempre com o objetivo de se alcançar um ensino e uma aprendizagem melhor.

Tem sido através dos exames nacionais da disciplina de Física e Química que o Ministério da Educação se baseia para compreender o sucesso ou insucesso das aprendizagens dos alunos nesta disciplina. Quando os resultados obtidos pelos alunos nos exames nacionais eram baixos os responsáveis pelo ensino procuravam encontrar soluções para o problema, que muitas vezes passava pelas reformas no ensino.

Entre 1927 e 1974 a população estudantil foi aumentando progressivamente, no entanto os alunos que seguiam estudos para os Liceus eram em número reduzido. Por um lado, o ensino não era gratuito e existia um exame nacional que limitava a entrada dos alunos no ensino liceal. Entre os anos 1927 e 1960 os professores elaboravam um relatório no final do ano letivo onde descreviam as suas atividades letivas e não letivas, bem como referiam as suas preocupações quanto aos resultados obtidos pelos alunos no final do ano, referindo mesmo as suas opiniões acerca de possíveis causas para os fracos resultados na disciplina de Física e Química. Estes relatórios eram enviados para a Inspeção Geral do ensino liceal. Foram analisados vários relatórios de professores entre os anos 1930 e 1960 e constatou-se que na maioria destes eram referidos três fatores que, na opinião dos professores, eram causa de insucesso na disciplina de Física e Química.

- a) Elevado número de alunos por turma;
- b) Pouco tempo atribuído ao ensino e aprendizagem, em especial para a realização das atividades laboratoriais;
- c) Conteúdos programáticos contidos nos programas.

Este estudo pretende mostrar que as opiniões dos professores têm permanecido semelhantes ao longo dos anos, apesar das sucessivas reformas no sistema educativo, e que os resultados dessas reformas no desempenho dos alunos nos exames nacionais não foram positivas.

OBJETIVOS GERAIS

Tendo como ponto de partida o insucesso na disciplina de Física e Química, o estudo aqui apresentado foca-se em três pontos:

1. A opinião dos professores quanto à lecionação da disciplina e quais as dificuldades que esta comporta para os alunos;
2. Os conteúdos programáticos e respetiva carga horária nas várias reformas curriculares relevantes, ocorridas nos últimos oitenta anos;
3. A relação entre as alterações feitas aos conteúdos programáticos e a evolução quantitativa dos resultados dos exames nacionais.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo consistiu na análise de 112, relatórios de professores que lecionaram o 6º e 7º anos (correspondentes aos atuais 10º e 11º anos), disponíveis no Arquivo Histórico do Ministério da Educação, correspondentes aos anos letivos 1934/35-1963/64, para compreender quais as preocupações que os professores expressam quanto ao ensino. Também foram utilizados dados estatísticos do Ministério da Educação e do Instituto Nacional de Estatística, de um inquérito aplicado num encontro de professores de física e Química realizado em 2013, do Livro Branco da Física e Química, relatórios do júri nacional de exames.

RESULTADOS

Os professores na sua maioria referiam, tanto nos relatórios analisados entre os anos 1930 e 1960 como nas respostas ao inquérito realizado em 2013, que o número de alunos por turma era prejudicial para a aprendizagem, especialmente nas atividades laboratoriais. No entanto, verifica-se que este número diminuiu significativamente a partir dos finais dos anos 90 e praticamente tem - se mantido até hoje, como se pode verificar na Figura 1 [2].

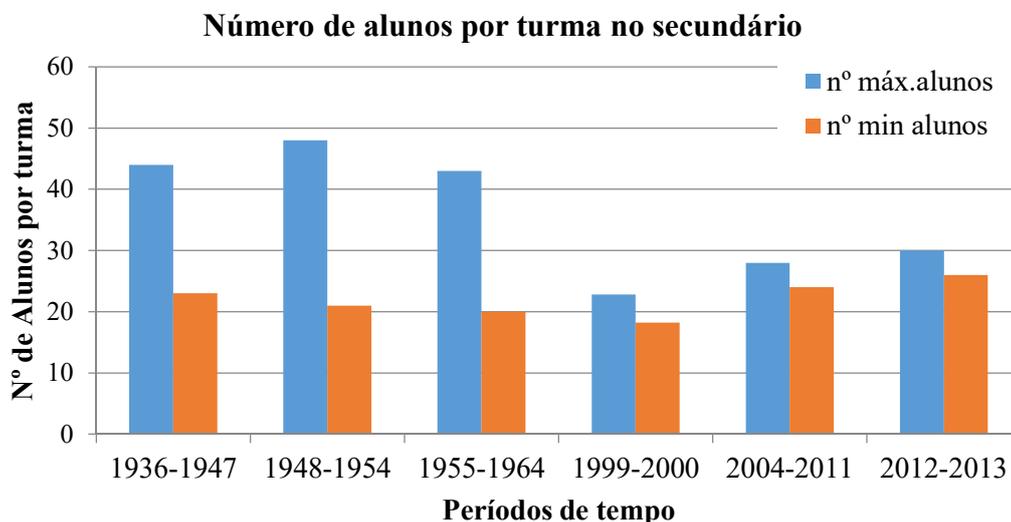


Figura 1. Evolução do número de alunos por turma em determinados períodos de tempo. O gráfico foi elaborado a partir dos dados fornecidos pelos relatórios dos professores e legislação.

No que diz respeito aos tempos letivos atribuídos à disciplina de Física e Química, tanto os professores dos anos 1930 e 1960, como os inquiridos em 2013 consideravam ser insuficiente. Ao longo dos anos o tempo letivo para lecionar a disciplina teve um período em que aumentou, depois diminuiu e, desde sensivelmente 2006, este tempo aumentou, especialmente para a realização de atividades laboratoriais, como se pode constatar na Figura 2 [2].

Tempo letivos semanal atribuído à disciplina de CFQ/FQA no Ensino Secundário

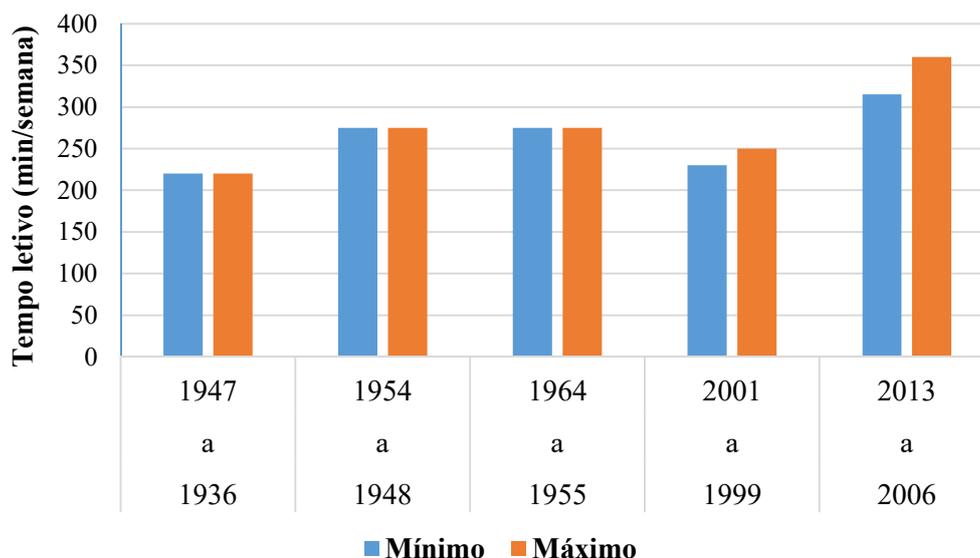


Figura 2. Representação gráfica do tempo letivo em minutos por semana atribuído à disciplina de Física e Química. Este gráfico foi por elaborada a partir dos artigos dos Diários da Republica dos anos de reforma, e dos planos curriculares do Ministério da Educação.

Quanto aos conteúdos programáticos, os professores têm referido ao longo do período em estudo, que estes não são compatíveis com o tempo disponível para os lecionar de uma forma eficaz. Isto é, na opinião do professor era necessário mais tempo para lecionar os conteúdos estabelecidos pelo programa, elaborado pelo Ministério da Educação, de forma a que os alunos pudessem consolidar bem os conhecimentos exigidos no programa.

Ao longo dos anos os legisladores elaboraram sucessivas reformas onde alteravam os conteúdos programáticos tornando-os, no seu entender, mais eficazes no processo de ensino e de aprendizagem. Essas alterações passavam na maioria das vezes por retirar um ou outro conteúdo e introduzir outro que parecia mais fácil para os alunos, como por exemplo no 7º ano atual 11º ano um dos temas era o trabalho das forças e sistema de forças este tema deixou de existir no 11.º ano em 2003, sendo dado no 10.ºano (Programas do Ministério da Educação) [3,4].

Tendo em conta a opinião manifestada pelos professores aos longos destes últimos 80 anos e os resultados dos exames nacionais pode-se constatar através das Figuras 3 e 4 que as mudanças operadas nas sucessivas reformas do sistema educacional não foram relevantes para uma melhoria nos resultados dos exames. Este facto levanta uma questão que é a seguinte: Foram feitas alterações nos três aspetos apontados pelos professores como elementos que têm contribuído para os fracos resultados dos alunos na aprendizagem dos conhecimentos da disciplina de Física e Química, indo ao encontro das sugestões dos professores, contudo as opiniões dos professores aparentemente não se alteraram.

A Figura 3 representa a distribuição de notas positivas e negativas no período indicado. Este foi elaborado a partir dos dados disponíveis nos livros do Instituto de Estatísticas do Ensino e de documentos disponíveis no Arquivo Histórico do Ministério da Educação, correspondentes aos anos letivos indicados na figura 3 [5].

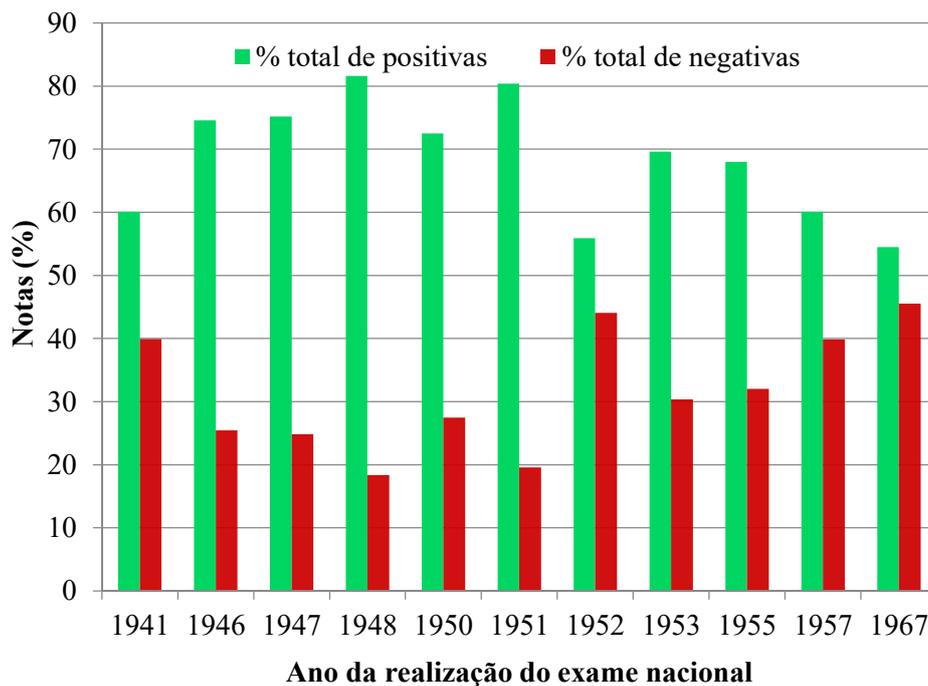


Figura 3. Representação da distribuição de notas dos exames Nacionais de 1941 a 1967.

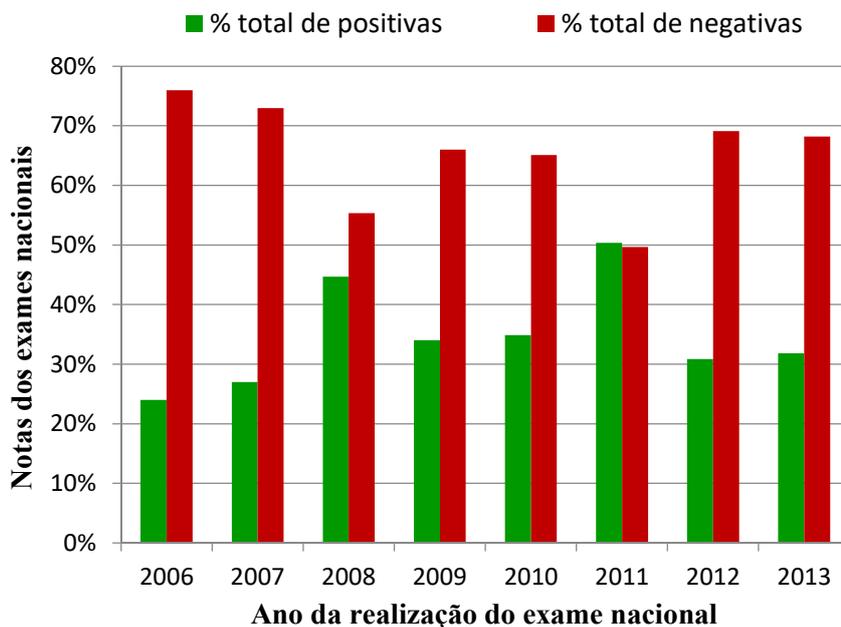


Figura 4. Representação da distribuição de notas dos exames Nacionais de 2006 a 2013.

A Figura 4 representa a distribuição de notas positivas e negativas no período indicado. Este foi elaborado a partir dos dados disponíveis do Júri Nacional de Exames (JNE) e (IAVE) [6]. No site www.dgidec.min-edu.pt/jurinaconalexames/index.php?s=directorio&pid=4.

CONCLUSÕES

Do que foi analisado pode-se concluir que o insucesso na disciplina de Física e Química não está de todo nos conteúdos a lecionar nem no número de alunos por turma. Pois como se pode constatar na Figura 3 e 4 os resultados não melhoraram mesmo quando as reformas no ensino

foram executadas. No entanto o que parece é que os conteúdos programáticos a lecionar não são compatíveis com um ensino e uma aprendizagem eficazes no tempo atribuído à disciplina. Seria interessante fazer um estudo com turmas com características diferentes e verificar de que forma era possível lecionar os conteúdos no tempo atribuído de forma eficaz na aprendizagem dos alunos.

Para uma aprendizagem eficaz é importante explorar os conteúdos em todas as vertentes, e exercitar a aplicação dos conhecimentos adquiridos sob a forma de exercícios, problemas e atividades laboratoriais, o que implica tempo.

Os professores têm vindo a alertar as entidades competentes para estes factos, mas apesar das alterações efetuadas parece ainda não ser suficiente, se tivermos em conta, que aparentemente as opiniões continuam iguais.

A diminuição do número de alunos por turma, de 50 alunos em 1948 para 28 alunos em 2013, não se na melhoria dos resultados finais de exames.

A maioria dos estudos aponta para o facto das características dos alunos e a composição das turmas serem relevantes para as boas aprendizagens e não o nº de alunos por turma. Pois um ou mais alunos não motivados podem ser suficientes para pôr em causa o processo de aprendizagens da turma.

Apesar das modificações feitas aos conteúdos dos programas ao longo dos anos não foram verificadas melhorias nos resultados dos exames nacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] Martins A., Martins D., Lopes J., Silva M., Soares R., Malaquias I., Campos A., Fiúza E., Neves M. Livro Branco da Física e da Química. Sociedade Portuguesa da Física e Sociedade Portuguesa da Química, 2002.
- [2] Augusto C. Conteúdos programáticos de Física e de Química No Ensino Secundário E Implicações no Insucesso Escolar. Dissertação de Mestrado no Ensino de Física e de Química no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário. Universidade de Trás Os Montes e Alto Douro, Vila Real, 2014.
- [3] Decreto nº 27 085 de 14 de Outubro de 1936, Aprova, para vigorarem a partir do ano letivo 1936/1937, os programas das disciplinas do ensino liceal.
- [4] ME DES. Ministério da Educação, Departamento do ensino secundário, (2003) programas de Física e Química do 11º ano.
- [5] Instituto Nacional de Estatísticas (1945-1957), Estatísticas do Ensino. Biblioteca Nacional. Lisboa.
- [6] Júri Nacional de Exames (JNE) e (IAVE) [5]. No site www.dgicd.min-edu.pt/jurinaconalexames/index.php?s=diretorio&pid=4.

NO NOVO SI, TUDO O QUE CONTA PODE SER CONTADO?

Olivier Pellegrino¹, Luís Ribeiro, Florbela Aura Dias, Isabel Godinho

Instituto Português da Qualidade, Rua António Gião, 2, 2829-513 Caparica

¹ E-mail: opellegrino@ipq.pt

RESUMO

Na revisão em curso do Sistema Internacional de unidades de medida (SI), as sete unidades de base estão a ser definidas em termos de um conjunto de sete constantes de referência. Assim, a mole será definida como o número de entidades elementares, que não sejam fotões. Também, a redefinição da candela não contempla grandezas fotónicas, i.e. baseadas na contagem de fotões, enquanto o ampere será definido por um fluxo de um determinado número de cargas elementares por segundo. Nesta comunicação, estas diferenças de tratamento na contagem das partículas elementares serão analisadas à luz dos avanços teóricos e tecnológicos que sustentem o novo SI.

INTRODUÇÃO

De acordo com a mais recente edição do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [1], resultado de 15 anos de trabalho por representantes das 10 principais organizações internacionais ligadas à Ciência, coordenado e publicado pelo Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM), o Sistema Internacional de Unidades (SI) é o “Sistema de unidades, baseado no Sistema Internacional de Grandezas, com os nomes e os símbolos das unidades, incluindo uma série de prefixos com seus nomes e símbolos, em conjunto com regras de utilização, adotado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM).” Por sua vez, o Sistema Internacional de Grandezas é um “Sistema de grandezas baseado nas sete grandezas de base: comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa”. Embora, por convenção, essas grandezas de base sejam supostas ser independentes, não é o caso das unidades de base porque são definidas a partir de outras unidades de base. Assim, o metro é definido a partir do segundo, o ampere a partir do metro, do quilograma e do segundo e assim por diante. No entanto, para retomar a expressão do anterior Presidente do Comité Consultivo para as Unidades (CCU) do BIPM, Ian Mills, o SI é a linguagem da ciência [2] e é essencial que seja mantida a sua coerência interna e operacionalidade, assim como, seja claramente divulgada e explicada a respetiva gramática por várias comunicações [3].

Desde a criação do sistema métrico decimal, o antepassado do SI, tem vindo a ser necessário atualizar as definições das unidades de base, para garantir o carácter universal da sua utilização (“para todos os povos e de todos os tempos”, segundo a expressão dos seus fundadores) com a confiança na sua perenidade. Ora, face à referência inicial dos valores das unidades à dimensão do planeta Terra ou às propriedades da água, muito mais confiança é fornecida quando esses valores se baseiam nas constantes fundamentais da Física. Mas muitíssimos mais esforços são necessários, i.e. um muito maior e melhor patamar tecnológico tem de ser alcançado, para tal concretização. Desde as primeiras definições das unidades de base, a progressiva evolução tecnológica tem permitido a progressiva evolução e mudança dessas definições até observar que a variação relativa do valor do último protótipo internacional materializando uma unidade de medida, o quilograma, ser de uma ordem de grandeza inaceitável (uns 10^{-8} em valor relativo durante os cem anos em que foram realizadas as diferentes comparações) para o nível tecnológico alcançado. Em consequência, a 25.ª reunião da CGPM adotou a Resolução da futura revisão do SI, que consistirá em definir quatro das unidades de base, o quilograma, o ampere, o kelvin e a mole, a partir de valores numéricos fixados de quatro constantes fundamentais da Física, a constante de Planck (h), a carga elétrica elementar (e), a constante de Boltzmann (k) e a

constante de Avogadro (N). Essa Resolução decidiu também que as definições das sete unidades de base terão uma formulação semelhante em que aparece explicitamente o valor numérico de uma constante fixada ou constante de referência [4], [5].

Esta mudança tem sido muito debatida [6], por ter várias consequências práticas e teóricas, uma das quais a de fazer distinção entre unidades de base e unidades derivadas [7]. As formulações propostas nas redefinições incentivam também a refletir sobre o significado das unidades de base e de algumas grandezas, como referido em várias comunicações [8] [9]. Em particular, na comunidade dos metrologistas em Química, o facto da nova definição da mole deixar a referência explícita a uma massa e de uma incerteza experimental estar associada à massa molar atômica do ^{12}C , causam dificuldades de entendimento facilmente transformadas em vantagens pelo Presidente do BIPM, M. J. Milton [10]. A redefinição da mole como sendo um número fixo de entidades, a constante de Avogadro, dá uma relevância à grandeza “número de entidades”, ou “contagem”, que é uma grandeza sem dimensão. Cabe-nos apresentar tais grandezas e como aparecem, ou podem ser invocadas, na reformulação das definições de outras unidades de base do SI, nomeadamente o ampere e a candela.

GRAMÁTICA DO SI

De facto, o “conjunto de regras e operações matemáticas aplicadas a outras grandezas que não sejam as grandezas ordinais” é designada por “álgebra das grandezas” na entrada 1.21 do VIM [1] e constitui a estrutura subjacente do SI, chamado de gramática do SI, pelo antigo diretor do BIPM, T. Quinn [3]. O conceito e a notação que explicitam o valor de uma grandeza, Q , como produto de um valor numérico $\{Q\}$ e uma unidade $[Q]$, i.e. $Q = \{Q\} [Q]$, encontra-se no VIM [1] e na Brochura do SI [11]. Introduzida pelo J. C. Maxwell, em 1863, com contribuições posteriores de outros cientistas para a sua clarificação [12], esta notação é eficaz e evidencia uma diferença fundamental entre a Matemática e a Metrologia, apesar desta última se basear nas poderosas ferramentas da primeira: a utilização de unidades de medida. Assim, uma função essencial do SI é a de fornecer uma estrutura sistemática na formalização matemática com as unidades de medida que descrevem os fenómenos físicos [8]. Tal formalismo aplica-se às grandezas sem dimensão e portanto às contagens.

Uma consequência da notação $Q = \{Q\} [Q]$ aplicada para o valor de uma constante universal, Q , é que se a unidade $[Q]$ for escolhida, o valor numérico $\{Q\}$ tem de ser determinado experimentalmente. Reciprocamente, se o valor numérico $\{Q\}$ for escolhido, a unidade $[Q]$ é então fixada ou definida. Este processo consiste em utilizar o valor Q como constante de referência para definir a unidade $[Q]$. Assim, em 1983, o metro foi redefinido pela utilização do valor da velocidade da luz c como constante de referência para definir a unidade [m/s] [9].

Da mesma forma, o valor da constante de Avogadro $N_A = \{N_A\} [N_A]$ é uma constante fundamental, um fator de conversão entre a grandeza número de entidades N e a grandeza quantidade de matéria (ou número de moles), n , através de $N = N_A n$, tal como a constante de Planck, h , é um fator de conversão entre as grandezas energia, E , e frequência, ν , através de $E = h \nu$ [9].

CONTAGEM NO NOVO SI

O efeito Josephson e o efeito Hall quântico permitem realizar o volt e o ohm, respetivamente com reprodutibilidade relativa da ordem de 10^{-10} e 10^{-9} . Portanto, as medições elétricas hoje em dia utilizam esses efeitos sem rastreabilidade ao ampere. Mais especificamente, as grandezas força eletromotriz e resistência elétrica, das respetivas unidades volt e ohm, são proporcionais, nas respetivas condições de realização, a constantes dependentes da constante de Planck, h , e da carga elétrica elementar, e , através de $K_J = 2e/h$ e $R_K = h/e^2$, para as constantes de Josephson e de von Klitzing.

Embora as verificações experimentais dessas relações validadas teoricamente não tenham alcançado ainda um nível satisfatório (cerca de duas ordens de grandeza em valor relativo menor que o esperado), estão a ser desenvolvidos esforços pelos laboratórios de referência no

desenvolvimento de realizações experimentais que utilizam e aplicam os conceitos do *Single Electron Tunnelling*, *SET*. Estas realizações experimentais recorrem à tecnologia de filmes finos, para a obtenção de estruturas oscilantes integradas em nano dispositivos semicondutores sofisticados, que possibilitem confinar elétrons e efetuar a sua contagem *individual* quando é forçada a passagem de uma corrente elétrica. A corrente elétrica assim controlada permite ser facilmente comparada com o valor teórico esperado, uma vez que é simplesmente necessário determinar a carga de um elétron vezes o número de elétrons transportados por ciclo de oscilação (frequência de trabalho). A contagem de elétrons é realizada através de detetores de carga incorporados nos nano dispositivos.

Quando for possível, o que se espera que aconteça dentro de pouco tempo, obter um nível de incerteza relativa da ordem de 10^{-8} , esta tecnologia permitirá *fechar* o triângulo quântico metrológico. Este triângulo quântico metrológico consiste em obter o valor de 2 para o produto das três constantes K_J , R_K e Q_S , sendo esta última $Q_S = e$ resultante da corrente elétrica fornecida por uma corrente-padrão criada pelo *SET* [13].

Em plena expansão, a metrologia elétrica terá um papel de destaque na metrologia baseada em constantes de referência, como aliás está a ser observado pelos trabalhos desenvolvidos e relacionados com a implementação da balança do watt, que permite relacionar o quilograma com a constante de Planck, h , e cujo princípio de funcionamento é baseado na equivalência entre potência elétrica e potência mecânica, sendo as grandezas elétricas materializadas através dos referidos efeitos quânticos [14].

Das sete unidades de base, a candela é a única unidade fisiológica, porque é definida tendo em conta a resposta do ser humano (mais especificamente do olho) a uma estimulação, a radiação eletromagnética visível, através de uma função de ponderação, tal como acontece com outras unidades fisiológicas [15]. Das redefinições das sete unidades de base, a da candela não chegou a traduzir os avanços tecnológicos e teóricos neste domínio também em nítido progresso e baseado na física quântica. Com efeito, o Comité Consultivo de Fotometria e Radiometria (CCPR) do BIPM propôs uma formulação que incluísse também uma descrição fotónica, sem êxito [16]. No entanto, este domínio tem conseguido progressos tanto na implementação de fontes como na de detetores monofotónicos [16] com aplicações em sectores das telecomunicações, com distribuição quântica de chaves (*Quantum Key Distribution, QKD*), ou seja, a geração de chaves criptográficas verdadeiramente aleatórias, baseada em tecnologia de óptica quântica [17]. A quantificação e contagem fotónica, descrita por uma estatística de bósons, diferente da estatística de férmions, que se aplica para os elétrons ou outras entidades de matéria, não pode deixar de ser considerada pelo formalismo do novo SI. Esta “nova” abordagem considera a constante de Avogadro como uma constante de conversão entre o número de moles e o número de entidades, embora com umas imperfeições conceituais ainda para esclarecer [6], pode ser aplicada à contagem fotónica.

CONCLUSÕES

Durante muitos anos, a Metrologia andava separada dos avanços teóricos maiores da Ciência, tendo aproveitado as respetivas aplicações para as definições e “*Mise en Pratique*” tornadas possíveis, com os progressos tecnológicos. No entanto, a Metrologia, enquanto utilizadora e sempre atenta à evolução das ferramentas matemáticas, tem a particularidade e o dever do bom uso e do cuidado das unidades de medida.

Respeitante às contagens, a gramática do SI ainda necessita de apresentar uma unidade que seja sem ambiguidade intuitiva para os utilizadores [8] e adaptada ao uso dos símbolos dos múltiplos e dos submúltiplos das unidades, ao contrário do algarismo 1, ainda sugerido [4], [18]. À luz dos progressos realizados e potenciais no domínio da fotónica, sugerimos também a inclusão deste domínio no novo SI, tanto para as redefinições das unidades de base como para considerar os fótons como entidades sujeitas a contagem e abrangidos pela redefinição da mole. Pois, prevê-se avanços em fotónica, comparáveis aos alcançados pela eletrónica, patentes pela omnipresença no novo SI das grandezas elétricas.

REFERÊNCIAS

- [1] IPQ-Inmetro:2012 “Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)” 1.ª edição luso-brasileira do VIM 2012
- [2] I. M. Mills The language of science, *Metrologia* 34, 101-109 (1997)
- [3] T. Quinn Physical quantities in Metrology and Fundamental Constants, Proceedings of the International School of Physics “E. Fermi”, Course CXLVI, ed. by T. W. Hänsch, S. Leschiutta, A. J. Wallard, M. L. Rastello 59-80 (2007)
- [4] Comité Consultivo das Unidades (CCU), BIPM, Draft of the ninth SI Brochure, 11 December 2015, acessível em: <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/>.
- [5] F. A. Dias, O. Pellegrino, E. Filipe, A caminho da redefinição da mole, Livro de Resumos do 22.º Encontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Química (ENSPQ), Braga 2011
- [6] F. Pavese A critical review of the CCU 2016, Draft of the Brochure for the New SI definition using (fundamental) constants arXiv:1601.00857v3 [physics.gen-ph]
- [7] P. J. Mohr Defining units in the quantum based SI, *Metrologia* 45, 129-133 (2008)
- [8] P. J. Mohr, W. D. Phillips Reply to Comments on “Dimensionless units in the SI”, *Metrologia* 52, 617-618 (2015)
- [9] M. J. T. Milton, I. M. Mills Amount of substance and the proposed redefinition of the mole, *Metrologia* 46, 332–8 (2009)
- [10] R. S. Davis, M. J. T. Milton, The assumption of the conservation of mass and its implications for present and future definitions of the kilogram and the mole, *Metrologia* 51, 169–173 (2014)
- [11] Brochure sur le SI : Le Système international d'unités [8e édition, 2006 ; mise à jour en 2014], acessível em : <http://www.bipm.org/fr/publications/si-brochure/>
- [12] J. de Boer, On the History of Quantity Calculus and the International System, *Metrologia* 32, 405-429 (1994/95)
- [13] L. Ribeiro, V. Cabral, Rastreabilidade das grandezas elétricas alternadas através da metrologia quântica, *Revista Medições e Ensaios* 13, 3-14 (2016)
- [14] C. J. Bordé, Base units of the SI, fundamental constants and modern quantum physics, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 363, 2177-2201 (2005).
- [15] O. Pellegrino, I. Godinho, C. Oliveira, E. Filipe, SI physiological units, *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* 6, 203-205 (2015)
- [16] J. C. Zwinkels, E. Ikonen, N. P. Fox, G. Ulm, M. L., Rastello, Photometry, radiometry and “the candela”: evolution in the classical and quantum world, *Metrologia*, 47, R15-R32 (2010).
- [17] M. L., Rastello et al. Metrology for industrial quantum communications: the MIQC project, *Metrologia*, 51, S267-S275 (2014).
- [18] R. J. C Brown, P. J. Brewer Proposals for nomenclature to clarify the expression of units for counting quantities, *Metrologia*, 52, L1-L3 (2015).

“APRENDIZAGENS NEGATIVAS” SOBRE O SOM

T. Esperança¹, M.J. de Almeida¹, P.M. Gordo¹

¹ CFisUC, Departamento de Física, FCT, Universidade de Coimbra

E-mail: telmaesperanca@fis.uc.pt

RESUMO

Num projeto de Doutoramento em Ensino das Ciências – Ramo de Ensino da Física, desenvolveu-se um processo de investigação em ação induzida durante a lecionação do tema Som a alunos do 8.º ano, usando estações experimentais na sala de aula e criando documentos inspiradores do espírito de pesquisa orientada (*inquiry*) [1], mas mantendo como base os documentos oficiais [2,3]. A eficácia do processo, que já completou 3 ciclos consecutivos e envolveu 13 professores dos EBS, foi sendo medida através de utilização de turmas de controlo e instrumentos de pré e pós-avaliação dos alunos. Através dos resultados já analisados foi possível identificar que, tanto nas turmas experimentais como nas turmas de controlo, existem conceitos cuja compreensão se revelou muito difícil ou negativa: a **velocidade** do som, e a sua eventual correlação com a **frequência** e a **intensidade** do mesmo. O presente trabalho analisa o texto dos documentos orientadores do 8.º ano e a relevância destes conceitos para a progressão de estudos tentando relacionar esta informação com o modo como os alunos apreendem os referidos conceitos durante a sua aprendizagem em turmas de controlo e através da abordagem proposta com a metodologia implementada.

1. ORIENTAÇÕES OFICIAIS E MANUAIS ESCOLARES

Os documentos oficiais sugerem objetivos de aprendizagem para o “Som”, de acordo com o nível letivo. Analisando especificamente os conceitos que foram identificados como potenciadores de dificuldades na aprendizagem nas orientações curriculares [2] destaca-se a informação:

Produção e transmissão do som: (...) “*Estudar as propriedades dos sons (altura, intensidade e timbre). (...). Estudar a propagação do som em diferentes meios. Para isso, sugere-se a realização de experiências envolvendo a propagação do som nos sólidos, líquidos e no ar. (...). Os alunos devem investigar o que acontece ao som quando incide em diferentes superfícies e quando passa através de meios distintos.*”

Em 2012 foram publicadas as Metas Curriculares que, de acordo com o Ministério da Educação [4]:

“ (...) *identificam a aprendizagem essencial a realizar pelos alunos em cada disciplina, por ano de escolaridade ou, quando isso se justifique, por ciclo, realçando o que dos programas deve ser objeto primordial de ensino (...). Identificam os desempenhos que traduzem os conhecimentos a adquirir e as capacidades que se querem ver desenvolvidas, respeitando a ordem de progressão da sua aquisição. São meio privilegiado de apoio à planificação e à organização do ensino, incluindo a produção de materiais didáticos, e constituem -se como referencial para a avaliação interna e externa, com especial relevância para as provas finais de ciclo e exames nacionais.*”

A análise das Metas Curriculares, especificamente para os conceitos identificados, permitiu destacar as seguintes indicações:

- Produção e propagação do som: (...) *Definir frequência da fonte sonora, indicar a sua unidade SI e determinar frequências nessa unidade. (...). Indicar que o som se propaga em sólidos, líquidos e gases com a mesma frequência da respetiva fonte sonora (...).*
- Som e ondas: (...) *Identificar, num esquema, a amplitude de vibração em ondas na água, numa corda ou numa mola.*
- Atributos do som e a sua deteção pelo corpo humano: *Indicar que a intensidade, a altura e o timbre de um som são atributos que permitem distinguir sons. Associar a maior intensidade de*

um som a um som mais forte. (...). Associar a altura de um som à sua frequência, identificando sons altos com sons agudos e sons baixos com sons graves.

Para além dos documentos que têm origem na equipa do Ministério da Educação, os professores recorrem ao apoio dos Manuais Escolares para organizarem as suas práticas letivas. O panorama nacional oferece vários manuais para cada nível escolar o que provoca diferenças nas abordagens ao tema nas várias escolas e/ou turmas. Analisou-se esta questão no concelho de Coimbra e concluiu-se que, no ano letivo de 2012/2013, em 22 escolas (entre públicas e privadas), 45% recorrem ao manual FQ-Manual 8 A (Editora Asa) [5], 23% ao Manual Física e Química na Nossa Vida 8 (Porto Editora) [6] e 14% ao Manual 8 CFQ - Ciências Físico Químicas (Editora Texto) [7]. A análise destes manuais, e dos documentos oficiais, permitiu concluir que a abordagem ao tema “som” em cada manual é divergente, detetando-se até diferenças ao nível dos conceitos abordados e do grau de profundidade. Porém, surgem alguns aspetos comuns, como a indicação para a realização de atividades experimentais que abranjam os conceitos que este estudo aponta como pertinentes: a propagação do som; características das ondas (amplitude, velocidade e frequência); atributos do som (altura, intensidade e timbre); Propagação do som nos sólidos, líquidos e gases.

2. PROGRESSÃO DE ESTUDOS:

Como em Portugal o “Som” é lecionado pela primeira vez no 8.º ano e só volta a ser abordado no 11.º ano, os conceitos que serão adquiridos no 8.º ano servirão de base para o 11.º ano. Assim é pertinente realizar a análise vertical da importância educacional destes conceitos, consultando o programa de Física e Química A, no 11.º ano que indica como objetivo geral “*Interpretar um fenómeno ondulatório como a propagação de uma perturbação, com uma certa velocidade; interpretar a periodicidade temporal e espacial de ondas periódicas harmónicas e complexas, aplicando esse conhecimento ao estudo do som*”. Especificamente no tema Sinais e ondas “*Os alunos já têm a noção de periodicidade temporal das ondas (...) Deve ter-se em atenção que a intensidade de um som depende apenas da amplitude de pressão da onda sonora e não da sua frequência. (...) Relacionar frequência, comprimento de onda e velocidade de propagação.*”. Na componente laboratorial é proposta uma atividade sobre as características do som e outra sobre a velocidade do som.

3. DESENVOLVIMENTO DA INVESTIGAÇÃO EM AÇÃO INDUZIDA:

3.1 APLICAÇÃO

A realização desta investigação contou com a colaboração de 13 professores e 22 turmas diferentes (experimentais e de controlo), distribuídos por diferentes zonas do país, durante 3 anos letivos. Esta expansão temporal permitiu que fossem sendo realizados ajustes à metodologia proposta de acordo com as indicações dos professores que participaram nesta investigação de ação induzida (foi fomentado o espírito de investigação em ação em professores em exercício).

Neste estudo foram propostas atividades experimentais, com documentos de apoio à sua realização, para professores e alunos. Estas atividades foram desenvolvidas em grupo (3 ou 4 alunos) num sistema de estações experimentais rotativas e de acordo com uma estrutura *inquiry*. Os documentos propostos basearam-se numa sequência de aprendizagem prevendo a compreensão das noções simples sobre o som e o desenvolvimento cognitivo dos alunos do 8º ano. Os documentos fornecidos aos alunos tinham questões que permitiam o desenvolvimento gradual e sequencial das atividades e das compreensões dos conceitos. Como instrumentos de medida destas compreensões foram usados pré e pós testes, respetivamente antes e após o referido tratamento pedagógico.

3.2 ATIVIDADES PROPOSTAS VS CONCEITOS

Com a realização das atividades laboratoriais pretendeu-se potenciar o desenvolvimento de competências cognitivas, atitudinais e processuais, estimulando nos alunos a motivação e uma certa autonomia orientada, a criatividade e a discussão de ideias, conduzindo-os na procura de respostas e de justificações dessas respostas e fomentando a vontade de aprender.

Analisando as atividades propostas e a abordagem dos alunos aos conceitos **velocidade** do som, **frequência** e **intensidade** denotando uma aprendizagem negativa (respostas no pós-teste pedagogicamente inferiores às do pré-teste), selecionaram-se, no tratamento experimental proposto, as etapas que os abordam diretamente – ver Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1. Atividades propostas para aprendizagem dos conceitos que evidenciaram uma aprendizagem negativa

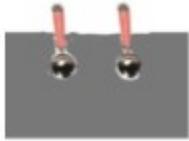
| Bloco | Atividade | Pretende-se que os alunos aprendam que... |
|---------------------------------------|--|--|
| Ondas mecânicas | “Slinky e as ondas mecânicas” (ondas mecânicas que se propagam apenas segundo uma direção) | <ul style="list-style-type: none"> ... há uma velocidade de propagação da perturbação; ... as perturbações periódicas num meio elástico dão origem a oscilações com amplitude, frequência e período, em todos os pontos do meio; |
| | “Tina de água” (ondas mecânicas a propagar-se em todas as direções sobre um plano, à superfície da água) | <ul style="list-style-type: none"> ... o conjunto de oscilações do meio constitui uma onda com amplitude, frequência, período e comprimento de onda; |
| Propagação do som em meios diferentes | “Palmas e Tubo” (diferenças no som quando se propagar em 1 ou 3 dimensões) | <ul style="list-style-type: none"> ... o som propaga-se em diferentes meios; ... som pode ser caracterizado por uma frequência e uma intensidade (amplitude, energia); |
| | “Cachimbo sonoro, água e madeira” (propagação do som em meios diferentes - diferenças) | <ul style="list-style-type: none"> ... quando o som se propaga livremente em todas as direções a sua intensidade diminui com a distância à perturbação inicial; ... quando o som se propaga apenas numa direção, a sua intensidade mantém-se constante; ... o som ao propagar-se em diferentes meios pode ter características diferentes; |

Após a realização das atividades, os alunos receberam uma ficha de trabalho que deviam de explorar em grupo, sob a orientação do professor. Esta ficha tinha como objetivo sintetizar os conceitos abordados durante todas as atividades propostas, assim como a exploração de representações gráficas das vibrações. Pretendia-se verificar a presença ou não de algumas das preconcepções mais comuns sobre o tema “Som”, nomeadamente:

- a intensidade e a frequência do som são propriedades idênticas;
- a velocidade e a frequência do som são propriedades idênticas;
- no mesmo meio a velocidade do som pode ser diferente, em função da frequência.

Tabela 2. Algumas questões orientadoras das atividades propostas, com o objetivo de potenciar as aprendizagens citadas na Tabela 1.

| Questões propostas | Atividade |
|--------------------|-----------|
|--------------------|-----------|

| | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> (..) um aluno deve deslocar-se para uma ponta da mesa, posição A, e segurar a Slinky numa extremidade. Durante toda a atividade deve manter a extremidade da mola fixa. Outro aluno deve colocar-se na outra ponta da mesa e esticar a Slinky pela extremidade até estar esticada – posição B. (...) Suponha que o comprimento da mola (Δx) é de 2m e que o intervalo de tempo (Δt) que a perturbação, originada em B, leva a chegar até A, é 2s. Calcule a velocidade de propagação da onda. | <p>“Slinky e as ondas mecânicas”</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> Provoque uma perturbação ao tocar com a ponta do lápis na água, repetindo esse movimento algumas vezes. O que observa? Faça um esquema (desenho) e descreva. Indique na figura 1, a grandeza física amplitude: (...) <div style="text-align: center;">  <p>Figura 1</p> </div> <ol style="list-style-type: none"> “A amplitude da onda à superfície da água vai diminuindo à medida que esta se afasta do ponto no qual se efetuou a perturbação inicial.” Comente a afirmação, relacionando a amplitude com a energia da onda. Suponha que a distância entre o ponto onde efetuou a perturbação inicial e a parede da tina é 50cm. Suponha que a perturbação que originou levou 0,5s a atingir os pontos da parede da tina. Qual a velocidade de propagação? | <p>“Tina de água”</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> Utilize a mangueira (ou o tubo) que está em cima da mesa. O aluno que tem o relógio de pulso, utilizado em 4, deve encostá-lo a uma ponta da mangueira. Encoste o ouvido na outra ponta da mangueira. O que verifica? Consegue ouvir o som do “tic-tac” do mesmo modo, com o ouvido encostado ou afastado da mangueira? Justifique. (...) “O som é uma onda que se propaga em todas as direções (no ar, em condições gerais, a propagação é tridimensional – x,y e z). Se a propagação acontecer apenas numa direção, a energia sonora permanece a mesma durante essa propagação.” Comente a afirmação, tendo em conta a atividade que realizou. | <p>“Palmas e Tubo”</p> |
| <ol style="list-style-type: none"> Usando o cachimbo, grite a vogal “i” sobre tubo com uma “voz aguda”. O que aconteceu à cortiça que estava em cima da membrana? Agora tente fazer uma “voz grave” e pronuncie a vogal “o”. Mudou alguma coisa? Ligue a fonte sonora e coloque a “membrana” em cima da coluna. Explique o que acontece quando: <ol style="list-style-type: none"> altera o volume. muda a frequência. (...) Coloque as 2 colheres no recipiente com água, de modo a que toda a parte metálica esteja submersa – figura 2. Bata com as colheres uma na outra. <ol style="list-style-type: none"> Consegue ouvir o som produzido por essa perturbação? Qual o meio, ou quais os meios, em que se está a propagar a onda sonora? Uma onda sonora demora mais tempo a percorrer 100m quando se propaga ar do que quando se propaga na água. O que pode concluir sobre a velocidade de propagação sonora na água em relação ao ar? <div style="text-align: center;">  <p>Figura 2</p> </div> | <p>“Cachimbo sonoro, água e madeira”</p> |

| | |
|---|--|
| 6. Um aluno do vosso grupo deve sentar-se de um lado da mesa e outro aluno do outro lado. Um dos alunos raspa levemente com a unha na mesa. O aluno do outro lado da mesa consegue ouvir o som que o colega produziu? Justifique. | |
| 7. Peça agora ao seu colega que encoste o ouvido à mesa. Volte a raspar levemente com a unha na mesa. O que mudou? Justifique. | |

3.3 INSTRUMENTOS DE AVALIAÇÃO

Como já se disse, esta investigação foi acompanhada de dois instrumentos de avaliação: pré-teste (permitiu identificar o estado inicial dos alunos antes de realizarem as atividades) e pós-teste (permitiu saber qual o nível de conhecimentos após o tratamento e, desse modo, calcular o ganho que a realização das atividades trouxe aos alunos). O texto destes instrumentos de avaliação tem por base as preconcepções conhecidas sobre este assunto e os conceitos abordados nas atividades sugeridas.

O pós-teste manteve as questões do pré-teste, tendo, no entanto, sido também colocadas outras que abordassem os mesmos conceitos, mas a partir de outras situações problema. Pretendia-se deste modo verificar transferências de aprendizagens. Os instrumentos de avaliação foram sendo ajustados ao longo dos 3 anos em que a metodologia foi sendo aplicada, com vista a corrigir pequenas falhas que se foram detetando.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise dos resultados registados nos instrumentos de avaliação permitiu detetar algumas “ausências de evolução” (ganhos nulos) e até “aprendizagens negativas” (mais respostas erradas nos pós-testes que nos pré-testes, ou seja, ganhos negativos). Este resultado verificou-se quer nas turmas experimentais quer nas turmas de controlo. As questões com piores resultados, nas turmas analisadas até ao momento, foram:

“1. Imagina que estás à beira de uma piscina e que lá dentro está um relógio, à prova de água, com o despertador a tocar.

- a) *Conseguirás, do lado de fora da piscina, ouvir o som produzido pelo despertador? Porquê?*
- b) *Em que situação é que o som do despertador demora mais tempo a percorrer 100m? Assinala a opção correta e **justifica**. i. Dentro da piscina ii. Fora da piscina.*

(..)

*1 Indica quais as afirmações **verdadeiras e falsas**. Corrige as falsas.*

- a) *Nas mesmas condições, um som grave move-se com uma velocidade diferente de um som agudo.*
- b) *Se num rádio tocar uma música com um volume muito alto, essa música chega aos teus ouvidos mais depressa do que quando o rádio está a tocar a mesma música com um volume muito baixo.”*

Com base nas respostas dos alunos que “desaprenderam” – quer nas turmas experimentais quer nas turmas controlo, propõem-se algumas alterações às atividades propostas, nomeadamente a introdução de exemplos de situações bem conhecidas do dia-a-dia, para serem discutidas pelos alunos, de modo a que seja possível ultrapassar as dificuldades detetadas em conceitos tão fundamentais para a progressão de estudos em vias científicas.

REFERÊNCIAS

[1] – de Almeida, M.J. and Esperança, Telma – “Development of students inquiry skills and of their teachers’ action research attitudes: sound in 8th grade” – 2nd WCPE, Contemporary Science Education and Challenges in the Present Society: perspectives in Physics Teaching and Learning, São Paulo, Brasil, 2016.

[2] Freire A, Galvão C, Lopes A, Neves A, Oliveira M, Pereira M, Santos M, Vilela M. Ciências Físicas e Naturais Orientações Curriculares 3º Ciclo, 2001.

[3] – Fiolhais C. (coordenador), Ferreira A. J., Constantino B., Portela C., Braguez f., Ventura G., Nogueira R., Rodrigues S. (2014). Metas Curriculares do 3º Ciclo do Ensino Secundário, Ciências Físico-Químicas. Ministério da Educação e da Ciência.

[4] - Diário da República, 2.ª série — N.º 242 — 14 de dezembro de 2012. Disponível em http://www.dge.mec.pt/sites/default/files/ficheiros/despacho_15971_2012_4.pdf.

[5] – Cavaleiro M., Beleza M. (2011). Fq-Manual 8 A. Editora Asa.

[6] – Rodrigues M., Dias F. (2007). Física e Química na nossa vida. Sustentabilidade na Terra. Porto Editora.

[7] – Fiolhais C., Fiolhais M., Gil V., Paiva J., Morais C., Costa S. (2011). 8 CFQ - Ciências Físico-Químicas. Editora Texto.

[8] – Fiolhais C. (coordenação científica), Festas I. e Damião H. (coordenação pedagógica) et al (2014). Programa de Física e Química A. 10º e 11º anos. Curso científico-humanístico de Ciências e Tecnologias.

USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES PARA EXPERIMENTACIÓN EN FÍSICA

M^a Jesús Santos¹, Cristina Prieto², Manuel A. González³, Miguel A. González⁴, A. Hernández⁵, M.D. Merchán⁶, C. Rodríguez⁷, A. Queiruga-Dios⁸

¹ Departamento de Física Aplicada, Universidad de Salamanca, E-mail: smjesus@usal.es

² Departamento de Física Fundamental, Universidad de Salamanca, E-mail: cprieto@usal.es

³ Departamento de Física Aplicada, Universidad de Valladolid, E-mail: manuelgd@termo.uva.es

⁴ Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad de Valladolid, E-mail: mrebollo@eis.uva.es

⁵ Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca, E-mail: ascen@usal.es

⁶ Departamento de Química Física, Universidad de Salamanca, E-mail: mdm@usal.es

⁷ Departamento de Física Fundamental, Universidad de Salamanca, E-mail: concha@usal.es

⁸ Departamento de Matemática Aplicada, Universidad de Salamanca, E-mail: queirugadios@usal.es

RESUMO

Los dispositivos móviles están equipados con numerosos sensores (presión, temperatura, aceleración, giróscopo, campo magnético...) que junto con las aplicaciones adecuadas los convierten en instrumentos de medida de magnitudes físicas en cualquier momento y situación [1,2]. Así se abre para el profesor un amplio campo a las demostraciones y experiencias espontáneas, que permiten desarrollar el espíritu de indagación y reforzar la formación del estudiante.

El principal objetivo de esta comunicación es presentar actividades innovadoras al profesorado de física en secundaria o primeros cursos universitarios, aportando ideas que puedan adaptar fácilmente y desarrollar para sus estudiantes.

Con esta finalidad se presentan aplicaciones diseñadas por los autores para extraer datos adquiridos por los sensores del teléfono inteligente y se muestran ejemplos de su utilización en distintos experimentos de Física

INTRODUCCIÓN

Los estudiantes actuales han nacido en la época de Internet y los sistemas de enseñanza/aprendizaje que experimenten deben adaptarse a esta realidad. El hecho de que para la mayoría de los jóvenes los dispositivos móviles constituyan un elemento imprescindible en sus actividades diarias se puede aprovechar para mejorar su aprendizaje.

En la enseñanza de la Física las experiencias de laboratorio constituyen un complemento imprescindible a las clases teóricas. En ellas los estudiantes se involucran en su propio aprendizaje de manera significativa. La realización de prácticas de física tradicionales requiere material a menudo costoso y el uso de los laboratorios durante unos períodos de tiempo fijados. La utilización de los sensores (acelerómetros, giróscopos, magnetómetros, GPS,...) con los que vienen equipados los smartphones, permiten la implementación de prácticas que pueden utilizarse tanto en laboratorios como fuera de ellos (aprendizaje en entornos informales). En este sentido, se abre un amplio campo a las demostraciones y experiencias espontáneas por parte del estudiante, tanto en clase como en el laboratorio o donde el alumno se encuentre.

Así, en el desarrollo de su vida cotidiana, los estudiantes pueden descubrir los fenómenos físicos involucrados en ella [3, 4], investigar sobre los mismos, comprender las leyes físicas que los gobiernan, sus límites, y realizar un análisis crítico de los datos. Con una buena base del método científico, el estudiante puede realizar experimentos de manera autónoma y desarrollar su espíritu de indagación en cualquier ambiente, lo que supone un gran refuerzo en su formación.

Alguna experiencia previa llevada a cabo con estudiantes de bachillerato a los que se les propuso realizar prácticas con los dispositivos móviles, en el laboratorio y fuera de él, ha

permitido constatar como los estudiantes toman iniciativas muy interesantes, planteando experimentos diseñados por ellos mismos, en definitiva, tomando el control de su aprendizaje y adquiriendo una mayor confianza en sus capacidades [5].

Estos resultados corroboran los de diversos estudios en el sentido de que el empleo de los dispositivos móviles en el aula favorece el aprendizaje, aumentando tanto la motivación como la cantidad y calidad del trabajo de los estudiantes [6].

Para poder hacer medidas directas de magnitudes físicas con dispositivos móviles (en general smartphones) es necesario disponer de aplicaciones específicas. Se pueden emplear aplicaciones (apps) preexistentes aunque, al no haber sido diseñadas como herramientas docentes, no siempre tienen el rigor necesario. Para los trabajos que se muestran en esta comunicación se ha utilizado una app (Sensor Mobile), multilingüe, desarrollada en entorno Android para fines docentes que permite acceso simultáneo a los sensores que existan en el teléfono y la visualización de los datos tanto en tiempo real como a posteriori una vez almacenados en formato csv.

CARACTERÍSTICAS DE LA APLICACIÓN SENSOR MOBILE

La aplicación Sensor Mobile ha sido diseñada específicamente para usos didácticos [7], y está disponible en Google Play [8].

Los aspectos más destacados de la aplicación son:

- Acceso simultáneo a todos los sensores más habituales.
- Acceso a los datos del GPS.
- Visualización gráfica de los datos a medida que se registran.
- Almacenamiento selectivo de los datos en formato CSV.
- Visualización a posteriori de los ficheros almacenados.
- Posibilidad de definir el inicio y el final de la medida, con un avisador sonoro.
- Menús y ayudas en 4 idiomas, español, inglés, francés y portugués.

Para ilustrar su funcionamiento se muestran varios ejemplos prácticos de su uso, aplicándolo a medidas del sensor de aceleración. El primer ejemplo, análisis de la caída libre, pretende ilustrar el funcionamiento y manejo de Sensor Mobile; los restantes ejemplos muestran experiencias realizadas por estudiantes de forma autónoma, eligiendo ellos mismos la situación, diseñando el experimento y analizando los resultados.

En la figura 1 se muestran la pantalla inicial de la aplicación, el menú principal, la pantalla de elección de sensores, un ejemplo de visualización de datos en tiempo real, así como la posibilidad de almacenar los ficheros de datos, compartirlos (vía correo electrónico y otro medio) y visualizar las gráficas de nuevo.

USO DE SENSOR MOBILE CON DATOS DEL ACELERÓMETRO

El sensor de aceleración o acelerómetro es uno de los de mayor utilidad en los experimentos de mecánica [9-11]. Con él se puede medir la aceleración -o cambios de velocidad- que experimenta el dispositivo de forma lineal en cada uno de los tres ejes espaciales, en general definidos como se muestra en la figura 2. Estrictamente, estos sensores no miden aceleración sino fuerzas. Aunque en términos simplistas se puede considerar cada sensor como un muelle que se comprime cuando se le aplica una fuerza, en la práctica el funcionamiento del acelerómetro en los teléfonos inteligentes se basa en cerámicas piezoeléctricas o condensadores variables.

La aplicación proporciona en un fichero con formato .csv (figura 4, derecha) las componentes de la aceleración según los ejes X, Y y Z para cada paso del tiempo. Permite elegir la frecuencia de las medidas, (se indica en la cabecera del fichero), así como la unidad de medida.

Con el fin de ilustrar el funcionamiento de Sensor Mobile se va a analizar el cambio de la aceleración en un proceso de caída libre, situación que se presenta académicamente en todos los estudios introductorios de mecánica.

Para la realización de la experiencia se introdujo el teléfono en una bolsa de plástico transparente y el conjunto se suspendió de una cuerda. Un extremo de la cuerda se ató al conjunto bolsa-teléfono, mientras que el otro se puede mantener agarrado o unir a un punto fijo.

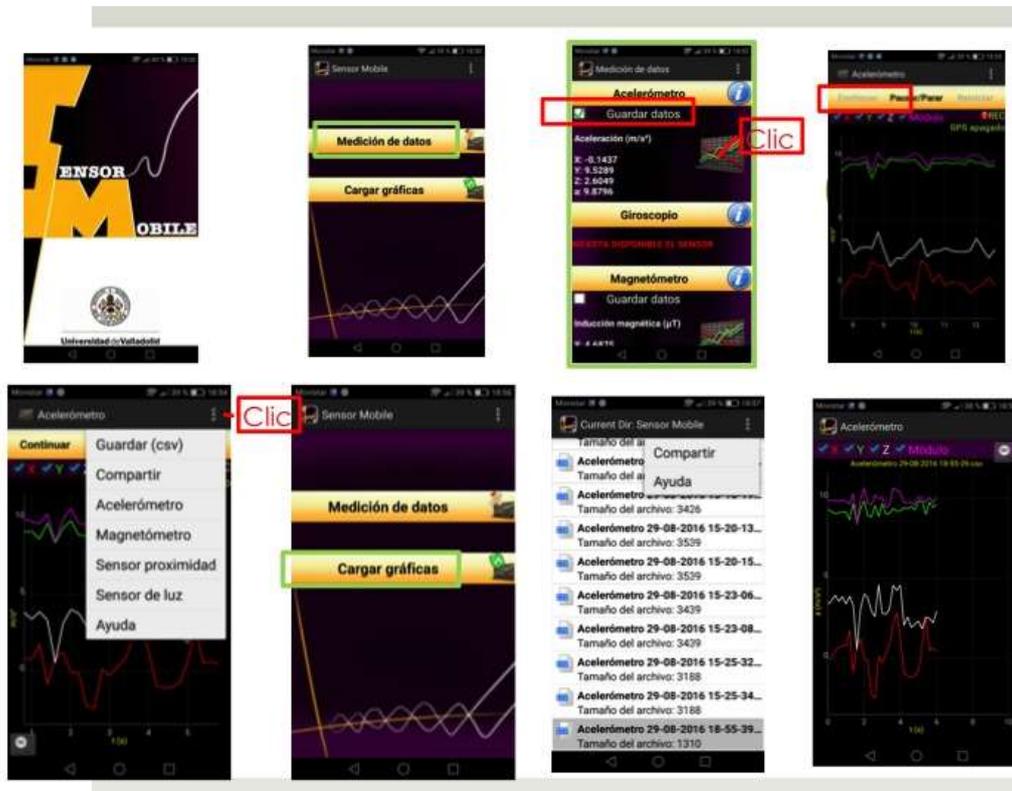


Figura 7 La sucesión de imágenes ilustra el proceso de medida utilizando Sensor Mobile

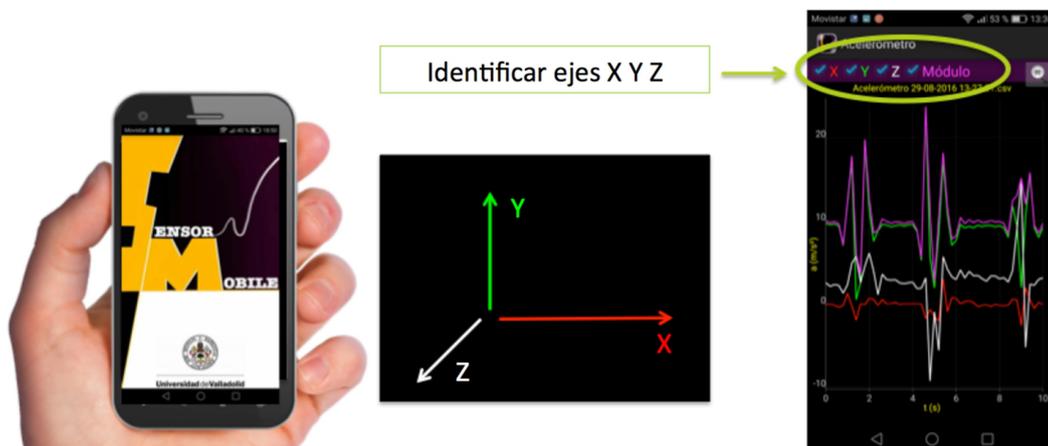


Figura 8 Orientación de los ejes del teléfono y la lectura de los mismos en la aplicación Sensor Mobile.

La figura 3 muestra la representación gráfica de las medidas del acelerómetro en el proceso de caída.

Como indica la pantalla, la línea de color rosa representa el módulo de la aceleración (fuerza) medida en cada instante. Las líneas roja, verde y blanca corresponden, respectivamente, a los valores de aceleración según los ejes X, Y y Z.

Antes de iniciar la caída el módulo de la aceleración es próximo a 10 m/s^2 . El inicio de la caída supone un brusco descenso del módulo de la aceleración, que durante un corto tiempo llega a

valer prácticamente cero. La extensión total de la cuerda provoca sobre el teléfono una fuerza brusca que incrementa la lectura del acelerómetro a valores de prácticamente 20 m/s^2 para volver con alguna oscilación al valor de partida.

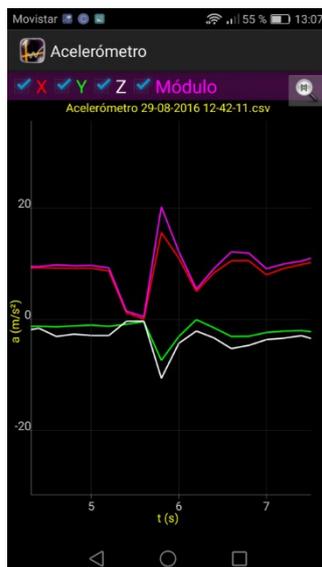


Figura 3 Resultados de Sensor Mobile para la aceleración en una experiencia de caída libre.

El análisis de la gráfica que muestra el dispositivo, y la variedad de pruebas que sobre la misma situación puede realizar el estudiante inmediatamente y de manera individual facilitan la adquisición de los conceptos fundamentales de Física que subyacen en el experimento.

EXPERIENCIAS REALIZADAS POR ESTUDIANTES

Experiencia 1- Uso del móvil como péndulo para la determinación de g

Se utilizó el teléfono unido a una varilla rígida a modo de lenteja de un péndulo y se permitió que oscilara con pequeña amplitud. En la gráfica correspondiente a los resultados se observará la variación periódica de la aceleración, lo que permite determinar el período de oscilación del sistema T.

Realizando las medidas para varias distancias del teléfono al eje de giro L se establecen relaciones entre T y L. Teóricamente, para un péndulo simple y oscilaciones de ángulo pequeño, esa relación es $T = 2\pi \sqrt{\frac{(L+a)}{g}}$, donde L es la longitud de la varilla y a representa la distancia del sensor al extremo de la varilla.

El ajuste lineal de los valores de T^2 frente a L permite determinar el valor de la aceleración de la gravedad g.

Experiencia 2- Medidas de la aceleración en un ascensor en movimiento

Midiendo la variación de la aceleración durante el funcionamiento de un ascensor se determinan (mediante integración) la velocidad del mismo y el espacio recorrido en cada tiempo.

Experiencia 3- Combinación de acelerómetro y giróscopo en los saltos acrobáticos sobre cama elástica

En este último ejemplo se pone de manifiesto cómo el estudiante puede analizar los aspectos físicos de cualquier situación, incluso de carácter festivo. Aprovechando su visita a un parque de atracciones con camas elásticas para realizar saltos acrobáticos, el alumno fijó el móvil a su

cuerpo y conectó la medida del acelerómetro y del giróscopo en Sensor Mobile mientras realizaba distintos tipos de saltos. La figura 4 muestra el escenario en que se realizó la experiencia, con el comentario introductorio sobre el propósito de la misma, así como los resultados obtenidos para aceleración y velocidad angular en sus saltos verticales o volteretas.

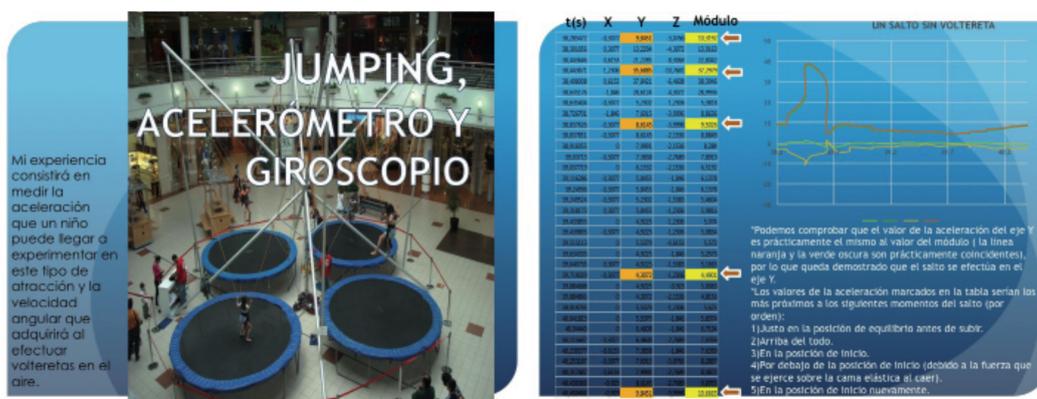


Figura 4 Escenario para la realización de saltos acrobáticos en los que se midió la aceleración (izquierda) y fichero de resultados para los saltos, con la gráfica correspondiente y el análisis de los datos (derecha).

CONCLUSIONES

La utilización de los sensores de los teléfonos móviles en combinación con aplicaciones diseñadas específicamente para la docencia permite al profesor disponer a muy bajo coste de un amplio conjunto de experiencias que pueden ser realizadas dentro o fuera del laboratorio. Los alumnos trabajan con sus dispositivos móviles, una herramienta que dominan y que les permite conectar la ciencia que se aprende en el aula con los fenómenos en su entorno cotidiano.

El uso de Sensor Mobile, aplicación desarrollada con fines específicamente docentes, ha resultado intuitiva para los estudiantes y ha proporcionado unas prestaciones muy elevadas.

Los trabajos realizados por los estudiantes han puesto de manifiesto su implicación en el estudio de la materia, el incremento del grado de madurez al enfrentarse a la comprensión de fenómenos físicos en situaciones no preparadas en un laboratorio, la adquisición de habilidades para el análisis y tratamiento de los datos obtenidos y para la interpretación de los resultados.

En definitiva, consideramos que este tipo de experiencias aporta grandes ventajas facilitando el aprendizaje de la física con un abanico amplio de posibilidades limitadas únicamente por los conocimientos y la imaginación de los usuarios.

REFERENCIAS

- [1] González, M. Á., da Silva, J. B., Cañedo, J. C., Huete, F., Martínez, Ó., Esteban, D., ... & González, M. Á. Doing physics experiments and learning with smartphones. In Proceedings of the 3rd International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (pp. 303-310). ACM. 2015.
- [2] González, M. Á., González, M. Á., Martín, M. E., Llamas, C., Martínez, Ó., Vegas, J., ... & Hernández, C. Teaching and Learning Physics with smartphones. Journal of Cases on Information Technology, 17(1), 31-50, 2015.
- [3] Kuhn J., Vogt P., Müller A. Analyzing elevator oscillation with the smartphone acceleration sensors, The Physics Teacher, **52**, 55. 2014.
- [4] Vieyra R.E., Vieyra C. Analyzing Forces on Amusement Park Rides Devices, The Physics Teacher, **52**, 149. 2014.
- [5] González Manuel A., González Miguel A., Martín E., Santos R., Del Pozo A., Díez A., Prieto V., Martínez P., Aznar J., De los Mozos D. Física Experimental en ambientes informales con Smartphones. Proceedings 25º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física, pp. 485-486 Gijón. 2015

[6] Martin F., Ertzberger J., Here and now mobile learning: An experimental study on the use of mobile technology, *Computers&Education*, 68, 76-85. 2013.

[7] Huete F., Esteban D., da Silva J.B., Skouri M., González Manuel A., Goudjami D., Rochadel W., González Miguel A. SensorMobile, aplicación Android multilingüe con fines docentes para el acceso a sensores de smartphones Comunicación XIII Jornadas de Redes de Investigación en Docencia Universitaria, Alicante (Spain) 2015

[8] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.sensor.mobile>

[9] Vogt P. and Kuhn J., Analyzing free fall with a smartphone acceleration sensor, *Phys. Teach.* 50, 182, 2012.

[10] Vogt P. and Kuhn J., Smartphones as experimental tools: Different methods to determine the gravitational acceleration in classroom physics by using everyday devices *Eur. J. Phys. Educ.* 4, 16, 2013.

[11] Chevrier J., Madani L., Ledenmat S., and Bsiesy A., Teaching classical mechanics using smartphones, *Phys. Teach.* 51, 376, 2013.

APLICACIÓN DE LA FÍSICA EN LAS CIENCIAS DE LA VIDA. SIMULANDO LA ELECTROFORESIS DE DNA EN GEL MEDIANTE EJS

C. Prieto¹, Thais Djenane Nunes de Souza²

¹ Departamento de Física Fundamental, Universidad de Salamanca E-mail: cprieto@usal.es

² E-mail: thais.djenane@gmail.com

RESUMO

La electroforesis es el proceso de transporte de moléculas en un campo eléctrico. En laboratorios relacionados con las ciencias de la vida la técnica es de amplia aplicación para separar y caracterizar biomoléculas. Para que los estudiantes de grados relacionados con las biociencias (Biología, Medicina, Farmacia...) comprendan en profundidad los fundamentos físicos de la técnica se han elaborado dos simulaciones del proceso electroforético, utilizando para ello la herramienta Easy Java Simulations (EJS) [1].

Las simulaciones creadas pretenden interpretar la separación electroforética de DNA en gel en un ámbito físico y biológico. La primera simulación está dirigida a comprender en qué forma los distintos factores que caracterizan las biomoléculas (tamaño, número de pares de bases (n_{pb})) o las propiedades del medio (viscosidad o concentración del gel) determinan la separación electroforética. En la segunda simulación se representa de forma más práctica el proceso electroforético, proponiendo al usuario que determine las características (n_{pb}) de los fragmentos de DNA desconocidos, ayudándose para ello de los datos de avance en el gel de fragmentos cuyo n_{pb} se conoce.

1. INTRODUCCIÓN

En la docencia de Física para estudiantes de grados relacionados con las biociencias el profesor se enfrenta con frecuencia a la falta de motivación del alumnado, que alega que “la física no tiene aplicación en su campo (biología, medicina...)”. Diferentes estrategias docentes se han propuesto para cambiar la actitud del estudiante, generando cursos verdaderamente interdisciplinarios [2-3]. En ellas se trata de desarrollar los principios básicos de la Física en su manifestación en los sistemas biológicos o por su implicación en las técnicas usadas para el estudio de los seres vivos. Siguiendo la misma línea, en esta comunicación se muestran actividades diseñadas para la comprensión de principios fundamentales de física (equilibrio de fuerzas, movimiento en un fluido...) aplicándolos directamente a una de las técnicas más utilizadas en los laboratorios de biología, la electroforesis de DNA en gel. La electroforesis es una técnica usada de manera rutinaria en laboratorios de genética o de biología molecular, y de cuyos resultados se benefician campos tan diversos como la criminalística, la medicina forense, la ecología o la etnografía.

La electroforesis es la migración de moléculas eléctricamente cargadas a través de una región en que se ha aplicado un campo eléctrico. En general este campo eléctrico se produce entre dos electrodos de carga opuesta, planos y paralelos, por lo que se suele considerar uniforme en la zona de experimentación (varios centímetros entre los electrodos).

La descripción física general de la separación electroforética de macromoléculas es muy compleja, pero sus aspectos básicos pueden representarse como un equilibrio entre la fuerza eléctrica y la fuerza de rozamiento de la molécula a través del medio. En ese sentido pueden ser comprendidos fácilmente por estudiantes de secundaria o alumnos de biología que inician sus estudios universitarios [4].

Aunque la técnica de la separación electroforética sea sencilla, cuando los estudiantes se enfrentan a ella en cursos superiores tienen dificultades en su interpretación física. Por ello, y

como buen ejemplo de situaciones de equilibrio de fuerzas, se han desarrollado dos simulaciones interactivas para familiarizar al futuro científico con los aspectos físicos más importantes de la técnica.

Cuando las moléculas orgánicas son sometidas a un campo eléctrico la migración de las mismas a través del medio depende tanto de las propiedades eléctricas de la macromolécula como de las características del medio que la rodea. Por ejemplo, los polipéptidos están formados por sucesivas cadenas peptídicas (esencialmente iguales) con una carga eléctrica neta. En este sentido, cuanto mayor sea la masa molecular M mayor será también la carga eléctrica neta de la molécula. Sin embargo, cuando la molécula es situada en una disolución tampón o en un gel de acrilamida, la carga eléctrica neta se ve modificada. Así, para DNA las cadenas de DNA de distinto número de pares de bases (n_{pb}) en una disolución tampón adquieren todas la misma carga eléctrica neta. Las simulaciones construidas consideran el caso más sencillo, y muy utilizado, de migración electroforética de fragmentos de DNA en gel de agarosa.

En un modelo más realista el movimiento de las moléculas de DNA a través del gel de agarosa está representada por la reptación de “culebrillas” entre los pequeños canales que constituyen los poros del gel [5]. Cuanto mayor sea la concentración del mismo, menor será el tamaño de los poros, lo que supone mayor rozamiento y movimiento más lento.

En disolución el DNA adopta una forma toroidal de mayor radio cuanto mayor sea el número de pares de bases [6]. Al moverse a través de los poros del gel la fuerza de rozamiento se puede modelizar mediante la ley de Stokes como

$$F_D = K_1 \eta R v$$

Donde η es la viscosidad del gel, R el radio de la partícula y v su velocidad. K_1 es una constante que depende de la forma de la partícula.

En este modelo simplificado la descripción del fenómeno electroforético es análogo a la caída de un sólido (bola) en un fluido, ejemplo ampliamente usado en los cursos introductorios de Física universitaria. En este caso las fuerzas que actúan sobre las moléculas de DNA son:

$$\text{Fuerza eléctrica: } F_E = qE$$

$$\text{Fuerza de rozamiento con el medio: } F_D = K_1 \eta R v$$

Inicialmente el movimiento de la molécula es acelerado, pero en poco tiempo se produce un equilibrio dinámico entre ambas fuerzas y a partir de ese momento la molécula de DNA migra hacia el polo positivo a velocidad constante dada por

$$v = \frac{qE}{K_1 \eta R} \quad (1)$$

El radio de la molécula de DNA es proporcional a su masa, o más propiamente, al número de pares de bases que contiene, pudiéndose representar en general a través de la función $\log(n_{pb})$. Así las moléculas de DNA más pequeñas se moverán más deprisa que las grandes, pero dado que todas tienen la misma forma (es decir, igual factor K_1), la misma carga q , están sometidas a igual campo E y se mueven a través del mismo gel, la velocidad de cada molécula se puede expresar como:

$$v = \frac{K_2}{R} \quad (2)$$

teniendo K_2 el mismo valor para todas las moléculas del mismo tipo. Comparando en diferentes instantes de tiempo la posición de una molécula incógnita con las de distintas moléculas (cuya composición se conoce), se puede determinar el número de pares de bases del fragmento desconocido.

Con objeto de que ambas simulaciones puedan ser utilizadas por estudiantes con menos conocimientos de matemáticas, y dado que el procedimiento no pierde su esencia, se ha supuesto en las simulaciones que el radio de las moléculas es directamente proporcional al número de pares de bases: $R=K_3 \cdot (n_{pb})$, de forma que la velocidad de avance de la molécula a través del gel será inversamente proporcional a n_{pb} .

$$v = \frac{K_3}{n_{pb}} \quad (\text{con } K_3 \text{ constante}) \quad (3)$$

2. DISEÑO DE LAS SIMULACIONES

Se han elaborado dos simulaciones, que se pueden encontrar en la dirección <http://diarium.usal.es/cprieto/>

Para el diseño de las mismas se ha utilizado Easy Java Simulations. Se trata de una herramienta sencilla, basada en el lenguaje Java, de código abierto y que permite al profesor con conocimientos elementales del mismo diseñar o modificar fácilmente las simulaciones de los distintos procesos. Las características de la herramienta, junto con numerosos ejemplos se pueden encontrar en la wiki de EJS [7]

Simulación 1:

La primera simulación pretende que el estudiante se familiarice con los parámetros que afectan al movimiento del DNA en el gel.

Cada molécula está representada por una esfera de radio proporcional a la masa (es decir, al número de pares de bases n_{pb}).

La simulación permite cambiar:

- el tamaño de la molécula (R)
- la viscosidad del gel (η)
- la carga de la molécula (q)
- el potencial eléctrico V, relacionado con la intensidad del campo eléctrico E mediante $E=V/d$, siendo d la distancia entre los electrodos

Durante el proceso se pueden desplegar ventanas complementarias que muestran la placa de revelado o las gráficas de posición frente a tiempo para cada fragmento.

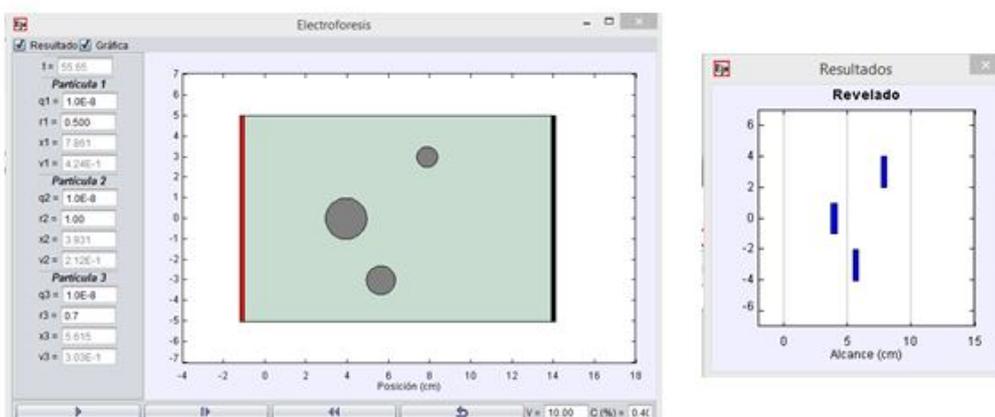


Figura 9 Simulación 1: Pantalla principal (izquierda) y pantalla de revelado (derecha)

Se puede determinar la posición de la partícula en cada instante simplemente pasando el puntero por su posición. Los estudiantes pueden calcular la velocidad de la partícula parando la simulación en distintos instantes o bien a partir de la pendiente de la gráfica posición-tiempo

correspondiente. Una vez que se ha determinado la velocidad, se puede deducir por ejemplo el parámetro K_2 característico de la forma de la molécula.

En la figura 1 se muestra la ventana principal de la primera simulación y la ventana que de “revelado” del proceso electroforético. Esta representa una imagen fidedigna de la cubeta de electroforesis y muestra el avance del “frente” con el tiempo para cada uno de los fragmentos.

Simulación 2:

Una vez que el estudiante se ha familiarizado con el fundamento de la electroforesis y cómo afecta cada parámetro al movimiento de la macromolécula, en la segunda simulación se representa de forma más realista el desarrollo de una separación de fragmentos de DNA por electroforesis.

En este caso se dispone de tres fragmentos de DNA de tamaños (n_{pb}) distintos y conocidos y se pretende determinar la masa de otro fragmento desconocido mediante electroforesis.

La vista de la simulación y el significado de los parámetros son análogos a los de la simulación 1. Se muestra en la figura 2.

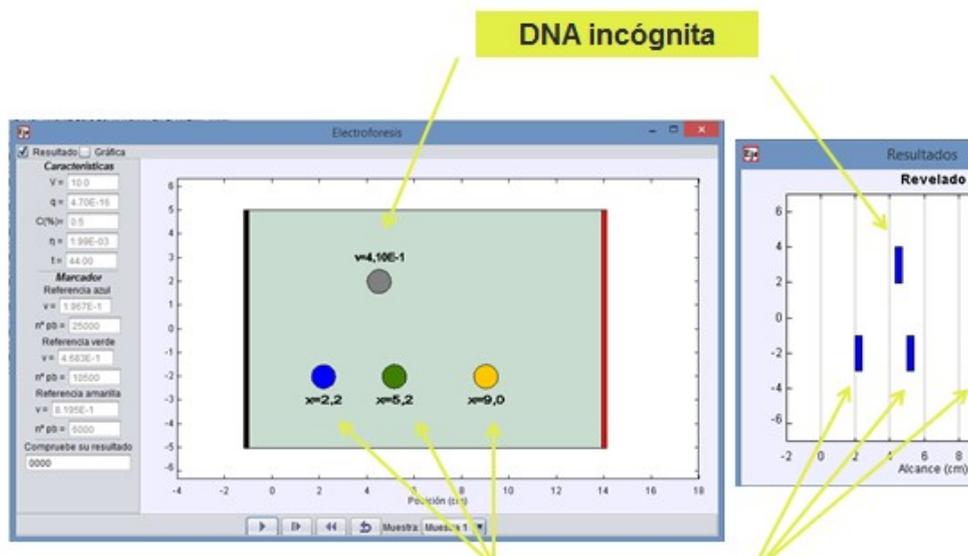


Figura 10 Pantalla principal (izquierda) y pantalla de revelado (derecha) de la segunda simulación

El estudiante puede deducir la velocidad de los fragmentos de control a partir de la gráfica posición-tiempo o leerlo directamente en la ventana de la simulación. La velocidad del fragmento incógnita aparece explícitamente en la ventana principal. Representando gráficamente la velocidad de cada fragmento conocido frente a $(n_{pb})-1$ se obtiene una línea recta que permite determinar el n_{pb} del fragmento desconocido.

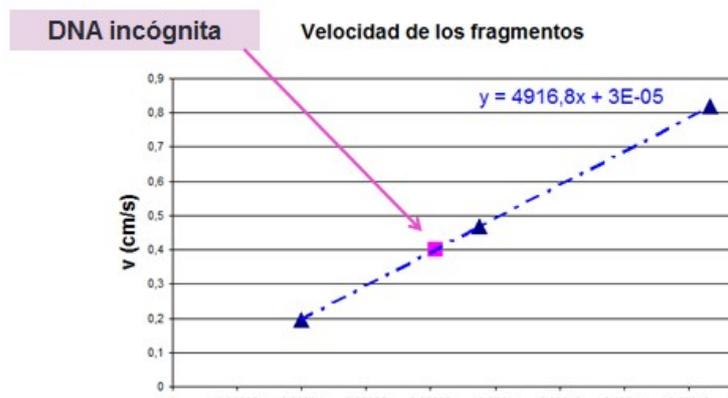


Figura 11 Recta de ajuste de la velocidad de avance de las muestras conocidas y determinación del npb de la incógnita

3. CONCLUSIONES

Para ilustrar los principios de la física en un contexto similar al futuro campo de trabajo de un estudiante de biociencias se han creado dos simulaciones del proceso de separación electroforética de moléculas de DNA en gel. Se han elaborado mediante EJS y en su diseño se ha prestado especial atención al carácter didáctico de las mismas.

Así, mediante la primera simulación el estudiante se familiariza con los factores que afectan a la velocidad de la molécula en el gel. En la segunda simulación, más similar al desarrollo de una electroforesis en el laboratorio, el estudiante aplica los resultados de la primera para, comparando las velocidades de las muestras control con la de la incógnita, determinar el número de pares de bases del DNA desconocido.

Creemos que la explicación de la física con ejemplos directamente relacionados con las ciencias de la vida incrementa la motivación del estudiante por la materia y favorecen su formación integral como científico.

REFERENCIAS

- [1] Esquembre, F. Easy Java Simulations: a software tool to create scientific simulations in Java. Journal of Computer Physics Communications, 156, 199-204 (2004)
- [2] Meredith D.C., Bolker J.A., Rounding off the cow: Challenges and successes in an interdisciplinary physics course for life Sciences, Am. J. Phys., 80, 913-922 (2012).
- [3] E. F. Redish & D. Hammer, Reinventing College Physics for Biologists: Explicating an Epistemological Curriculum, Am. J. Phys., 77, 629-642 (2009)
- [4] Saucedo S.R. Modeling the dynamics of gel electrophoresis in the high school classroom Phys. Teacher, 51, 28-31 (2013)
- [5] Viovy J.L. Electrophoresis of DNA and other polyelectrolytes: Physical mechanisms Rev. Mod. Phys. 72, 813 – 872 (2000)
- [6] Gelbart, W. M.; Bruinsma, R.F.; Pincus, P. A.; Parsegian, V. A. DNA-inspired electrostatics Physics Today, 53, 38-44, (2000)
- [7] <http://www.um.es/fem/EjsWiki/> (consultado el 6 de septiembre de 2016)

UTILIZAÇÃO DA PLACA ARDUINO EM ATIVIDADES LABORATORIAIS DE FÍSICA 10.º E 11.º ANO

Alberto Câmara¹, Tânia Pacheco²

¹ Escola Secundária de Penafiel

E-mail: acamara@espenafiel.org

² Escola Secundária de Penafiel

E-mail: tpacheco@espenafiel.org

RESUMO

Este trabalho apresenta a montagem e utilização de sistemas de aquisição automáticos de dados, com recurso à placa arduino^[1], na realização das atividades laboratoriais de Física AL3.2. Capacidade térmica mássica - 10.º ano^[2,3] e AL2.2. Velocidade de propagação do som - 11.º ano^[3,4].

Os sistemas apresentados, à semelhança de outros tornam a execução laboratorial mais simples,^[3] utilizam componentes de custo reduzido e permitem com facilidade o ajuste dos parâmetros de aquisição dos dados.

Na AL2.2. Velocidade de propagação do som descreve-se um procedimento experimental alternativo, mas de acordo com as metas curriculares.

INTRODUÇÃO

A placa arduino é uma plataforma de baixo custo e de código aberto, utilizada na construção de protótipos de circuitos eletrónicos, baseada num microcontrolador da Atmel. Quando programada com linguagem de programação arduino (baseada em linguagem C/ C++), e num ambiente integrado de desenvolvimento em Java, permite a leitura e o controlo de circuitos e sensores. Sendo uma plataforma eletrónica muito utilizada, encontram-se publicados em diversos sítios da Internet, esquemas de circuitos electrónicos e códigos, o que permite facilmente a sua utilização.

A plataforma arduino pode, por isso, ser utilizada no ensino da física, integrada em sistemas de aquisição de dados experimentais, em atividades laboratoriais. Nesse sentido, apresentam-se duas propostas para a utilização da placa arduino nas atividades laboratoriais de Física AL3.2. Capacidade térmica mássica - 10.º ano^[2,3] e AL2.2. Velocidade de propagação do som - 11.º ano^[3,4].

A PLACA ARDUINO

A placa arduino (figura 1) é uma placa arduino uno, tem pinos de interface digitais e analógicos que permitem o controlo e comunicação com o circuito electrónico, pinos que se destinam à alimentação do circuito electrónico, um microcontrolador ATMEL ATmega328, uma porta USB para comunicação com o computador e um cristal de quartzo de 16 MHz, que funciona como oscilador, permitindo a contagem do tempo.

A comunicação entre o computador e a placa arduino é feita através o ambiente de desenvolvimento integrado, que contém entre outras ferramentas, exemplos de códigos que podem ser utilizados nos circuitos, propostos pelo próprio fabricante.

UTILIZAÇÃO DA PLACA ARDUINO NA A.L. 3.2 – CAPACIDADE TÉRMICA MÁSSICA – 10.º ANO

A montagem laboratorial (figura 2) é semelhante à descrita no programa de física e química [3], utilizando-se um sensor de temperatura controlado pela placa arduino (figura 3), ligada ao computador. Nessa montagem foi usado um bloco calorimétrico de alumínio, uma fonte de

alimentação e dois multímetros, que permitiram determinar a potência dissipada pela resistência de aquecimento no bloco calorimétrico.



Figura 1. Placa Arduino Uno

O sensor de temperatura que foi utilizado é o sensor DS18S20, com temperaturas de operação entre -55 °C a +125°C, e uma tolerância de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ no intervalo de -10°C a +85°C.



Figura 2. Montagem experimental da A.L. 3.2- Capacidade Térmica Mássica 10.º ano.

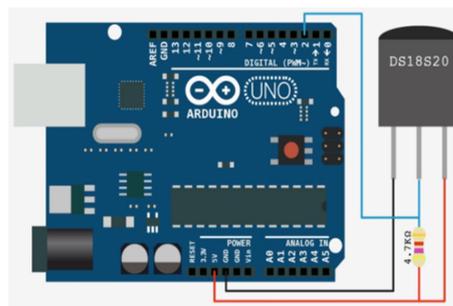


Figura 3. Placa arduino e sensor de temperatura DS18S20, utilizados na actividade laboratorial

Para controlar o sensor de temperatura, foi adaptado um código que estava disponível na Internet^[2]. Contudo, para medir os instantes em que era feita a medição da temperatura, foi necessário introduzir alterações no código: a função `millis()`, para obter o intervalo de tempo, em milissegundo, que decorre desde o início do programa e o instante em que se mede a temperatura; função `delay()`, para fazer pausa no programa durante um intervalo de tempo especificado; função `Serial.print()`, que permite imprimir no monitor do ambiente de desenvolvimento, os valores da temperatura e de cada instante. Os valores medidos encontram-se registados na tabela 1, e na figura 4 encontra-se o gráfico da variação de temperatura ocorrida no bloco em função da energia fornecida, de acordo com a figura 4.

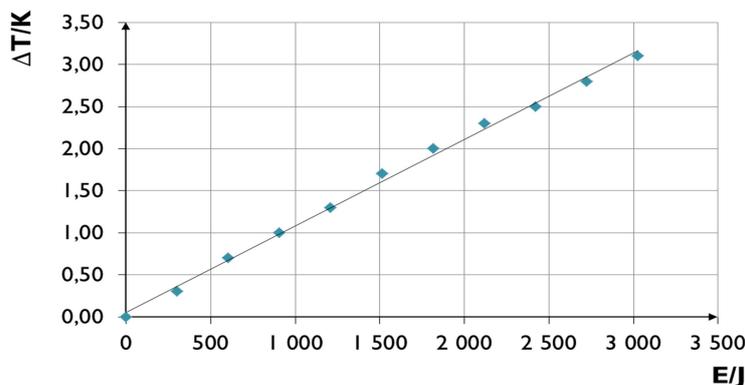


Figura 4. Gráfico ΔT em função de E .

A equação da reta de ajuste dos dados experimentais é de $\Delta T = 1,03 \times 10^{-3} E + 0,0540$ (SI), com $R^2 = 0,997$. De acordo com a expressão $E = m c \Delta T$, o valor do declive será igual a $\frac{1}{m c}$ e deste modo obtivemos os nossos resultados experimentais para o valor da capacidade térmica mássica do bloco calorimétrico, $c = 970 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, com um erro relativo de 7,78 %, que é comum nas condições experimentais consideradas.

Tabela 1. Resultados experimentais obtidos, intervalo de tempo (Δt), temperatura (T), energia dissipada pela resistência eléctrica (E) e variação da temperatura (ΔT)

| $\Delta t/s$ | T/K | E/J | $\Delta T/K$ |
|--------------|-------|-------|--------------|
| 0 | 28,8 | 0 | 0,00 |
| 300 | 29,1 | 302 | 0,30 |
| 600 | 29,5 | 605 | 0,70 |
| 901 | 29,8 | 908 | 1,00 |
| 1201 | 30,1 | 1211 | 1,30 |
| 1501 | 30,5 | 1513 | 1,70 |
| 1802 | 30,8 | 1816 | 2,00 |
| 2102 | 31,1 | 2119 | 2,30 |
| 2402 | 31,3 | 2421 | 2,50 |
| 2703 | 31,6 | 2725 | 2,80 |
| 3003 | 31,9 | 3027 | 3,10 |

UTILIZAÇÃO DA PLACA ARDUINO NA A.L. 2.3 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM – 11.º ANO

Relativamente a esta atividade laboratorial, a montagem consistiu na utilização de um sensor emissor de ultrassons, controlado pela placa arduino que se encontrava ligada ao computador (o nosso sistema de aquisição de dados), que permitiu medir o intervalo de tempo que o som demorou percorrer duas vezes a distância entre este sensor e um obstáculo (figura 5).

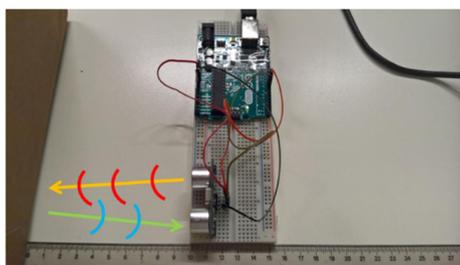


Figura 5. Montagem experimental de um sensor HC-SR04 e de uma placa arduino, montadas numa breadboard ligada a um computador..

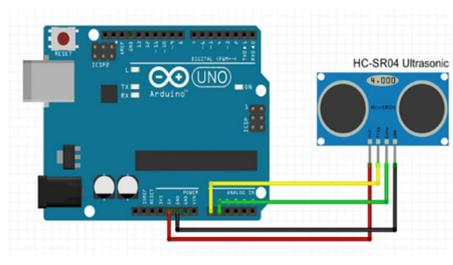


Figura 6. Ligações entre um sensor HC-SR04 e de uma placa arduino

O sensor utilizado é HC-SR04 ultrasonic (figura 6). Para controlar o sensor utilizou-se um código^[4] que inclui, a função **pulseIn()**, que permite determinar o intervalo de tempo que decorre entre a emissão e a receção de um sinal (pulso de ultrassons), em microssegundo.

Os valores medidos encontram-se registados na tabela 2, e na figura 7 encontra-se o gráfico da distância percorrida pelo som, em função do intervalo de tempo.

A equação da reta de ajuste dos dados experimentais é do gráfico da distância percorrida pelo som, em função do tempo (figura 5), é dada por $d = 361 \Delta t - 0,0294$ (SI), com $R^2 = 0,9996$, onde

o valor mais provável da velocidade do som, à temperatura ambiente da sala (32 °C) é de 361 m s⁻¹, com um erro relativo de 2,97 %.

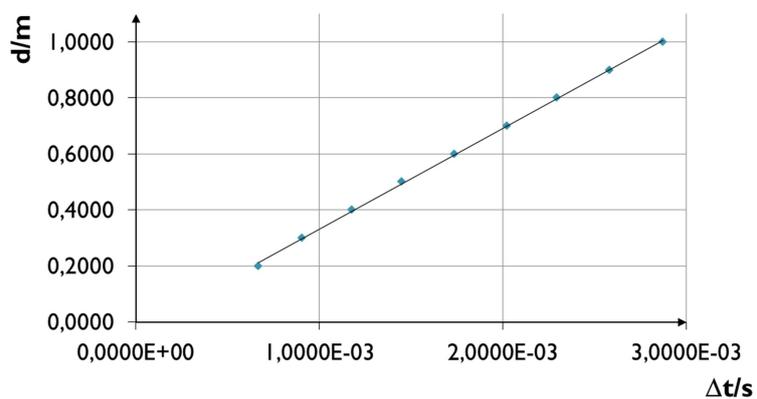


Figura 7. Gráfico da distância total percorrida pelo som em função do intervalo de tempo Δt .

Tabela 2. Resultados experimentais obtidos. Δt – intervalo de tempo, $\overline{\Delta t}$ – valor mais provável do intervalo de tempo, d' – distância entre o sensor e o obstáculo, d – distância total percorrida pelo som.

| $\Delta t/\mu s$ | $\overline{\Delta t}/\mu s$ | d'/cm | d/m | $\overline{\Delta t}/s$ |
|------------------|-----------------------------|---------|--------|-------------------------|
| 667 | | | | |
| 673 | 668,7 | 10,00 | 0,2000 | $6,687 \times 10^{-4}$ |
| 666 | | | | |
| 907 | | | | |
| 907 | 907,0 | 15,00 | 0,3000 | $9,070 \times 10^{-4}$ |
| 907 | | | | |
| 1172 | | | | |
| 1189 | 1177,7 | 20,00 | 0,4000 | $1,1777 \times 10^{-3}$ |
| 1172 | | | | |
| 1448 | | | | |
| 1454 | 1450,0 | 25,00 | 0,5000 | $1,4500 \times 10^{-3}$ |
| 1448 | | | | |
| 1736 | | | | |
| 1730 | 1734,3 | 30,00 | 0,6000 | $1,7343 \times 10^{-3}$ |
| 1737 | | | | |
| 2007 | | | | |
| 2033 | 2024,7 | 35,00 | 0,7000 | $2,0247 \times 10^{-3}$ |
| 2034 | | | | |
| 2295 | | | | |
| 2295 | 2293,0 | 40,00 | 0,8000 | $2,2930 \times 10^{-3}$ |
| 2289 | | | | |
| 2577 | | | | |
| 2584 | 2579,3 | 45,00 | 0,9000 | $2,5793 \times 10^{-3}$ |
| 2577 | | | | |
| 2868 | | | | |
| 2875 | 2870,3 | 50,00 | 1,0000 | $2,8703 \times 10^{-3}$ |
| 2868 | | | | |

CONCLUSÕES

Os sistemas de aquisição automática de dados permitem dedicar mais tempo ao tratamento e análise, testar diferentes condições experimentais e várias estratégias pedagógicas, uma vez que não é necessário efetuar presencialmente leituras sistemáticas. A utilização nos laboratórios de Física de sistemas de aquisição de dados baseados na placa arduino apresenta algumas vantagens: baixo custo, e com isso utilização de várias montagens em sala de aula, potenciando a autonomia dos alunos na realização das atividades experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/331702.pdf> (Consultado a 20 de março de 2016)
- [2] <http://bildr.org/2011/07/ds18b20-arduino/> (Consultado a 20 de março de 2016)
- [3] C. Fiolhais, C. Portela, G. Ventura, R. Nogueira, In: Programa de Física e Química A 10.º e 11.º anos – Curso científico-humanístico de Ciências e Tecnologias, páginas 27, 33, 36, 70 e 74. Ministério da Educação e Ciência (2014)
- [4] <http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Ping> (Consultado a 20 de março de 2016)

LABORATÓRIOS REMOTAMENTE CONTROLADOS

Manuel Santos¹, Josué Lopes¹, João Fortunato², Samuel Balula², Horácio Fernandes²

¹ Departamento de Física. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-001 Lisboa, Portugal.

² Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa. Av. Rovisco Pais, 1 - 1049-001 Lisboa, Portugal.

RESUMO

Os Laboratórios Controlados Remotamente (LCR) estão em expansão e existe a necessidade de uma framework acessível, ainda que robusta e barata, para publicar experiências privadas baseadas na "Internet das Coisas". Neste artigo será introduzida uma framework baseada em software e hardware livres, largamente disponíveis, que podem ser usados em escolas ou até por qualquer pessoa com conhecimentos básicos de programação. Discute-se como ligar um microcontrolador capaz de lidar com uma montagem experimental a um Raspberry Pi [1] e como ligar este à Internet utilizando a framework Go-Lab [2]. Mostra-se também como manter a experiência remotamente, nomeadamente em termos de updates ao firmware do controlador. Dá-se o exemplo de uma experiência realizada utilizando a tecnologia descrita, demonstrando-se as capacidades deste método.

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia é imperativo adaptar a sala de aula aos tempos modernos incorporando as novas tecnologias. Os estudantes estão rodeados por novas tecnologias e a sua ausência na sala de aula desmotiva-os. Tendo em conta que um dos melhores métodos de aprendizagem é participar no processo de descoberta e que a ciência tem uma natureza inerentemente experimental, verifica-se que é um dos melhores temas para estar disponível através de aulas remotas, já que nem sempre é possível realizar experiências em sala de aula devido ao seu perigo ou custo.

Demonstra-se assim como implementar uma experiência baseada na framework Go-Lab [2]. Esta tem como objetivos otimizar o desenvolvimento de novos laboratórios remotamente controlados e permitir a integração das experiências em plataformas de terceiros, baseadas na web. Deste modo, alunos e professores podem aceder a um conjunto de ferramentas e conteúdos que estende o que é providenciado pela experiência. Faz-se assim referência à plataforma Graasp [3] que, em conjunto com as experiências disponibilizadas pelo Go-Lab, procura oferecer uma plataforma baseada no conceito de Inquiry Learning, oferecendo aos professores a possibilidade de construir Inquiry Learning Spaces através de "Apps andaime", criando um ambiente onde os seus alunos podem aprender questionando, experimentando e discutindo resultados de forma estruturada.

Deste modo, refere-se como implementar um laboratório remotamente controlado compatível com a framework Go-Lab utilizando hardware comum e software livre. Em particular, refere-se como programar o controlador da experiência e o servidor responsável pela comunicação com o mundo exterior.

Finalmente, dá-se o exemplo de uma experiência sobre radioactividade, que devido ao perigo que apresenta é uma candidata adequada ao modelo de laboratório remotamente controlado, implementada de acordo com os métodos referidos.

2. GO-LAB

O projecto Go-Lab (Global Online Science Labs for Inquiry Learning at School) tem como objectivo o uso em larga escala nas escolas de laboratórios científicos online, remotos e virtuais. O projecto disponibiliza laboratórios remotos e virtuais para diferentes ramos da ciência como a Física, a Astronomia, a Química, a Biologia, a Geografia e a Matemática. Pretende ainda disponibilizar aos professores um conjunto de aplicações de *Inquiry Learning* que suportem os

alunos no processo de questionar e construir hipóteses, conduzindo experiências científicas e tirando conclusões [2], em particular através do suporte da plataforma *Graasp*.

Do ponto de vista técnico, de forma a implementar um laboratório remoto compatível com o projecto *Go-Lab* é necessário seguir o paradigma *Smart-Device* [4]. Este especifica uma arquitectura Cliente-Servidor dissociada em que a "inteligência" está do lado do Servidor, sendo que não se fazem quaisquer assunções sobre o Cliente utilizado.

Nesta especificação é também definido que um *Smart Device* oferece aos Clientes funcionalidades e serviços. Uma funcionalidade é definida como o comportamento interno do aparelho, como autenticação, estado da experiência ou qualquer outro que o dono do laboratório decida implementar. Um serviço representa um sensor ou actuador que faça parte da montagem experimental e que é disponibilizado ao mundo exterior através de uma API bem definida (*Swagger API*). Os serviços deverão estar totalmente descritos e documentados de forma a que qualquer cliente os possa usar sem qualquer explicação adicional [4].

3. GRAASP

A plataforma *Graasp* pretende oferecer aos professores uma ferramenta através da qual personalizar a forma como os alunos interagem com os laboratórios online, remotos e virtuais, disponibilizados pelo *Go-Lab*. É assim possível direccionar os alunos para os conceitos chave dependendo da situação específica de cada aula através da construção de *Inquiry Learning Spaces*. Logicamente estes estão organizados em etapas segundo o ciclo de *Inquiry Learning*: "Orientação e Conceptualização", "Investigação" e "Conclusão e Discussão". Na primeira fase é dada aos alunos a oportunidade de juntar informação sobre o tópico, tirando notas e criando hipóteses a testar. De seguida têm oportunidade de interagir com o laboratório *online*, recolhendo dados relevantes para o teste das hipóteses que criaram e confrontando as hipóteses com os dados que recolhem. Na terceira e última fase têm a oportunidade de explicar as hipóteses utilizando os dados que recolheram, reflectindo no processo, comparando resultados e discutindo com colegas [2].

Não é necessário ter conhecimentos de programação para criar *Inquiry Learning Spaces* já que a plataforma disponibiliza "*Apps andaime*", que incluem funções como cálculo de erros experimentais, mapas de conceitos, quadros de discussão digitais e ferramentas de análise que permitem verificar o progresso dos alunos, de entre as quais os professores poderão escolher as apropriadas para a aula.

A plataforma permite ainda a inclusão de ficheiros próprios, como protocolos criados pelos professores ou vídeos sobre a matéria em questão, agrupando numa só interface todos os dados e informação de que os alunos necessitam para executar a experiência.

4. CONTROLADOR

É difícil especificar uma arquitectura para o controlador que seja universal a todas as experiências a desenvolver. Isto deve-se à grande variedade de controladores que é possível usar, bem como à variedade de sensores e actuadores usados conforme a experiência a implementar. No entanto, é possível especificar um esquema de funcionamento base sobre o qual é desenvolvido o sistema de controlo da experiência. Foi assim definida uma máquina de estados com os estados: "STOPPED", "CONFIGURED", "STARTED" e "RESET" [5]. O estado "STOPPED" é o estado de stand-by da experiência, sendo que os actuadores e os sensores estão em posição de repouso. Após o comando de configuração a experiência passa para o estado "CONFIGURED". Os actuadores movem os sensores e/ou as partes móveis necessárias à execução da experiência para a posição indicada no comando de configuração e a experiência espera pelo comando de início para começar a recolha de dados. Após a recepção do comando de início, a experiência transita para o estado "STARTED", recolhendo dados tal como ordenado no comando de configuração. Após a finalização da recolha de dados, a experiência volta ao estado de "STOPPED", estando novamente pronta para ser configurada e fazer nova recolha de dados. Caso entre em algum estado indefinido, o controlador efectua um

reset de software, tentando de seguida configurar a experiência tal como normalmente definido no estado "STOPPED" e passando a esse estado em caso de sucesso.

5. SERVIDOR

O servidor é responsável por fazer a interface entre o controlador da experiência e o mundo exterior. Deste modo, deverá estar exposto à Internet, quer através de IP público quer através de uma ligação VPN com uma máquina intermediária com IP público, e deverá ser capaz de responder a pedidos segundo o paradigma *Smart Device*, de modo a que o laboratório possa ser publicado na plataforma *Go-Lab*.

Assim, foi criada uma base de código baseada em *Javascript* e na *framework* Node.js [6]. Esta *framework* permite a rápida e simples implementação de um servidor baseado no protocolo *websockets*, modo de comunicação definido no paradigma *Smart-Device* [4], em especial se for feito uso da arquitectura *event-driven* da mesma. Esta permite a programação do servidor para responder a eventos específicos, como a recepção de dados via porta série ou a recepção de pedidos de clientes, simplificando o código.

De forma a comunicar com o controlador foi utilizada a biblioteca de Node "*serialports*" [7] para comunicação via porta série e para a comunicação via *websockets* foi utilizada a biblioteca "*ws*" [8]. A comunicação Servidor-Controlador não está definida no standard *Smart-Device*, mas é interessante ter um standard próprio já que isto uniformiza a comunicação e o código necessário para a realizar, agilizando o desenvolvimento de novos laboratórios. Tal como especificado no standard *Smart-Device*, o Servidor deverá também ter disponível o serviço de metadata. Este, baseado na *Swagger API*, fornece aos Clientes todos os dados necessários para descrever a experiência, como os sensores e actuadores que a compõem e quais os seus limites, no formato JSON. O *standard Smart-Device* dita que os Clientes devem ser capazes de executar a experiência baseando-se apenas na informação disponibilizada através do serviço de metadata sem que seja necessária qualquer informação extra.

6. CLIENTE

A especificação *Smart-Device* é permissiva em relação aos Clientes, uma vez que coloca toda a "inteligência" do lado do Servidor. Deste modo, de forma a criar um cliente conforme o standard é necessário apenas utilizar o protocolo *websockets* para realizar a ligação ao Servidor e utilizar os dados disponibilizados pela serviço de metadata para recolher a informação necessária para reconhecer os serviços disponibilizados pelo laboratório. Os Clientes a utilizar podem assim ser de natureza variada, podendo variar de Clientes baseados em páginas Web, como no caso *Go-Lab*, até aplicações *standalone* para interagir com as experiências.

7. MANUTENÇÃO REMOTA E PROGRAMAÇÃO

De forma a implementar um laboratório remoto é importante garantir que é possível fazer a manutenção do mesmo de forma remota, já que o hardware pode estar localizado num local distante. Minimiza-se assim o número de viagens/transportes necessários para efeitos de manutenção, ficando apenas os necessários para manutenção do hardware.

De forma geral, o Servidor poderá ser mantido remotamente através da Internet fazendo uso de protocolos como o SSH e SCP, largamente disponíveis em todas as arquitecturas de computadores disponíveis no mercado. Já o *firmware* do controlador terá de ser actualizado através do Servidor pelo que, dependendo do modelo de controlador utilizado, é necessário verificar se as ferramentas e interfaces necessárias à programação estão disponíveis.

8. RADIARE: IMPLEMENTAÇÃO GO-LAB

A experiência Radiare faz parte do amplo conjunto de laboratórios remotamente controlados disponibilizados pela plataforma E-Lab [5]. Tem como objectivo permitir o estudo da absorção de radiação por diferentes materiais bem como a variação da intensidade de radiação com a distância à fonte. De forma a torná-la compatível com a plataforma *Go-Lab* foram aplicados os conceitos discutidos.

Para Servidor foi selecionado um computador de "bolso" *Raspberry* Pi 2 B e para Controlador um microcontrolador dsPIC30F4011. É possível programar os microcontroladores PIC através do *Raspberry* fazendo uso do utilitário *picpgm* [9] sendo que é ainda assim necessário fazer uso de uma placa de interface já que o modelo utilizado necessita de 12V para ser programado, valor que ultrapassa o 3.3V gerados pelo GPIO do *Raspberry*. Para Cliente foi criada uma interface web, disponível em 193.136.136.135/index.html, fazendo uso de Javascript, HTML e CSS. Esta permite controlar a experiência e visualizar os dados disponibilizados pelo serviço de metadata e é disponibilizada pelo mesmo dispositivo que faz de Servidor, o *Raspberry*, embora isso não seja requerido pelo standard *Go-Lab* ou tecnologicamente necessário.

Verifica-se que esta implementação é em tudo semelhante à já existente, sendo possível executar a experiência da mesma forma.

9. CONCLUSÕES

Verifica-se que as tecnologias relacionadas com os laboratórios remotamente controlados estão agora suficientemente maduras para poder oferecer a professores e alunos uma experiência personalizável que ultrapassa o conceito de simplesmente disponibilizar o acesso a uma experiência.

É possível implementar com sucesso os standards descritos fazendo uso apenas de hardware e software comum. Isto maximiza o número de recursos auxiliares disponíveis na Internet, o que facilita e agiliza o desenvolvimento e manutenção dos sistemas associados aos laboratórios, e minimiza o custo associado à aquisição e manutenção do hardware.

Os standards não limitam de forma alguma o funcionamento dos laboratórios, sendo possível implementar experiências em tudo semelhantes às já criadas e disponibilizadas.

REFERÊNCIAS

- [1] R. P. Foundation, "\Raspberry pi", 2015, [Online; accessed 11-December-2015]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>
- [2] S. Govaerts and W. Halimi, "\Specifications of the Lab Owner and Cloud Services (Final) { M30 revision,"Go-Lab Project, Research Report, Jul. 2015. [Online]. Available: http://www.go-lab-project.eu/sites/default/_les/_les/deliverable/_le/Go-Lab%20D4.5.pdf
- [3] Graasp, "Frontpage", 2016, [Online; accessed 21-August-2016]. Available: <http://graasp.eu/>
- [4] C. Salzmann, S. Govaerts, W. Halimi, and D. Gillet, "\The smart device specification for remote labs," in Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2015. 12th International Conference on. IEEE, 2015, pp. 199-208.
- [5] Neto, F. Rui, P. Horacio, D. Jose, and Andre, "\e-lab remote laboratory integrated overview," 2012.
- [6] Node.js Foundantion, "Frontpage", 2015, [Online; accessed 10-May-2015]. Available: <https://nodejs.org/en/>
- [7] EmergingTechnologyAdvisors, "node-serialport", 2015, [Online; accessed 20-March-2015]. Available: <https://github.com/EmergingTechnologyAdvisors/node-serialport>
- [8] websockets, "ws", 2015, [Online; accessed 20-March-2015]. Available: <https://github.com/websockets/ws>
- [9] C. Stadler, "\Frontpage", 2015, [Online; accessed 10-October-2015]. Available: http://picpgm.picprojects.net/install_raspberry_pi.html

A APRENDIZAGEM COLABORATIVA NO ENSINO INTERATIVO DA ELETRICIDADE

M. J. Quintas^{1,2}, P. Simeão Carvalho^{2,3}

¹ Agrupamento de Escolas de Valbom, Gondomar, Portugal

² IFIMUP-IN, Porto, Portugal

³ Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal

quintas.mariajose@gmail.com; psimeao@fc.up.pt

RESUMO

Há diversos trabalhos na literatura que mostram as vantagens da aprendizagem colaborativa [1,2]. Neste trabalho analisamos criticamente os resultados alcançados na lecionação da Eletricidade em escolas do ensino básico, do distrito de Lisboa, tendo por referencial o trabalho colaborativo como parte fundamental de um ensino interativo.

Na escola do Grupo de Controlo (GC) foi seguida uma abordagem tradicional; na escola do Grupo Experimental (GE) implementámos estratégias interativas e colaborativas, recorrendo a metodologias ativas como a *Peer Instruction* [2] e o *Just-in-Time Teaching* [3].

Os resultados apontam para ganhos de aprendizagem dos alunos pertencentes ao GE superiores aos do GC, validando a hipótese de que a implementação desta abordagem no ensino aumenta a qualidade das aprendizagens dos alunos.

INTRODUÇÃO

Nos últimos vinte anos um número crescente de investigadores tem contribuído ativamente para o avanço do ensino da Física, com propostas e investigações didáticas publicadas em livros ([1], [2], [4], [5]) e artigos científicos ([6], [7]). Na sua globalidade, os resultados destas pesquisas indicam que há um desfasamento entre o que é ensinado nas salas de aula e a aprendizagem dos alunos, para além de ainda se privilegiar em demasia as metodologias competitivas e o individualismo.

Neste estudo optámos por levar em linha de conta a convicção de Sokoloff (1995) que defende que a realização de atividades práticas de laboratório (APL) é indispensável para conduzir à compreensão e assimilação de conceitos da Física, uma ciência reconhecidamente experimental. Esta visão do ensino e aprendizagem é tão indispensável como aquelas que têm por base o recurso a recursos educativos digitais (RED) e ao uso das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) [3]. Na sua globalidade, as APL, as RED e em geral as TIC, disponibilizam ao professor um leque de opções letivas que irão certamente ao encontro da panóplia de metodologias existentes, conducentes à eficaz aprendizagem conceptual pelos estudantes. Bastará para tal, que estejam ao dispor do professor vários recursos materiais e tecnológicos e que ele tenha a capacidade de os utilizar. Desta forma, poderá criar um ambiente de debate, de confronto de ideias e de análise crítica de fenómenos, que favoreçam um ambiente propício para que os estudantes tirem conclusões cientificamente corretas.

CARACTERIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

Neste estudo, aplicado no ano letivo 2014/ 2015 a 160 alunos do distrito de Lisboa, pretendeu-se compreender qual o impacto na aprendizagem dos alunos, da conjugação dos recursos educativos interativos com a formação especializada em metodologia interativa na prática letiva.

Assim, na Escola Básica de Alcabideche (GE), os recursos educativos foram explorados por um dos autores, recorrendo a metodologias ativas como a *Peer Instruction* (Instrução pelos colegas – IpC) (Mazur, 1997), cujo foco principal se baseia no questionamento e no debate entre alunos e o *Just-in-Time Teaching* (Ensino sob Medida – EsM) (Novak et al., 1999), que tem como

linha orientadora na arquitetura de cada aula o conhecimento prévio dos alunos. Por oposição, na Escola Secundária IBN-Mucana (GC) os alunos tiveram um ensino tradicional (metodologia expositiva) e sem acesso a recursos educativos interativos.

Como instrumentos de avaliação foram aplicados: **(i)** Ficha de Caracterização (GE e GC); **(ii)** Pré-Teste de conhecimentos (GE e GC); **(iii)** Pós-Teste de conhecimentos (GE e GC); **(iv)** Inquérito (GE), **(v)** Entrevistas áudio (GE).

O teste de conhecimentos contempla 23 questões de escolha múltipla, tendo sido aplicado antes e após a exploração dos conteúdos da eletricidade (pré e pós-teste).

Durante a intervenção, um dos autores aplicou alguns dos seguintes recursos didáticos: 11 Roteiros de Exploração de Vídeo Educativo (REVE); 11 Atividades Práticas de Laboratório (APL); 8 Roteiros de Exploração de *Software* Educativo (RESE); 9 *Quizzes* e 1 *WebQuest*.

Para a implementação dos recursos anteriormente referidos privilegiou-se o ensino colaborativo entre pares e deu-se especial atenção à aprendizagem conceptual. O frequente e imediato *feedback* dado à professora pelos alunos – relativamente ao que tinham compreendido, onde apresentavam dificuldades, quais as conceções alternativas, quando não se envolviam ativamente nas tarefas propostas, permitiram tornar as aprendizagens visíveis, manter os alunos informados dos seus sucessos e auxiliar os alunos na correção dos possíveis equívocos.

As aulas sobre Eletricidade foram levadas a cabo em dois espaços distintos, o laboratório de Física e Química e a sala de Informática. Em ambos foram criadas zonas de apresentação, trabalho individual e trabalho colaborativo.

Antes e depois da exploração dos Recursos Educativos Digitais (RED) foi feita uma exploração em grande grupo. Esta medida permitiu elucidar os alunos dos objetivos das tarefas, esclarecer algumas dúvidas dos protocolos experimentais e/ ou roteiros de exploração, discutir as barreiras conceptuais e sistematizar as conclusões alcançadas.

No desenvolvimento do trabalho colaborativo a professora informou quais os três elementos que constituíam cada grupo. Em geral, estes elementos apresentavam níveis diferentes de capacidades e como tal, foram informados que teriam a missão não somente por aprender o que estaria a ser lecionado, mas também de ajudar os colegas, criando um ambiente colaborativo efetivo. Para cada elemento foi atribuído, rotativamente, os seguintes papéis: “Guardião do Tempo”, “Controlador das Aprendizagens” e “Capitão do Silêncio”.

Os *Quizzes* consistiam em questões conceptuais de resposta fechada e foram apresentadas após o ensino de cada um dos subtemas de Eletricidade. A figura 1 ilustra a processo de aplicação das perguntas, repartido nas seguintes etapas:

(i) apresentação da questão; **(ii)** tempo para os alunos pensarem sobre a questão; **(iii)** cada aluno fornece a sua resposta; **(iv)** os alunos devem discutir com os colegas vizinhos; **(v)** possibilidade de rever e mudar de hipótese de resposta; **(vi)** nova votação; **(vii)** explicação; **(viii)** nova questão/ próximo tópico.

Na realização da *WebQuest* os alunos foram informados para não se limitarem a efetuar pesquisas na internet, que por vezes se tornam estéreis. Todavia, foi-lhes apontada a necessidade de aproveitar a informação existente na rede para conseguir realizar as tarefas propostas. De certa forma a *WebQuest* constituiu uma “investigação orientada”, que teve como fonte de pesquisa alguns endereços *online* facultados pelos professores.

RESULTADOS

Os resultados foram alvo de uma análise qualitativa e quantitativa, seguindo uma metodologia quase-experimental semelhante à proposta por Campbell e Stanley (1979) [9].

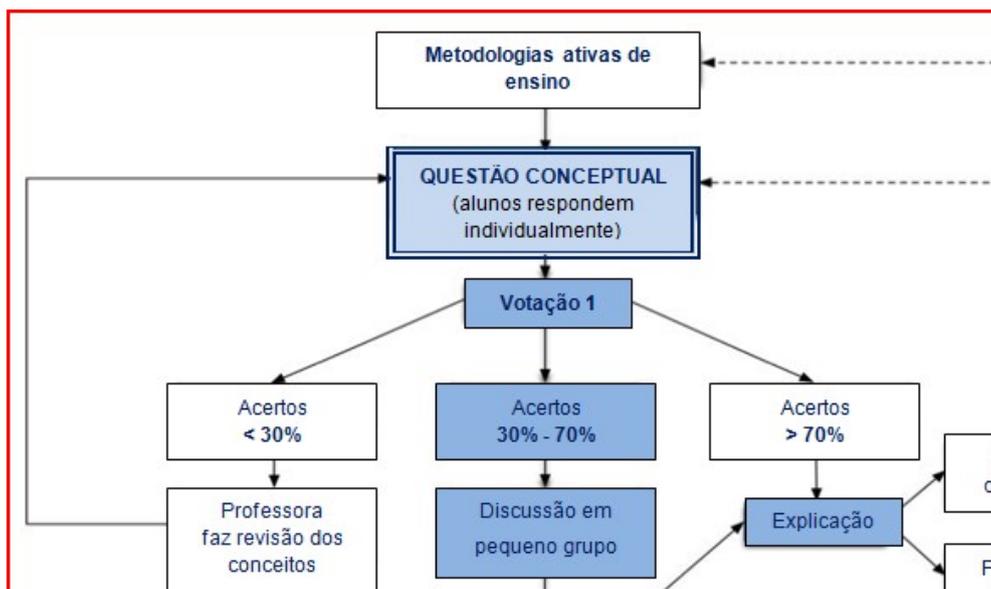


Figura 1. Diagrama de implementação dos Quizzes (Adaptado de Lasry, Mazur e Watkins, 2008 [8])

Da análise da tabela 1 e do gráfico 1 referentes ao estudo quantitativo, verifica-se que, em média, houve um ganho positivo em ambos os grupos. No GC o ganho absoluto médio foi de 12,48% e o ganho normalizado médio foi de 16,17%. Relativamente ao GE, este obteve um ganho absoluto médio de 30,59% e um ganho normalizado valor médio de 39,36%. Portanto, os valores médios dos ganhos no GE são muito superiores aos respetivos valores registados no grupo de controlo.

Em ambos os grupos de alunos, a dispersão de resultados (dada pelo desvio padrão) é elevada, mas a do GE é sempre inferior à do grupo de controlo.

Tabela 1. Ganho absoluto e relativo, por grupo de estudo

| Ganho | Grupo Controlo (GC) | | | Grupo Experimental (GE) | | |
|--------------------|---------------------|---------------|---|-------------------------|---------------|---|
| | Média | Desvio padrão | Estatística teste <i>t</i> (valor de prova) | Média | Desvio padrão | Estatística teste <i>t</i> (valor de prova) |
| Absoluto | 12,48% | 14,28% | 10,045(0,000) | 30,59% | 12,77 % | 12,674(0,000) |
| Normalizado | 16,17% | 19,09% | 9,732(0,000) | 39,36% | 13,63 % | 15,283(0,000) |

O GC teve um ganho normalizado próximo dos 20%, consistentes com os relativos à aprendizagem com uma metodologia tradicional e tendo como referência outros testes de conhecimento conceptual [2]. Em contraste, o GE apresenta um ganho normalizado de aprendizagem significativamente superior, próximo dos 40% (região por muitos associada à aprendizagem com um ensino interativo [1]).

Pela aplicação do teste *t* para grupos independentes conclui-se que as diferenças observadas são estatisticamente significativas, ou seja, pode-se afirmar que a evolução positiva de resultados é significativamente superior no grupo experimental, face o grupo de controlo.

CONCLUSÕES

De uma forma geral, a diferença na aprendizagem dos grupos GE e GC é relevante e evidencia a influência de vários fatores conjugados: metodologia de ensino, recursos educativos usados e formação adequada na prática letiva. Estes resultados sugerem que a aplicação de um ensino interativo por professores adequadamente preparados para potenciar esta prática letiva e a

exploração de recursos usando estratégias interativas em detrimento da prática de ensino tradicional, tornam mais vantajosa a aprendizagem dos alunos e, como tal, pode ter reflexos consideráveis no aproveitamento escolar.

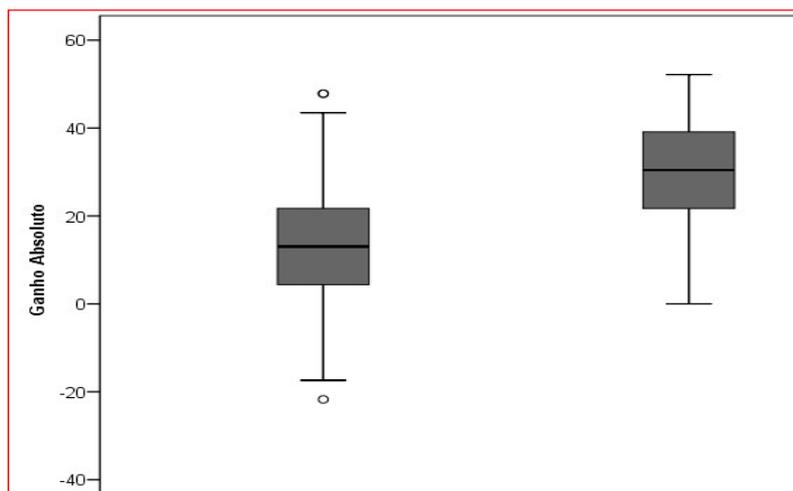


Gráfico 1. Ganho absoluto por grupo de estudo

REFERÊNCIAS

- [1] Lopes, J., Silva, H. S.. A aprendizagem cooperativa na sala de aula – Um guia prático para o professor, Lidel. 2009.
- [2] Mazur, E., Peer Instruction: a User's manual, Prentice Hall Series in Educational Innovation. 1997.
- [3] Novak, G. M., Patterson, E. T., Gavrín, A., Christian, W., Just-in-Time-Teaching: Blending Active Learning with Web Technology, Prentice Hall (Upper Saddle River, New Jersey). 1999.
- [4] Sokoloff, D.; Thornton, R.; Laws, P. RealTime Physics: Active Learning Laboratories, Volumes 1 - 4. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1999-2004.
- [5] Arons, A.B. Teaching Introductory Physics. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1997.
- [6] Hake, R.R.. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. American Journal of Physics, 6, 64-74. 1998.
- [7] Hofstein, A.; Lunetta, V. The Laboratory in Science Education: Foundations for the Twenty-First Century, Science Education, 88 (1), 28-54, 2004.
- [8] LASRY, N.; MAZUR, E.; WATKINS, J. Peer instruction: from Harvard to the two-year college. American Journal of Physics, v. 76, n. 11, p. 1066(4), 2008.
- [9] Campbell, D. T Stanley, J. C.. Delineamentos experimentais e quase-experimentais de pesquisa, Tradução de R.A.T. Di Dio. São Paulo: EPU-EDUSP. 1979.

COMBUSTÃO DA VELA: ATIVIDADES REALIZADAS NA EDUCAÇÃO PRÉ-ESCOLAR E NO 1.º CICLO DO ENSINO BÁSICO

José Jorge Teixeira¹, Lígia Teixeira², Armando A. Soares^{3,4,5}

¹ Agrupamento de Escolas Fernão de Magalhães, 5400-285 Chaves, Portugal

E-mail: jjsteixeira@gmail.com

² Agrupamento de Escolas Dr. Júlio Martins, 5400-017 Chaves, Portugal

E-mail: ligiateixeira@aejm.pt

³ Dep. de Física – ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: asoares@utad.pt

⁴ Ciener-INEGI/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

⁵ LabDCT/CIDTFF, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

RESUMO

Apesar de existirem muitas referências relativas à combustão de uma vela dentro de um copo invertido parcialmente imerso numa tina com água, alguns recursos didáticos ainda explicam incorretamente as razões que levam à variação do volume de ar dentro do copo e a vela a apagar-se. No âmbito do projeto Física e Química para os + pequenos elaborou-se um guião, sobre a atividade da vela, tendo por base os resultados da investigação desenvolvida no Clube do Ensino Experimental das Ciências. Neste trabalho mostramos as atividades desenvolvidas e os resultados obtidos em 30 turmas (pré-escolar e 1.º ciclo).

INTRODUÇÃO

As orientações curriculares para a educação pré-escolar encaram a Área do Conhecimento do Mundo como uma sensibilização às ciências naturais e sociais, tendo por finalidade lançar as bases da estruturação do pensamento científico. Propõem uma abordagem contextualizada e desafiadora, rigor na abordagem dos conceitos e no desenvolvimento dos processos fomentando, nas crianças, uma atitude científica e experimental [1]. Neste documento não são dadas indicações quanto ao tipo de atividades práticas que se deverão promover com as crianças, apenas são referidos alguns conteúdos relativos à Física e à Química que poderão ser explorados, tais como o ar, a luz e a água.

O programa de Estudo do Meio do 1.º ciclo do ensino básico (1.º CEB) encontra-se dividido em seis blocos, sendo o bloco 5 destinado à descoberta dos materiais e objetos onde se pretende desenvolver nos alunos uma atitude de permanente experimentação [2]. Apesar de este bloco surgir quase no final do programa, os professores “podem alterar a ordem dos conteúdos, associá-los a diferentes formas, variar o seu grau de aprofundamento ou mesmo acrescentar outros” (p. 102). A realização de experiências com o ar está presente no 2.º ano e no 4.º ano do programa. No 2.º ano, as atividades centram-se no reconhecimento da existência do ar, no reconhecimento do seu peso e no comportamento de objetos na presença de ar quente e de ar frio. No 4.º ano, o programa vai mais além e propõe o reconhecimento, através de experiências, da existência de oxigénio no ar e da pressão atmosférica. Neste documento também não são dadas indicações quanto ao tipo de atividades práticas a desenvolver.

A combustão de uma vela dentro de um copo invertido parcialmente imerso numa tina com água é uma atividade clássica, simples de executar, surpreendente de assistir e de explicação complexa (Figura 1) [3].

Alguns recursos didáticos ainda explicam incorretamente as razões que levam à variação do volume de ar dentro do copo e a vela a apagar-se. A explicação incorreta mais frequente para a variação de volume de ar dentro do copo é a seguinte: durante a combustão o oxigénio do ar, o carbono e o hidrogénio da vela combinam-se para produzir dióxido de carbono e vapor de água; após a combustão, todo o oxigénio foi consumido havendo uma redução de 21% de gás dentro

do copo (é desprezado o volume do dióxido de carbono e do vapor de água produzido); a água, impelida pela pressão exterior, entra no recipiente ocupando o espaço libertado pelo oxigénio. Contudo, o principal fator da explicação desta atividade está relacionado com a expansão do ar durante o aquecimento e com a sua contração quando arrefece [4, 5]. A chama da vela aquece o ar dentro do copo obrigando-o, a expandir e a sair e, quando esta se extingue, a pressão no interior do copo diminui devido ao arrefecimento do ar, forçando a entrada de água no copo.

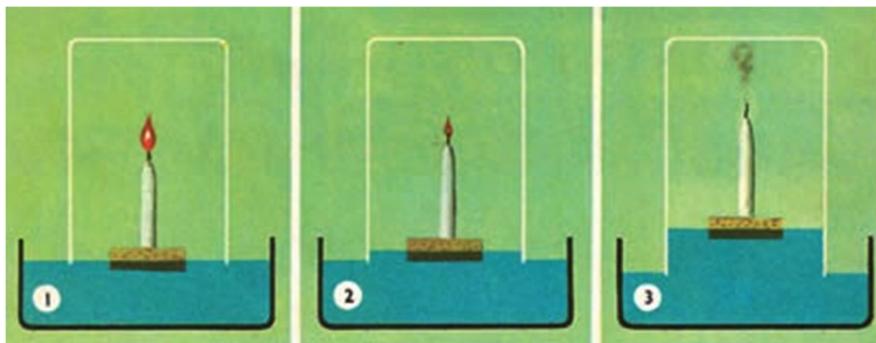


Figura 1. Esquema de montagem da atividade da combustão da vela.

O equívoco do consumo total de oxigénio chamou a atenção da revista *New Scientist* quando três alunos solicitaram uma explicação para as suas observações que contrariavam a explicação do consumo de oxigénio dada pelo seu professor. O editor referiu que será um choque para milhões de crianças em idade escolar e para muitos professores saberem que a explicação desta atividade clássica, através do consumo total de oxigénio, está incorreta [6]. Os resultados da investigação realizada no Clube do Ensino Experimental das Ciências, com alunos do ensino secundário, mostram que, desde o início da combustão até a vela se apagar, a concentração de oxigénio variou de 20,6 % até 17,0 % [3]. Na realidade, a concentração de oxigénio diminui para valores entre 14 e 19 %, após a combustão [7, 8].

Assim, o objetivo deste trabalho é verificar em que medida as crianças da educação pré-escolar e os alunos do 1.º CEB conseguem prever e explicar por que razão a água sobe, quando a vela se apaga, dentro de um copo invertido e parcialmente imerso numa tina com água.

Os resultados deste trabalho poderão dar indicações sobre a idade a partir da qual esta atividade poderá ser implementada em contexto de sala de atividades/aula.

METODOLOGIA

Para a consecução do objetivo deste trabalho foi criado um guião do educador/professor para aplicar na educação pré-escolar e no 1.º CEB, no âmbito do projeto Física e Química para os + pequenos, tendo por base os resultados da investigação realizada no Clube do Ensino Experimental das Ciências [3]. Este projeto tem como objetivos, entre outros, pôr em contacto as crianças e os alunos com a metodologia própria das ciências e fomentar uma atitude científica e de permanente experimentação.

Depois de construído, o guião foi validado por dois educadores de infância, um professor do 1.º CEB e um professor de Física do ensino universitário, todos com mais de 20 anos de experiência. Com base nas suas sugestões fizeram-se alguns ajustes na linguagem, no sentido de o tornar mais perceptível e adequado para aqueles grupos etários. Decidiu-se omitir a existência e o consumo de oxigénio do ar pela complexidade destes assuntos e por não ser este o principal fator da explicação da subida da água dentro do copo. Contudo, optou-se por manter, no enquadramento científico do guião, uma referência escrita e um gráfico acerca da variação da concentração do oxigénio durante a combustão da vela dentro de um copo invertido, até porque no manual do 4.º ano adotado pelas escolas, onde o guião foi aplicado, é referido que a vela se apaga, sob copos invertidos, quando se consome o oxigénio do ar. Assim, na sua versão final, decidiu-se centrar a explicação da subida do nível da água dentro do copo apenas na dilatação e na contração do ar.

Para comprovar a adequação do guião realizou-se uma primeira aplicação do mesmo em duas turmas. O objetivo de aplicar previamente o guião prendeu-se com a necessidade de detetar eventuais dificuldades por parte dos educadores/professores, bem como garantir que o tempo previsto seria suficiente para a realização das atividades propostas e respetivos registos.

Tendo em conta o nível etário das crianças/alunos propõe-se no guião a realização de duas atividades (*A* e *B*). A atividade *A* é do tipo *orientada para a determinação do que acontece* e está estruturada de modo a levar os alunos à obtenção dos resultados pretendidos e que, à partida, desconheciam. A atividade *B*, realizada posteriormente à atividade *A*, é do tipo *prevê-observa-explica-reflete* e está organizada de modo a permitir a reconstrução do conhecimento das crianças/alunos [9]. A atividade *A* tem como objetivos descobrir que o ar dilata quando exposto a uma fonte quente e contrai quando em contacto com uma fonte fria e verificar que a água pode ocupar o lugar do ar quando este se contrai. Para a realização desta atividade propõe-se a construção de um instrumento (Figura 2) que permite observar a contração/dilatação do ar através do balão superior e visualizar a água a ocupar o espaço libertado pelo ar, quando este se contrai através da subida da água corada no tubo ligado ao balão inferior. Esta atividade está centrada na seguinte questão problema: o ar ocupa o mesmo espaço no verão e no inverno?



Figura 2. Instrumento construído para a atividade *A*.

A atividade *B* tem como objetivos prever, observar e explicar por que razão a água sobe, quando a vela se apaga, dentro de um copo invertido e parcialmente imerso numa tina com água. Nesta atividade, questionam-se as crianças/alunos sobre o que acontecerá ao ar do copo quando se acende uma vela e se coloca o copo invertido por cima. Desta forma, pretende-se que as crianças/alunos prevejam o que irá acontecer tendo em conta os conhecimentos adquiridos na atividade anterior (dilatação do ar). De seguida, solicita-se que as crianças/alunos façam uma previsão sobre o que acontecerá à água quando a vela se apaga com o copo invertido e parcialmente imerso numa tina com água. As previsões foram realizadas oralmente e anotadas pelo educador/professor. Posteriormente, as crianças/alunos observaram a subida do nível da água quando a vela se apagou e tentaram explicar e refletir sobre as observações efetuadas.

Os registos, efetuados no final de cada atividade, foram adaptados à idade das crianças/alunos e tiveram como finalidade a comunicação das descobertas feitas pelos mesmos [2]. Na educação pré-escolar as crianças registaram, através do desenho, o que observaram e o educador, no final, questionou cada criança acerca dos seus registos e da atividade realizada, anotando o que as crianças transmitiram. Nos primeiros dois anos do 1.º CEB o procedimento foi semelhante ao das crianças da educação pré-escolar, sendo os registos divididos em duas partes: “o que precisamos” para a atividade e “o que aconteceu”. Nos restantes anos foi realizado um registo escrito e gráfico dividido em quatro partes: “material”, “procedimento”, “o que observamos” e “o que concluímos”.

As atividades foram realizadas em 11 turmas do pré-escolar e 19 do 1.º CEB do distrito de Vila Real, contemplando um total de 453 alunos.

RESULTADOS

Na Tabela 1 apresentam-se os resultados da análise aos registos das crianças/alunos e às notas dos educadores/professores.

Tabela 1. Percentagem de alunos que atingiram os objetivos propostos.

| Atividade | Objetivos | Alunos da educação pré-escolar (%) | | | Alunos do 1.º CEB (%) | | | |
|-----------|--|------------------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|---------|
| | | 3 anos | 4 anos | 5 anos | 1.º ano | 2.º ano | 3.º ano | 4.º ano |
| A | Descobrir que o ar dilata e contrai | 96 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| A | Verificar que a água ocupa o espaço do ar | 0 | 71 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| B | Fazer previsões sobre o que irá acontecer ao ar do copo e à água da tina | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 10 |
| B | Explicar o que observou | 0 | 0 | 11 | 45 | 68 | 75 | 83 |

Como se pode verificar pela análise da Tabela 1, todos os alunos do 1.º CEB e praticamente todas as crianças da educação pré-escolar aperceberam-se que o ar em contacto com uma fonte quente “dilata/cresce/incha/engorda/aumenta” e em contacto com uma fonte fria “contraí/diminui/desincha/minga”. O reconhecimento deste comportamento dos gases poderá estar relacionado com a facilidade com que a atividade *A* permite a visualização desses efeitos.

No que respeita ao segundo objetivo da atividade *A* nenhuma criança de três anos foi capaz de associar a subida do nível de água no tubo à contração do ar quando exposto a uma fonte fria (Figura 3). A maioria das crianças de quatro anos, a totalidade das crianças de cinco anos e os alunos do 1.º CEB compreenderam que a água corada ocupa o espaço deixado livre pelo ar.



Figura 3. Contração do ar quando exposto a uma fonte fria e ocupação do espaço pela água corada.

Relativamente à atividade *B*, apenas alguns alunos do 3.º e 4.º ano foram capazes de utilizar os conhecimentos adquiridos na atividade *A* para fazer previsões sobre o que iria acontecer ao ar do copo e à água da tina.

No que concerne à explicação do que se observou na atividade *B*, apenas algumas crianças de cinco anos da educação pré-escolar, cerca de metade dos alunos do 1.º ano e a maioria dos restantes foram capazes de interpretar por que razão a água sobe, quando a vela se apaga, dentro de um copo invertido e parcialmente imerso numa tina com água.

Apesar das crianças e dos alunos apresentarem mais facilidade em compreender e explicar a atividade *A*, curiosamente a atividade preferida foi a *B* (87 %), onde as crianças e os alunos

despenderam mais tempo a refletir sobre os resultados obtidos e tiveram mais dificuldade em explicar os registos (Figura 4). Em contrapartida todos os docentes preferiram a atividade A.



Figura 4. Alunos a refletir sobre as observações e a elaborar os registos.

CONCLUSÕES

A análise efetuada aos registos das crianças/alunos e às notas dos educadores/professores mostrou que praticamente todas as crianças/alunos compreenderam que o ar dilata e contrai. Só a partir dos quatro anos é que as crianças percebem que a água ocupa o espaço do ar quando este se contrai. Muito dificilmente os alunos conseguem prever o que vai acontecer ao nível da água quando a vela se apaga, dentro de um copo invertido e parcialmente imerso numa tina com água. Só a partir dos cinco anos é que algumas crianças conseguem explicar a atividade da vela. A atividade B é a preferida dos alunos apesar de ser a menos compreendida.

Os resultados desta análise têm implicações pelo menos a dois níveis. Em primeiro lugar, evidencia que a atividade da vela não deve ser aplicada antes do 3.º ano se o objetivo desta se centrar na explicação das observações. Se o objetivo for apenas lúdico, pode ser aplicado com algum sucesso em qualquer idade a partir dos três anos. Em segundo lugar, caso se pretenda melhorar a participação das crianças/alunos na apresentação das suas previsões deverão ser utilizadas atividades menos complexas.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva I.L., Marques L., Mata L., Rosa M. Orientações Curriculares para a Educação Pré-Escolar, Ministério da Educação/Direção-Geral da Educação (DGE), 2016.
- [2] Estudo do Meio: <http://www.dge.mec.pt/estudo-do-meio> (consultado a 25 de agosto de 2016).
- [3] Teixeira J. J., Soares A. Combustão da vela dentro de um copo invertido sobre uma tina com água: uma atividade simples com explicação complexa. Atas da 19.ª Conferência Nacional de Física e 24.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física, Lisboa, pp.185-187, 2015.
- [4] Vera F., Rivera R., Núñez C. Burning a Candle in a Vessel, a Simple Experiment with a Long History, *Science & Education*, 20, 881-893, 2011.
- [5] Friedl A.E. Enseñar ciencias a los niños, Editorial Gedisa, 2000.
- [6] Air space: <https://www.newscientist.com/topic/lastword/air-space/> (consultado a 28 de agosto de 2016).
- [7] Leite L., Esteves E. Análise crítica de actividade laboratoriais: um estudo envolvendo estudantes de graduação, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, vol. 4, no. 1, 2005.
- [8] O experimento da vela na formação inicial do professor de ciências: www.nutes.ufjf.br/abrapec/viiienpec/resumos/R0795-1.pdf (consultado a 27 de agosto de 2016).
- [9] Leite L. As actividades laboratoriais e o desenvolvimento conceptual e metodológico dos alunos. *Boletim das Ciências*, XV(51), 83-92, 2002.

COMO MEDIR SEMPRE $9,81 \pm 0,05 \text{ M/S}^2$ NA QUEDA DE UMA ESFERA

Rui Agostinho¹, Ana Tavares Sousa²

¹ Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

E-mail: rui.agostinho@oal.ul.pt

² Escola Secundária Stuart Carvalhais do Agrupamento de Escolas de Massamá

E-mail: anatsousa@hotmail.com

RESUMO

O programa de FQ A têm a atividade laboratorial *Queda livre* com o objetivo de determinar a aceleração gravítica e verificar se esta depende da massa. As montagens utilizadas nesta atividade têm problemas de funcionamento. As principais causas de erro são, a largada do corpo, a verticalidade da queda, a precisão na medição do tempo com as fotocélulas, o que limita grandemente a exatidão do resultado. Construiu-se uma montagem que permite obter resultados consistentes, reprodutíveis, com uma ótima exatidão: $g=9,81\pm 0,05 \text{ m/s}^2$. Será discutida a propagação das incertezas mencionadas, na degradação do resultado final, que facilmente atinge 10-12 m/s^2 .

1. INTRODUÇÃO

Queda livre é uma atividade laboratorial do programa de Física e Química A, do 11º ano [1]. Entre os objetivos está a determinação do valor de g por medição indireta e a verificação de que esta grandeza é independente da massa do corpo em queda.

As montagens regularmente usadas nesta atividade têm limitações que afetam grandemente a exatidão do resultado, tais como as oscilações na largada do corpo, o alinhamento vertical da queda da esfera com as fotocélulas e a precisão na medição do tempo com as fotocélulas.

O trabalho apresentado chama a atenção para alguns pormenores experimentais que muitas vezes são descurados e que são causa de resultados com uma baixa exatidão. A montagem aqui apresentada, figura 1, permite obter resultados consistentes, reprodutíveis, com uma ótima exatidão: $g= (9,82\pm 0,05) \text{ m/s}^2$.



Figura 1- Montagem para determinação do g a partir da queda vertical de uma esfera.

2. CUIDADOS EXPERIMENTAIS RELEVANTES PARA A EXATIDÃO DO RESULTADO

2.1. GARANTIR A HORIZONTALIDADE DAS CÉLULAS FOTOELÉTRICAS

A horizontalidade das células fotoelétricas tem de ser garantida para que o feixe de luz esteja perpendicular à trajetória da esfera. A figura 2 mostra um esquema da queda vertical da esfera.

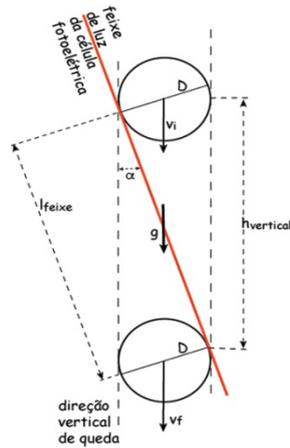


Figura 2- Esquema da queda vertical de uma esfera que interrompe um feixe de luz inclinado à sua trajetória.



Figura 3- Horizontalidade das fotocélulas.

Na figura 2 colocou-se o feixe de luz inclinado de um ângulo α (exagerado) em relação à vertical, para se entender melhor. A esfera cai duma altura $h_{vertical}$ enquanto atravessa o feixe de luz, mas percorre uma distância l_{feixe} sobre o mesmo. Porém é sempre o diâmetro D da esfera que atravessa perpendicularmente o feixe (ver figura). A relação entre D e estas distâncias é:

$$l_{feixe} = \frac{D}{\text{tg}(\alpha)} \quad \text{e} \quad h_{vertical} = \frac{D}{\text{sen}(\alpha)} \quad (1) \quad \text{e}$$

(2)

Como o movimento é acelerado ($v_f > v_i$), durante o tempo t_D em que a esfera corta o feixe de luz, as componentes paralelas ao eixo levam a que

$$l_{feixe} = v_{0//} t_D + \frac{1}{2} a_{//} t_D^2 \quad (3)$$

onde

$$v_{0//} = v_i \cos \alpha \quad \text{e} \quad a_{//} = g \cos \alpha \quad (4) \quad \text{e}$$

(5)

Deduz-se daí que o tempo t_D em que a esfera interrompe o feixe de luz é:

$$t_D = \frac{1}{g} \left(-v_i \pm \sqrt{v_i^2 + 2g \frac{D}{\text{sen} \alpha}} \right) \quad (6)$$

Note-se que o aumento de velocidade Δv da esfera enquanto atravessa o feixe de luz é

$$\Delta v = -v_i \pm \sqrt{v_i^2 + 2g \frac{D}{\text{sen} \alpha}} \quad (7)$$

podendo a velocidade variar de 0,1 até 0,5 m/s, valores que podem não ser desprezáveis.

A equação (6) pode ser escrita realçando a energia cinética inicial E_{ci} e a variação da energia potencial ΔE_p .

$$\Delta v = gt_D = v_i \left(\left(1 + \frac{gh_{vertical}}{\frac{1}{2}v_i^2} \right)^{1/2} - 1 \right) = v_i \left(\left(1 + \frac{\Delta E_p}{E_{ci}} \right)^{1/2} - 1 \right) \quad (8)$$

Se $\Delta E_p < E_{ci}$, o termo da potência 1/2 na equação (8) pode ser desenvolvida em série, e usando apenas os dois primeiros termos dessa série deduz-se que

$$t_D = g \frac{D}{v_i \sin(\alpha)} \left(1 - \frac{1}{2} g \frac{D}{v_i^2 \sin(\alpha)} \right) \quad (9)$$

Como a variação $\Delta E_p \ll E_{ci}$ é válido aproximar a velocidade final à velocidade inicial ($v_f \approx v_i$) e de (9) obtém-se

$$t_D = \frac{D}{v_i \sin(\alpha)} \quad (10)$$

Como a velocidade v da esfera ao cortar o feixe de luz é estimada por $v = D/t_D$ então

$$v = \frac{D}{t_D} = v_i \sin(\alpha) \leq v_i \quad (11)$$

Se $\alpha = 90^\circ$ a esfera cai perpendicularmente ao feixe de luz o que torna $v = v_i$, razão pela qual as células fotoelétricas têm de estar horizontais. (Figura 3)

2.2. GARANTIR A VERTICALIDADE DO ELETROÍMAM

No início da queda a velocidade da esfera só pode ter componente vertical. A largada com o eletroímam resolve esta questão. Para tal torna-se também necessário garantir a verticalidade do eletroímam (figura 4).

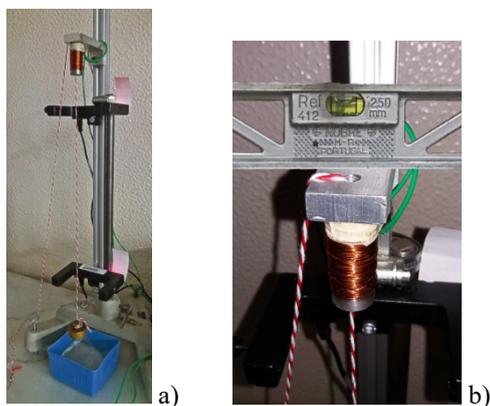


Figura 4- A verticalidade do eletroímam a) visualização da interrupção do feixe de luz, b) colocação do fio de prumo.

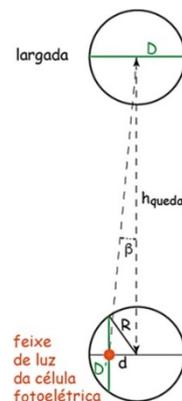


Figura 5- Esquema do corte do feixe de luz, nas 2 fotocélulas, pelo diâmetro da esfera.

Esta verticalidade é também fundamental para que o feixe de luz das células fotoelétricas seja interrompido pelo diâmetro da esfera. Se a esfera passar desalinhada o feixe de luz é cortado por uma corda da esfera $D' < D$. Observando o esquema da figura 5, pode demonstrar-se que a relação entre D e D' é

$$\frac{D'}{D} = 1 - \frac{\beta h_{queda}}{D} \quad (12)$$

Esta equação mostra que para um pequeno desvio da verticalidade, $\beta=0,5^\circ$, $h_{queda}=8$ cm e $D=2,5$ cm, o erro no cálculo da velocidade v é de 2,7 % o que é muito significativo. Note-se que este erro diminui para esferas de maior diâmetro e para h_{queda} menor.

Para garantir a verticalidade do eletroímã utilizou-se um fio-de-prumo, que passa pelo centro do eletroímã (figura 4b) e colocou-se papel por detrás dos leds das células fotoelétricas (figura 4a), que permitem visualizar a interrupção do feixe de luz pelo fio-de-prumo, indicando que será o diâmetro da esfera a interrompê-lo. Por outro lado, a verticalidade do eletroímã, que permite a largada da esfera na vertical das células é garantida pela horizontalidade da sua base (fig. 4b).

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Fizeram-se medições dos tempos de passagem nas fotocélulas, de duas esferas de aço com massas, $m_1 = 68$ g e $m_2 = 176$ g, e diâmetros, $D_1 = (25,40 \pm 0,01)$ mm e $D_2 = (34,95 \pm 0,01)$ mm. Os dados foram registados com o programa DataStudio, que fez a aquisição através duma interface Science Workshop 500 e sensores Photogate da PASCO.

3.1. A INCERTEZA NA MEDIÇÃO DO TEMPO

A interface e os sensores estão limitados a uma precisão de 10^{-4} s. Assim, quanto maior for a velocidade com que a esfera interrompe o feixe de luz menos algarismos significativos serão registados. Neste contexto estudou-se a altura entre o ponto de largada da esfera e a primeira fotocélula (c1), e entre esta e a segunda célula (c2), de forma a minimizar este tipo de erro.

Por exemplo: quando a esfera D_1 cai de 10 cm de altura e passa na célula mais alta (c1) obtém-se 0,018143 s, que fica registado como $t_{D1} = 0,0181$ s (é truncado!). Para a célula inferior (c2, a 50 cm de distância da largada) a esfera demora apenas 0,008114 s a passar, que é apresentado pelo sistema como $t_{D2} = 0,0081$ s. A mesma situação para a esfera D_2 conduz a $t_{D1} = 0,0249$ (64) s e $t_{D2} = 0,0111$ (64) s.

Conclui-se daqui que é importante usar:

- a) esferas de diâmetros grandes;
- b) distâncias curtas ao ponto de largada;
- c) pequenas distâncias entre as células.

Deste modo escolheram-se distâncias de $h_1 \approx 4,7$ cm entre o ponto de largada e a primeira célula, e $h_{12} \approx 28$ cm entre as duas células. Fizeram-se em média 40 lançamentos para cada esfera, ambas de aço.

3.2. A IMPORTÂNCIA DA MASSA E DO DIÂMETRO DA ESFERA NO ATRITO AERODINÂMICO

Das equações do movimento sabe-se que as velocidades de passagem das esferas nos feixes de luz são independentes da massa da esfera. Contudo a força do atrito aerodinâmico aumenta com o diâmetro e a velocidade, em $(v D)^2$, e a sua massa é proporcional a ρR^3 . Da razão entre estas duas relações deduz-se uma aceleração que é proporcional $v^2/(\rho D)$, ou seja, diminui com o diâmetro e a densidade da esfera, mas aumenta com sua velocidade. Calculou-se este efeito numa queda de 30 cm: A figura 6 mostra os resultados teóricos (extremos) para esferas de: a) plástico com D_1 ; b) aço com D_2 . A escolha de esferas de aço em vez de borracha ou plástico e com diâmetros razoáveis minimiza estes efeitos.

3.3. RESULTADOS OBTIDOS

A velocidade de passagem das esferas em cada célula foi calculada pela equação (4), vulgarmente usada, mas também pela equação (11), que requer uma solução numérica do valor de v_i em cada caso, usando $\alpha=90^\circ$. Note-se que a equação (6) impõe usar o instante em que a esfera toca no feixe de luz. Este valor deduz-se a partir dos dados obtidos: para cada passagem o DataStudio

apresenta o valor do instante de tempo médio, entre o toque (bloqueio) no feixe e o da saída (desbloqueio) assim como o intervalo do tempo de passagem pelo feixe.

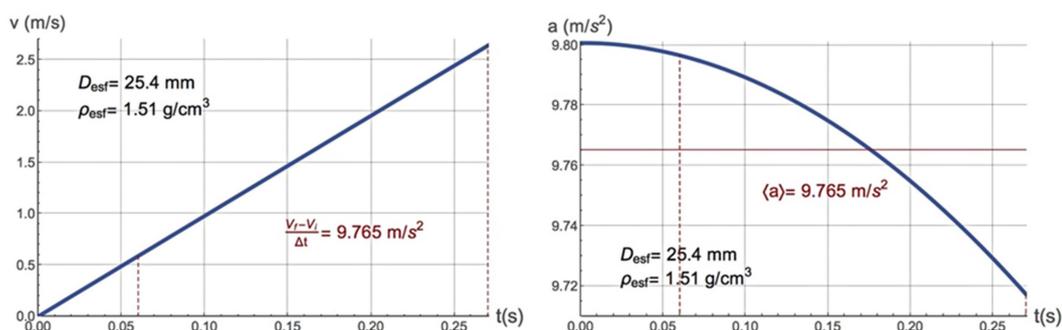


Figura 6 a)- Velocidade e aceleração de uma esfera de plástico de menor diâmetro;

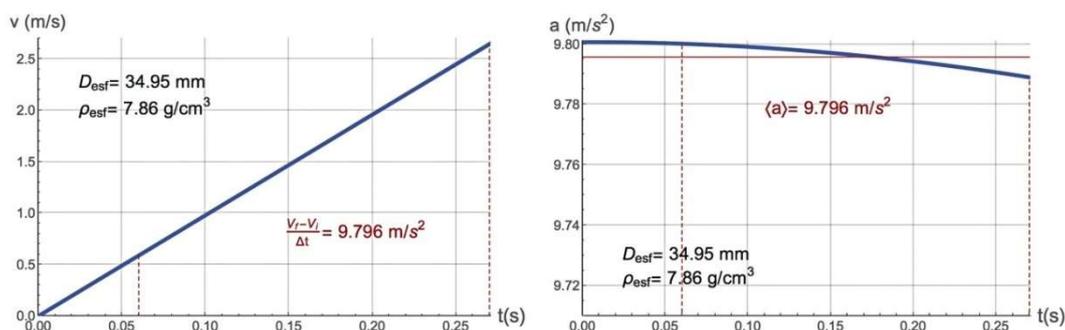


Figura 6 b)- Velocidade e aceleração de uma esfera de aço de maior diâmetro

Os resultados finais entre os dois tratamentos (equações (11) ou (6)) pouco diferem. Optámos por apresentar aqui os resultados referentes ao uso da equação (11) – Tabela 1 O valor de g foi obtido pela equação

$$g = \frac{v_{i2} - v_{i1}}{\Delta t} \quad (13)$$

sendo Δt o tempo de passagem entre as duas células.

| | t_{D1} (s) | v_{li} (m s ⁻¹) | t_{D2} (s) | v_{2i} (m s ⁻¹) | Δt (s) | g (m s ⁻²) | erro g (m s ⁻²) | % erro |
|--------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------|
| $m_1 = 68 \text{ g}$ | 0,03007 | 0,6973 | 0,01015 | 2,453 | 0,16926 | 9,7946 | -0,006 | 0,06 |
| $D_1 = 25,40 \text{ cm}$ | 0,03112 | 0,6637 | 0,01014 | 2,455 | 0,17103 | 9,8697 | 0,069 | 0,70 |
| | 0,03110 | 0,6643 | 0,01017 | 2,448 | 0,17103 | 9,8261 | 0,025 | 0,26 |
| $m_2 = 176 \text{ g}$ | 0,04653 | 0,5231 | 0,01416 | 2,399 | 0,17548 | 9,7864 | -0,014 | 0,15 |
| $D_2 = 34,95 \text{ cm}$ | 0,04832 | 0,4865 | 0,01414 | 2,402 | 0,17768 | 9,8367 | 0,036 | 0,37 |

Tabela1 – Valores experimentais para a queda de 2 esferas de aço

O valor médio de g obtido nestas 5 medições é de $(9,82 \pm 0,02) \text{ m s}^{-2}$, verificando-se também que é independente da massa das esferas. Este valor é muito próximo do obtido com um gravímetro [2] ($g = 9,80071 \pm 0,00002 \text{ m/s}^2$) na sala do 4º piso do edifício C8 da FCUL no Campo Grande, em Lisboa.

4. CONCLUSÕES

- É fundamental garantir a horizontalidade das fotocélulas e a verticalidade do eletroíman.
- Os cálculos de g não dependem da velocidade de largada da esfera pelo eletroíman (veja-se a equação 6).
- O eletroíman contribui para uma largada vertical, facilitando o alinhamento da esfera com o feixe de luz (item 2.2)
- A base do eletroíman deve estar o mais próximo possível da primeira célula (item 3.1).
- Recomenda-se que a distância entre as duas células não ultrapasse os 30 cm (item 3.1).
- Os valores dos tempos de interrupção do feixe de luz devem ter no mínimo 3 algarismos significativos (item 3.1).
- As esferas devem ser metálicas e de diâmetro superior a 2 cm, para tornar desprezável o atrito aerodinâmico (item 3.2) e para minimizar problemas do seu desvio à posição dos feixes de luz
- A esfera deve ter superfície lisa e uniforme, para o diâmetro ser constante mesmo que existam oscilações.
- A montagem deve estar sobre uma base robusta e estável, para evitar oscilações e flutuações nas medições.

REFERÊNCIAS

- [1] Fiolhais Carlos *et al*, Programa de Física e Química A, 10º e 11º anos - Componente de Física, Ministério da Educação e Ciência, 2014
- [2] Antunes Carlos M. (FCUL, 2013) e dados do Instituto Geográfico Português, Direção de Serviços de Geodesia (2004).
- [3] Wick Kurt e Ruddick Keith: An accurate measurement of g using falling balls, Am. J. Phys. vol 67, nº11, novembro, 1999
- [4] Abreu M.C., Matias Luís, Peralta Luís: Física Experimental: uma introdução, pp. 97, Ed. Presença 1994

CONCEÇÕES ALTERNATIVAS SOBRE SOM E ESTRATÉGIAS DE ENSINO PARA AS SUPERAR

Mafalda Braz¹, José P. Cravino^{2,3}

¹ Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal; E-mail: brasmaf@hotmail.com

² Departamento de Física da Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal; E-mail: jcravino@utad.pt

³ Centro de Investigação “Didática e Tecnologia na Formação de Formadores” (CIDTFF), Aveiro, Portugal

RESUMO

O som, apesar de ser um fenómeno do dia-a-dia, é um tema onde os alunos apresentam muitas dificuldades de aprendizagem. Neste estudo, realizou-se um levantamento de concepções do som a 38 alunos do 11.º ano de escolaridade em dois momentos, antes e depois do ensino formal desta temática, usando um questionário com perguntas abertas. A estratégia baseada em questões de previsão com situações físicas quotidianas demonstrou ser eficaz na deteção de concepções alternativas e pode ser usada para construir atividades do tipo “Prevê-Observa-Explica” (POE) para uma aprendizagem significativa da temática do som.

1. INTRODUÇÃO

O ensino da Física e da Química ainda é frequentemente demasiado transmissivo, o que pode levar muitos alunos a recorrerem a esquemas de memorização. Portanto, muitos dos alunos que resolvem satisfatoriamente bem os exercícios podem ter concepções radicalmente díspares das científicas aceites [1].

Estas concepções alternativas (CA) são tipicamente uma mistura complexa entre noções intuitivas e aquisições do ensino formal, podem ser um bom ponto de partida para promover o desenvolvimento do aluno na direção dos conhecimentos científicos aceites. No entanto, a simples correção sistemática de CA dos alunos não se tem revelado eficaz na sua eliminação e este processo exige uma participação ativa dos alunos na construção do conhecimento [2].

Deste modo, as respostas erradas às questões na sala de aula não devem ser penalizadas, mas devem ser vistas como expressão das concepções dos alunos, muitas vezes derivadas da linguagem usada no quotidiano ou da observação superficial dos fenómenos naturais [2,3]. Ou seja, é necessária uma abordagem didática adequada para promover a alteração das CA [4].

O som, apesar de ser um fenómeno quotidiano constantemente observado, é uma área onde os alunos apresentam dificuldades de aprendizagem. Estas verificam-se quando não existe um tratamento didático adequado para promover a alteração das CA [4]. Nesta temática, tem-se verificado nos alunos que, além de apresentarem escassez de respostas cientificamente aceites, desconhecimento da fundamentação de alguns factos e significados, existem importantes concepções alternativas (CA) dos fenómenos [5,6]. Assim neste estudo entende-se necessário identificar algumas CA dos alunos sobre o som e verificar a sua evolução com o ensino da temática.

2. METODOLOGIA

A amostra deste estudo é constituída por 38 alunos do 11º ano de escolaridade, com idades compreendidas entre os 16 e os 17 anos, de duas turmas duma escola do Agrupamento de Escolas Dr. Fernão Magalhães (concelho de Chaves), no ano letivo 2015/2016.

Os dados foram recolhidos através da administração de um questionário antes (pré-teste) e depois (pós-teste) do ensino da unidade didática onde é abordada a temática do som, com um

intervalo de tempo de dois meses entre a administração dos dois instrumentos. A participação dos alunos foi voluntária. Os alunos demoraram cerca de 30 minutos a responder ao questionário.

Neste estudo, optou-se por um questionário que contém perguntas abertas baseadas essencialmente na previsão de fenómenos físicos quotidianos, para a deteção das conceções que os alunos formulam sobre eles.

As respostas dos alunos ao questionário foram submetidas a uma análise de conteúdo e procedeu-se à sua categorização. Elaborou-se um conjunto de categorias (tabela 1), que são gerais para todas as questões, e um grupo de subcategorias (tabela 2) específicas de cada questão. O tratamento dos dados foi realizado com o auxílio do Microsoft Excel.

Tabela 1. Categorias usadas no tratamento de dados por análise de conteúdo.

| C | Categorias | Significado |
|----|-----------------------|---|
| ER | Respostas Erradas | As respostas incluídas nesta categoria incluem conceções que não correspondem à conceção cientificamente aceite. |
| I | Respostas Incompletas | As respostas classificadas nesta categoria, incluem apenas algumas ideias ou partes das conceções cientificamente aceites. |
| C | Respostas Certas | As respostas incluídas nesta categoria apresentam conceções cientificamente aceites e concordantes com os programas em vigor. |
| NR | Não responde | Os alunos não respondem à questão ou respondem que não sabem. |
| O | Outras | Incluem-se nesta categoria as respostas incompreensíveis ou todas aquelas que não se incluem nas outras categorias. |

Tabela 2. Subcategorias usadas no tratamento de dados por análise de conteúdo.

| Questão | A | B | C | D | E |
|--------------------|--|--|--|---|--------------------------------------|
| Pergunta 1A | “movimenta (mexe/propaga/projeta) a partícula”; “2f aumenta a velocidade da partícula” | “faz vibrar a partícula”; “2f faz vibrar mais vezes a partícula” | “movimenta horizontalmente” a partícula. | “movimenta perpendicularmente” a partícula. | “não afeta o movimento da partícula” |
| Pergunta 1B | “afeta o movimento da partícula porque aumenta a velocidade” | “vibração (oscilação) mais forte (intensa)” | “maior amplitude de vibração”. | “não afeta o movimento da partícula” | “atrasa o movimento” |
| Pergunta 2A | “afeta a chama deslocando-a” “inclinando-a” e “distorcendo-a” | “afeta a chama”, “oscilação” e “vibração” | “não afeta a chama” | “chama apaga-se” | |
| Pergunta 2B | “afeta a dobrar o movimento da chama” | “afeta a vibração (oscilação) da chama a duplicar” | “não afeta a chama” | “a chama apaga-se” | |

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira pergunta foca a situação hipotética do comportamento de uma partícula de pó: considerando-se uma partícula de poeira imóvel em frente de um altifalante. Pergunta 1(A): *Se o altifalante toca uma nota com a frequência, 2f. Esta alteração na frequência, f, afeta a partícula de pó? Explica;* Pergunta 1(B): *Com a frequência original, f, mas com maior volume. Como pode, esta alteração afetar a partícula de pó? Explica.* (Adaptado de [7]).

A conceção que os alunos mais apresentaram (ver gráficos 1 a 4), para esta situação física da Pergunta 1, é que o som é uma espécie de “vento” ou “movimento do ar”. Por conseguinte, na generalidade os alunos, interpretam o efeito da duplicação da frequência do som no “movimento” da partícula com uma velocidade dupla (subcategoria A, pergunta 1 A). Tal como acontece, na interpretação de que o aumento de volume do som aumenta a velocidade desse “vento ou movimento que projeta” a partícula de pó (subcategoria A, pergunta 1 B).

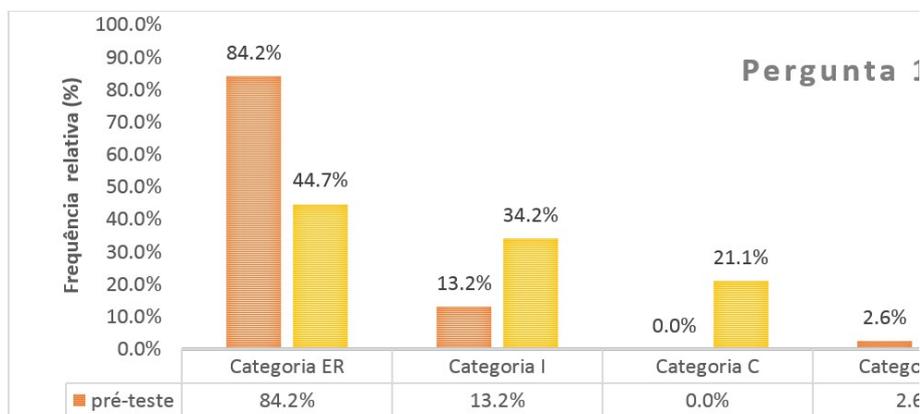


Gráfico 1. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 1(A) nas categorias ER, I, C e NR.

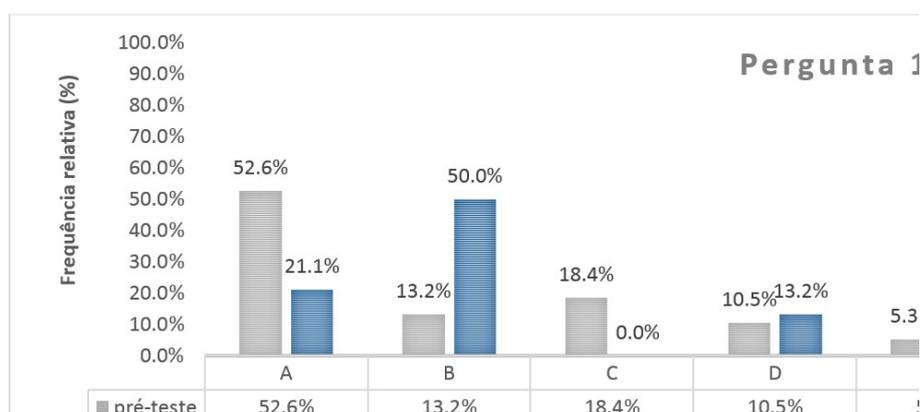


Gráfico 2. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 1(A) nas subcategorias A, B, C, D e E.

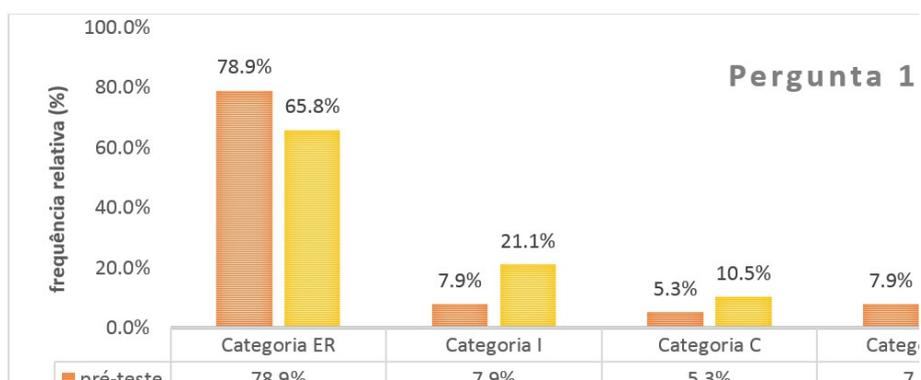


Gráfico 3. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 1(B) nas categorias ER, I, C e NR.

Após o ensino formal da temática do som houve uma diminuição desta conceção alternativa (subcategoria A) e um acréscimo da conceção cientificamente aceite (subcategoria B). Também

se verificou um ligeiro acréscimo de respostas certas e diminuição de respostas erradas. No entanto, em pós-teste, detetaram-se outras CA (subcategoria D e E).

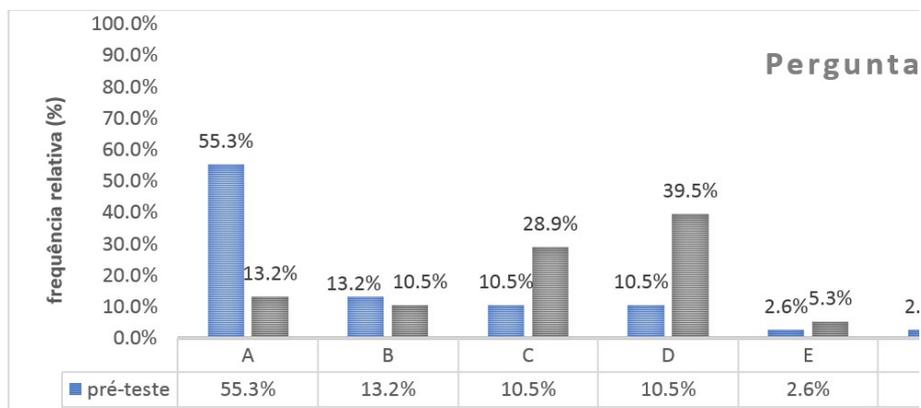


Gráfico 4. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 1B nas subcategorias A, B, C, D, E e NR.

A segunda pergunta centra-se na situação hipotética do comportamento da chama de uma vela: considerando-a colocada à frente de um altifalante. A chama da vela é vertical. Pergunta 2(A): *Após ligar o altifalante que produz um som com uma frequência f , constante, como, pode isto afetar a chama? E se considerar que a chama não se altera, explique esse estado.* Pergunta 2(B): *Se o altifalante toca uma nota com a frequência $2f$, como pode esta alteração na frequência afetar, ou não, a chama?* (Adaptado de [7]).

Como se pode ver a seguir (gráficos 5 a 8), à situação física explorada na pergunta 2 a maioria dos alunos prevê que o efeito do som é uma “inclinação” ou “distorção” da chama (subcategoria A, pergunta 2 A). Consequentemente, também a maioria dos alunos interpreta a duplicação da frequência do som numa “distorção” dupla da chama (subcategoria A, pergunta B). Após o ensino formal da temática do som (pós-teste) houve uma diminuição desta conceção alternativa (subcategoria A) e da conceção cientificamente aceite (subcategoria B). Em pós-teste, detetou-se também um acréscimo de respostas com a conceção de que o som “não afeta a chama” (subcategoria C). Verificou-se, também, um ligeiro acréscimo de respostas erradas e, inclusive, uma diminuição das respostas certas na pergunta 2 (A). Assim, o ensino parece alterar as ideias prévias dos alunos, mas não o suficiente para estes as substituam por conceções cientificamente válidas.

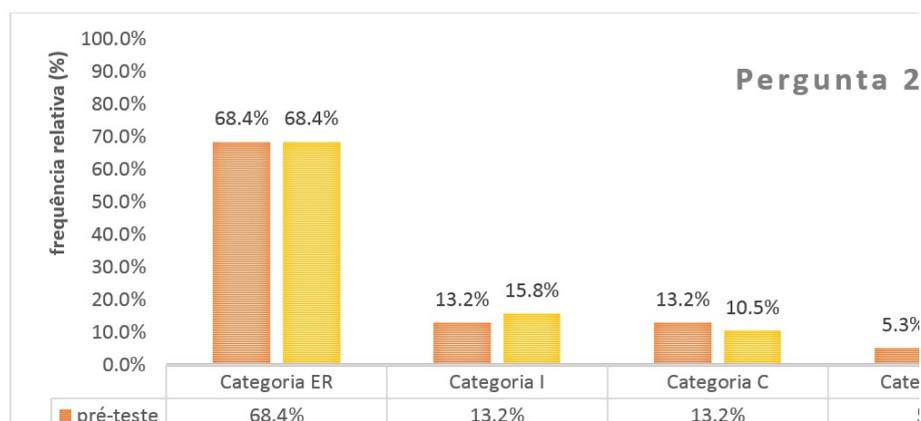


Gráfico 5. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 2(A) nas categorias ER, I, C e NR.

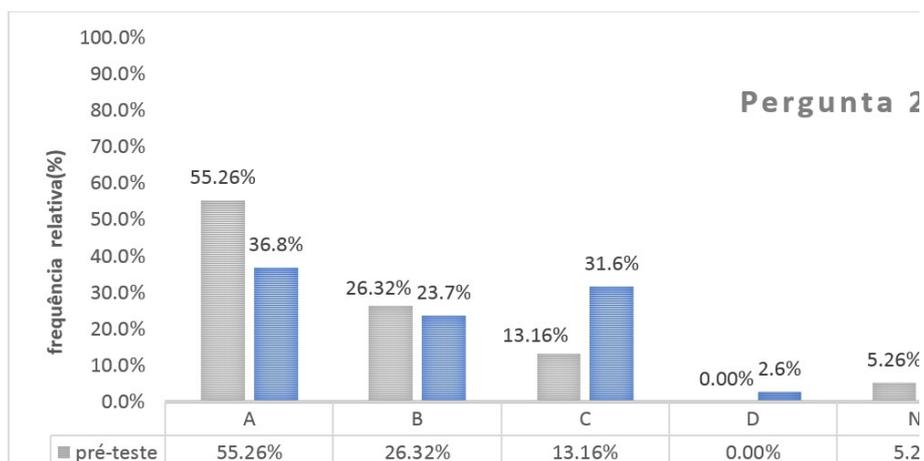


Gráfico 6. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 2(A) nas subcategorias A, B, C, D, E e NR.

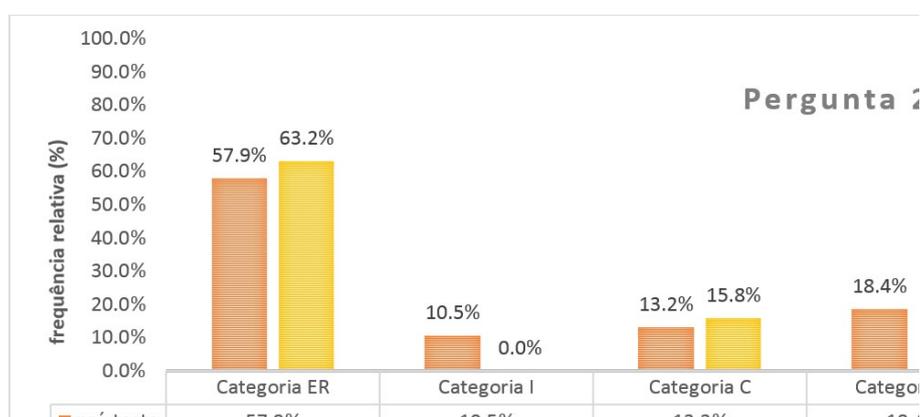


Gráfico 7. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 2(B) nas categorias ER, I, C e NR.

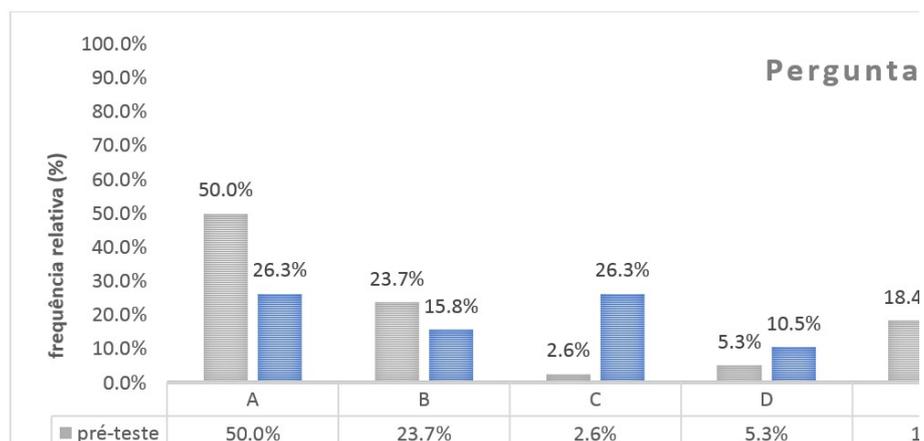


Gráfico 8. Representação gráfica da frequência relativa (%) dos resultados dos pré e pós-teste da pergunta 2B nas subcategorias A, B, C, D e NR.

5. CONCLUSÕES

As situações físicas das perguntas 1 e 2 pretendiam mobilizar as concepções dos alunos acerca da natureza da propagação do som explorando situações do quotidiano. As respostas dos alunos em estudo revelaram várias CA, no entanto o modelo de transporte parece ser a concepção mais difundida nestes alunos para a propagação do som. Após o ensino formal, estas explicações tendem a permanecer e quando se detetou algum decréscimo emergiram outras CA. Apenas na

pergunta 1A se verificou um acréscimo de respostas com concepções físicas cientificamente válidas após o ensino da temática do som. Portanto, foi possível verificar que o ensino formal não contribuiu, na generalidade, o suficiente para uma evolução concetual destes alunos na temática do som, de forma a que estes se apropriem de concepções cientificamente válidas e as mobilizem nas situações físicas exploradas.

A aplicação de questões de previsão revelou-se uma ferramenta eficaz no levantamento e caracterização das CA dos alunos. Considerando-se o reconhecimento das CA dos alunos como um ponto de partida para que estas evoluam para concepções científicas válidas, as questões aqui utilizadas na deteção de CA podem ser usadas na construção de atividades do tipo “Prevê-Observa-Explica” (POE), pelo professor ou em parceria com o aluno, constituindo uma estratégia possível para a evolução concetual dos alunos [8].

REFERÊNCIAS

- [1] Linder, C. J. Is teacher-reflected epistemology a source of conceptual difficulty in physics? *International Journal of Science Education*, 14 (1), 111-121, 1992.
- [2] Periago, C., Pejuan, A., Jaén, X., & Bohigas, X. Misconceptions about the Propagation of Sound Waves, Department de Física i Enginyeria Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- [3] Sequeira, M. & Leite, L. Os professores de Ciências Físico Químicas e a problemática das concepções alternativas. *Revista Portuguesa da Educação*, 4 (3), 31-47, 1991.
- [4] Leite, L. Trabalho laboratorial no ensino das Ciências. Relatório Científico do Projecto no 03/98, IIE-SIQE medida 2, 1999.
- [5] Hrepic, Z., Zollman, D. A., & Rebello, N. S. Identifying students' mental models of sound propagation: The role of conceptual blending in understanding conceptual change. *Physics Review Special Topics - Physics Education Research*, 6, 020114, 2010.
- [6] Leite, L. & Afonso, A. Natureza e Propagação do som. Concepções de alunos dos ensinos básico, secundário e superior. In Susana García Barros & Cristina Martínez Losada (Eds.), *La didáctica de las ciencias tendencias actuales* (pp. 345-358), 1999.
- [7] Wittmann, M. C., Steinberg, R. N. & Redish, E. F. Understanding and affecting student reasoning about sound waves, *International Journal of Science Education*, 25 (8), 991-1013, 2003.
- [8] Leite, L. & Afonso, A. Portuguese school textbooks' illustrations and students' alternative conceptions on sound, *Physics Teacher Training in an Information Societ* (Barcelona), 2000.

DETERMINAÇÃO EXPEDITA DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO ADIABÁTICA

Horácio Fernandes

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Dep. Física do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa
hf@ipfn.tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

O coeficiente de expansão adiabática é determinado tradicionalmente por processos de difícil execução, morosos e com um elevado erro experimental. Com a utilização dum computador equipado com placa de som ou um dispositivo móvel e uma simples seringa de vidro demonstraremos que o método de Ruchhardt adapta-se particularmente bem à determinação da razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante dum gás, ou seja a sua constante de expansão adiabática. Este método revela-se bastante preciso embora com uma elevada sensibilidade ao período das oscilações e do raio da seringa pelo que dever-se-á atender à sua medida com precisão suficiente.

A presente experiência é ainda um bom exemplo da aplicação do formalismo newtoniano na determinação de grandezas termodinâmicas permitindo aos alunos a fácil compreensão do método pelo que constitui uma peça pedagógica valiosa no laboratório.

INTRODUÇÃO

Os métodos clássicos para a determinação do coeficiente de expansão adiabática nomeadamente o método de Clément-Désormes apresentam protocolos experimentais complicados, morosos e com um elevado erro experimental [1].

No entanto o método de Ruchhardt [2, 3] permite determinar esse coeficiente (a razão entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante dum gás) numa forma bastante precisa e rápida, usando para o efeito uma seringa de vidro e com recurso a um programa de análise de som num computador ou dispositivo móvel. Contudo, este método tem uma elevada sensibilidade à medida do período das oscilações (ou seja, um pequeno erro na medição do período dará origem a um grande erro no resultado). Devido a esse facto recomenda-se desde já um grande cuidado na determinação do período, sendo para tal utilizados dois métodos: (i) a medida do período pela análise da forma da onda captada pelo transdutor de pressão ou (ii) o período médio determinado numericamente através da análise a partir da transformada de Fourier.

Estes dados devem ser utilizados numa forma crítica, explorando ao máximo a informação que fornecem.

Esta experiência encontra-se igualmente disponível para execução remota no e-lab.ist.eu [4].

DESCRIÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Esta experiência é constituída por uma seringa de vidro, cujo êmbolo tem atrito reduzido por estar lubrificado com grafite (a partir dum lápis ou mina de carvão de dureza H) e pelo facto da montagem estar colocada numa posição vertical.

Previamente determina-se, respetivamente, com recurso a uma balança de precisão e a uma craveira, a massa do êmbolo e o seu diâmetro o que permite obter uma precisão na medida de aproximadamente 0,5%. No caso considerado determinou-se a massa do êmbolo de 26,4 gr. e 18,9 mm para o diâmetro numa seringa de 20 ml Ruthe da Normax.

Utilizou-se para a captura do som um PC equipado com um microfone miniatura dum sistema de auscultadores. O programa utilizado para o registo do som e sua posterior análise foi o Audacity bastante comum nas comunidades audiófilas.

PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Selecionado um volume de referência, bloqueia-se a saída de ar da seringa através da colocação duma agulha desprovida de bico de corte e previamente tamponada com uma gota de cola de contacto.

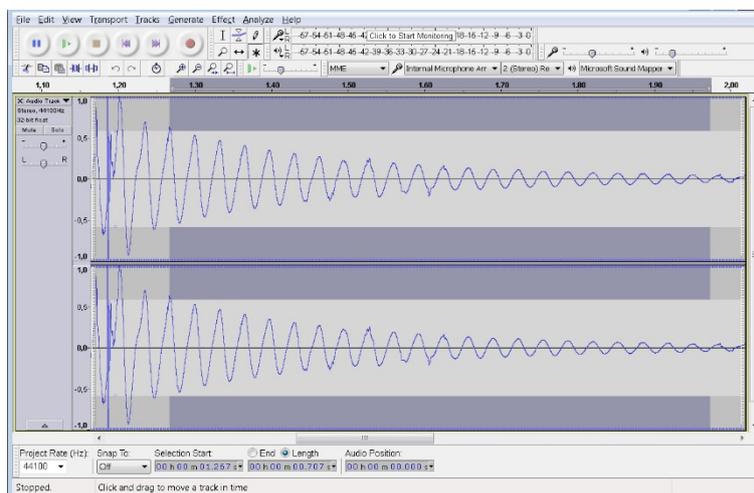


Figura 1. Captura do som após o estímulo da seringa. Os primeiros ciclos serão sempre ligeiramente distorcidos e podem ser rejeitados devido ao ruído provocado pela percussão mecânica do êmbolo.

A agulha é colocada em contacto com o microfone ligado ao computador. Após preparar o computador para adquirir o sinal, é percutido o êmbolo de forma a oscilar livremente em torno da sua posição de equilíbrio. Utilizando um programa de análise de som como o Audacity poderemos determinar a frequência das oscilações (fig.1) quer pela contagem de períodos num certo intervalo de tempo (aumentando a precisão na determinação do período) quer utilizando a opção Analyze->Plot Spectrum que gera automaticamente o gráfico da transformada de Fourier (fig.2). Normalmente ocorrem picos secundários múltiplos da frequência principal que correspondem a harmónicas do sinal.

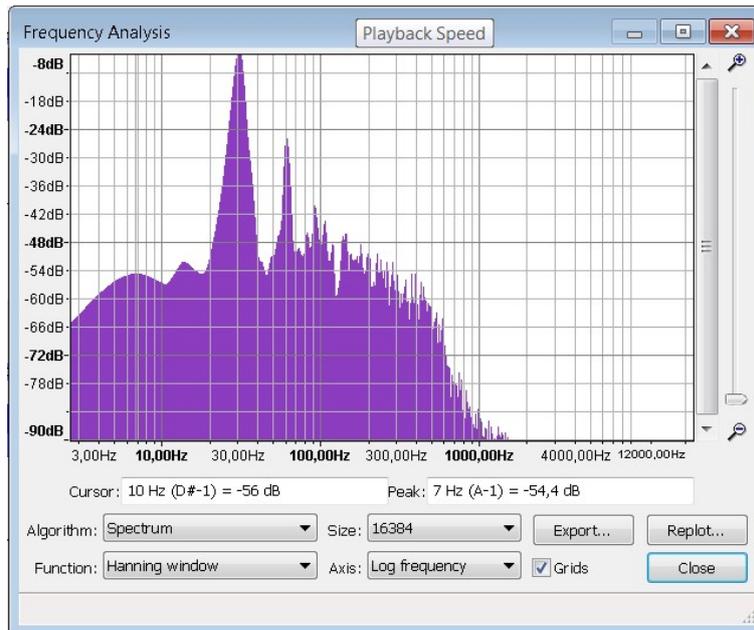


Figura 2. Análise de Fourier do sinal capturado onde facilmente se identifica o pico correspondente à oscilação principal do êmbolo, neste caso centrada nos 30 Hz.

Do período de oscilação T pode ser inferido γ de acordo com a equação 1:

$$\gamma = \frac{4mV}{p_0 r^4 T^2}, \quad (1)$$

cuja dedução se encontra na secção seguinte. Para o ar, maioritariamente diatômico, o valor determinado para a relação deve ser próxima de 1,4 como esperado.

Efetuada a experiência para vários volumes V_i , pode-se utilizar uma descrição paramétrica mais precisa da função de ajuste de modo a obter um ajuste mais rigoroso, utilizando mais do que um parâmetro livre, considerando por exemplo um valor adicional V_0 para o volume desconhecido entre a agulha e a seringa tal que $V=V_i+V_0$. Por outro lado pode-se considerar como variáveis livres não só esse volume inicial mas também a pressão atmosférica, uma vez que esta pode ter variações da ordem de 1%.

Apesar de não se aplicar em primeira aproximação ao presente caso é sempre de referir que quando se ajustam equações devem ser introduzidos parâmetros livres que permitam isolar erros sistemáticos das medidas experimentais como sejam offsets dos sistemas de aquisição de dados.

BASES TEÓRICAS

Se considerarmos um êmbolo sem atrito a oscilar livremente num cilindro de volume V_0 , à pressão p , então a força exercida no mesmo ($F=mg$) corresponde à força da gravidade (mg), ou seja o seu peso, menos a força devido à variação de pressão que se exerce na área do êmbolo ($F_r=A\Delta p$).

$$-mg + A\Delta p = m\ddot{x}$$

Ora a variação de pressão para pequenas variações de volume é dada por

$$\Delta p = \left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_{V=V_0} \Delta V$$

e se considerarmos o fenómeno suficientemente rápido não ocorrerão trocas de calor com o exterior (fenómeno adiabático), pelo que a expansão deve ser dada por

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma, \quad p = \frac{p_0V_0^\gamma}{V^\gamma}$$

Das equações acima vem que:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_{V=V_0} = -\gamma \frac{p_0V_0^\gamma}{V^{\gamma+1}} \Big|_{V=V_0} = -\gamma \frac{p_0}{V_0}$$

e

$$-mg + A \left(-\gamma \frac{p_0}{V_0} \Delta V \right) = m\ddot{y}$$

onde $\Delta V = Ay$

pelo que, simplificando,

$$\gamma \frac{p_0 A^2}{mV_0} y + g = 0$$

Se introduzirmos agora a variável ω poderemos rescrever a equação simplificada como:

$$\gamma \frac{p_0 A^2}{mV_0} = \omega^2, \quad \text{de modo que } \omega^2 y + g = 0$$

Alterando a coordenada de origem para a posição de equilíbrio do êmbolo, facilmente se identifica esta equação com a equação do movimento dum oscilador harmónico sem atrito

$$\omega^2 y' = 0$$

com

$$y = y' - \frac{g}{\omega^2},$$

e

$$\omega^2 = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = \gamma \frac{p_0 A^2}{mV_0}$$

Medindo o período de oscilação, T ou o seu recíproco, a frequência, determina-se γ

$$\gamma = \frac{4mV_0}{p_0 r^4 T^2}$$

onde r é o raio do cilindro.

CONCLUSÕES

A base desta experiência, uma simples oscilação dum êmbolo quando se tapa uma seringa, é um bom exemplo de como as ideias nascem muitas vezes de forma completamente independente no espírito de cada um de nós [5]. Esta ideia teve origem numa brincadeira em criança e

desenvolvida de forma completamente autónoma até serem consultados posteriormente os artigos de Rüchardt.

Fica demonstrado o didatismo dum experiência simples mas de uma enorme riqueza cuja tecnologia atual permite ir aos limites de erros inferiores a 1%. Por outro lado ainda se pode ir mais longe considerando como variáveis livres não só esse volume inicial mas também a pressão atmosférica, uma vez que esta pode ter variações da ordem de 1%.

Devido à dependência polinomial dos vários parâmetros com potências diferentes, esta experiência aporta ainda uma grande riqueza no estudo da propagação dos erros pela determinação da sensibilidade de cada um relativamente ao seu parâmetro levando a uma discussão de quais medidas se deve dar particular atenção.

Finalmente os alunos contactam com a determinação do período dum oscilação com recurso à transformada de Fourier que constitui uma maneira prática de tomarem contacto com estas ferramentas numéricas presentes nas aplicações correntes de áudio.

REFERÊNCIAS

- [1] Weltner, K. e Miranda, P., Cad. Bras. Ens. Fís., v. 19, n.2: p.253-263, 2002
- [2] Ruchardt's Method for Measuring the Ratio of Heat Capacities of Gases, S. Walter Orchard, Leslie Glasser, Journal of Chemical Education, 1988
- [3] Ruchardt's Measurement of γ using a Ground-Glass Syringe, Eric Ayars, AAPT Summer meeting, 2007
- [4] www.e-lab.ist.eu, acesso em 10/8/2016
- [5] <https://birthofidea.tecnico.ulisboa.pt/#fernandes>, acesso em 10/8/2016

feX: UM CURSO ABERTO DE FÍSICA EXPERIMENTAL

R. Figueiredo¹, H. Fernandes^{1,2}, P. Ribeiro¹, A. Moura Santos³, J. Viana⁴

¹Departamento de Física do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

E-mail: rui.fgf@gmail.com

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

³CEAFEL e Departamento de Matemática do Instituto Superior Técnico

⁴Instituto Superior Técnico e UIDEF, Instituto de Educação, Universidade de Lisboa

RESUMO

Neste artigo reportamos o desenvolvimento de conteúdos (textos de estudo, vídeos, exercícios, etc.) para o curso de física experimental inserido na plataforma MOOC Técnico (mooc.tecnico.ulisboa.pt) do IST. A realização de experiências remotas é parte integrante do curso e serão disponibilizadas aos participantes através da plataforma e-lab, que está em produção desde 1999. Os primeiros testes já efetuados permitem concluir em particular que a estrutura de revisão pelos pares (*peer review*) disponibilizada apresenta elevado potencial pedagógico.

1. INTRODUÇÃO

A plataforma do MOOC Técnico permite o desenvolvimento de cursos abertos online. A instalação base inclui entre várias ferramentas pedagógicas tais como:

Vídeos de diferentes formatos;

Textos de apoio;

Fóruns de discussão (para que os alunos/participantes possam trocar ideias, expor dúvidas e até mesmo colaborar em projetos);

Sistema de *peer review*, que iremos discutir com maior detalhe.

Com o objetivo de aproveitar estas funcionalidades, os autores criaram um curso que incide sobre técnicas e conceitos laboratoriais em física. Em conjunto com a plataforma e-lab [1,2,3], pretende-se então expandir as funcionalidades da plataforma MOOC para MOOL [4] (Massive Open Online *Laboratory*).

O sistema *peer review* permite ao professor criar um momento de avaliação no curso em que cada aluno submete um relatório pelo qual será avaliado, e de seguida é-lhe pedido que avalie relatórios submetidos por outros alunos. Entre estes dois momentos é apresentado ao aluno um relatório-exemplo para melhor perceber como deve avaliar os colegas. Esta ferramenta viabiliza a execução do curso com um grande número de participantes e tem também um benefício pedagógico: ao ler e corrigir relatórios de colegas, o participante aplica e amplia os seus conhecimentos e desenvolve as capacidades de colaboração, espírito crítico, verificação e validação do conhecimento, aspetos essenciais em ciência.

2. ESTRUTURA DO CURSO E SEQUÊNCIA DE TRABALHO

O curso está dividido em três partes, distribuídas em quatro semanas (ver Figura 1): *A essência* introduz conceitos fundamentais no campo da física experimental, tal como precisão e exatidão experimentais, Algarismos significativos, propagação de erros experimentais e ajuste de resultados (*fit*, em inglês). Esta componente ocupa as duas primeiras semanas do curso. Nas restantes são apresentadas duas experiências onde o aluno é *empowered* a usar as ferramentas ao seu dispor para explorar a experiência e tirar as suas próprias conclusões.

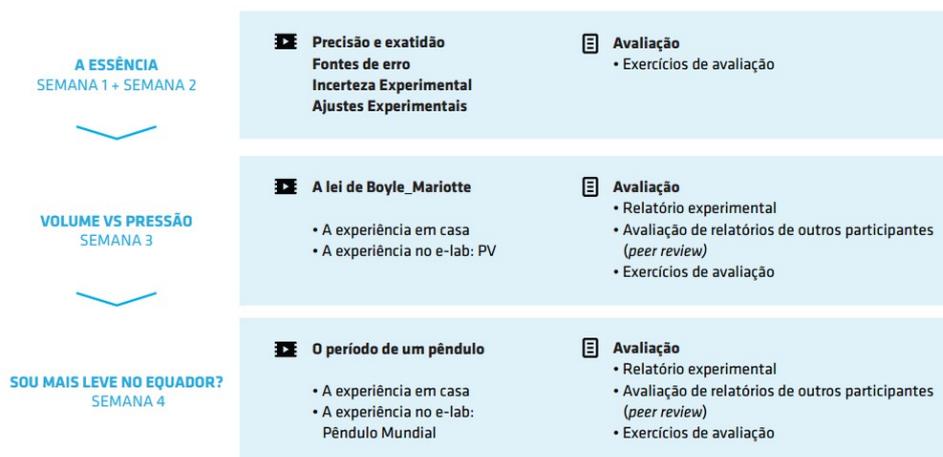


Figura 1. Linha do tempo do curso feX.

A sequência de trabalho do aluno em cada experiência é:

1. Breve contextualização sobre o conceito abordado e a motivação para a experiência;
2. Uma experiência simples que pode ser feita em casa, com materiais comuns;
3. Elaboração de um relatório sobre a experiência em casa, pelo qual será avaliado;
4. Avaliação de relatórios de outros alunos (*peer review*);
5. A experiência no e-lab;
6. Um conjunto de perguntas para avaliar o entendimento do aluno sobre a experiência feita no e-lab.

3. AVALIAÇÃO E PEER REVIEW

Um conceito crucial em qualquer ciência experimental é a validação pelos pares. Isto significa que não basta fazer uma experiência de forma correta, há que saber transmitir os resultados da mesma de maneira a que esta possa ser validada pela comunidade científica. Para transmitir a importância deste conceito aos participantes, fazemos uso da ferramenta de *peer review* da plataforma Mooc Técnico. Mais especificamente, após ter feito a experiência em casa, o aluno faz o relatório, mas em vez de submeter diretamente ao professor, o sistema distribui os vários relatórios entre outros participantes para que estes façam a avaliação. A sequência deste momento, presente nas semanas 3 e 4, é:

1. O aluno submete a sua resposta/relatório na plataforma;
2. É apresentado um relatório de exemplo, elaborado pelo professor, assim como os vários elementos de avaliação;
3. O aluno avalia a resposta exemplo, e é-lhe dado feedback instantaneamente, de maneira a perceber o que se pretende da avaliação;
4. Finalmente, o aluno avalia as respostas de dois outros alunos.

4. CONCLUSÕES

Com este projeto concluímos que é possível e viável implementar um MOOL na plataforma MOOC Técnico usando o software Open edX apoiado na plataforma REC do e-lab.

A filosofia do Open edX centra-se na divulgação de conhecimento e não na validação de competências. Assim, este curso pretende ser uma base técnica e motivacional para que o aluno

faça experiências em casa, expandindo conhecimentos que tenha adquirido de uma maneira autodidata.

A construção e desenvolvimento do curso em si apresentou vários desafios (que serão apresentados noutra publicação), mas um dos mais notórios é a importância da coordenação entre vídeo e textos de apoio para que estes sejam uma mais valia para o participante.

REFERÊNCIAS

- [1] <http://elab.ist.eu/>. Acedido em 6/Set/2016
- [2] Neto, R.B., Fernandes, H., Pereira, J., Duarte, A.S., e-lab Remote Laboratory, International Journal of Online Engineering, vol 9, 2013.
- [3] Figueiredo, R., Fernandes, H., Ferramentas de Apoio a Laboratórios Remotos: O Portal e-lab, Livro de Atas da Conferência Física 2012, 124-127.
- [4] Fernandes, H., Balula, S., Marques, R., Henriques, R., Pereira, T., Remote real laboratories in massive open on-line laboratories (MOOLs): A live demonstration at experimenta@ 2015, doi 10.1109/EXPAT.2015.7463223
- [5] Sachs, J., Parsell, M., Peer Review of Learning and Teaching in Higher Education: International Perspectives, Journal of Pedagogic Development, 4(3), 2014.
- [6] Suen, H. K., Peer Assessment for Massive Open Online Courses (MOOCs), The International Review of Research in Open and Distributed Learning, 15(3), 2014.
- [7] Piech, C., Huang, J., Chen, Z., Do, C., Ng, A., Koller, D., Tuned Models of Peer Assessment in MOOCs, arXiv 1307.2579v1, 2013.

GOOGLE EARTH: CÁLCULO DE DISTÂNCIAS

Armando A. Soares^{1,4,5}, Paula Catarino^{2,4,6}, J. J. Teixeira³

¹ Departamento de Física-ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: asoares@utad.pt

² Dep. de Matemática- ECT/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

E-mail: pcatarin@utad.pt

³ Agrupamento de Escolas Fernão de Magalhães, 5400-285 Chaves, Portugal

E-mail: jjsteixeira@gmail.com

⁴ Ciener-INEGI/UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

⁵ LabDCT/CIDTFF, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

⁶ CMAT-UTAD, Apartado 1013, 5001-801 Vila Real, Portugal

RESUMO

É feita uma abordagem ao *Google Earth* como ferramenta informática que pode ser usada no ensino de coordenadas curvilíneas. Parte-se de algumas medidas genéricas de distâncias entre dois pontos sobre a superfície da Terra para prever o modelo físico-matemático usado pelo *Google Earth*. As distâncias medidas no *Google Earth* são comparadas com as distâncias obtidas com modelos geométricos da Terra aproximados por uma esfera e por um esferoide oblato. Para aferir da exatidão das medidas, os resultados obtidos com estes modelos e com o *Google Earth* são comparados com as distâncias de pistas olímpicas em estádios.

INTRODUÇÃO

O *Google Earth* é um programa versátil e interessante para ser usado em sala de aula. Pode ser definido como um globo virtual que inclui uma grande quantidade de informação geográfica. A possibilidade de visualização 3D de locais conhecidos dá aos alunos uma perspetiva real dos problemas estudados, que é um fator de motivação na aprendizagem das ciências. Neste trabalho, fazemos uma análise ao modelo físico-matemático utilizado pelo *Google Earth* para calcular a distância entre dois pontos na superfície da Terra. A Terra é frequentemente considerada esférica. Uma boa aproximação para a forma da Terra é a de um elipsoide oblato mas, na realidade, é uma conveniência matemática. A superfície equipotencial física da gravidade que define a forma física do campo gravítico real é designada de geoide e reflete a distribuição de massa no interior da Terra [1, 2]. É a superfície equipotencial que define o nível médio do mar e é expressa em relação ao elipsoide de referência [3]. A altura do geoide é positiva quando o geoide está acima do elipsoide e negativo quando o elipsoide está acima do geoide. O geoide varia entre cerca de 70 m acima do elipsoide no Atlântico e cerca de 100 m abaixo do elipsoide no oceano Índico. É importante lembrar que o geoide é uma figura geométrica que não descreve a forma exata da superfície real da Terra, por exemplo, as montanhas e as depressões abaixo do nível médio dos mares não estão contempladas nele. A aproximação da Terra a um elipsoide oblato de revolução (esferoide oblato) ou uma esfera são razoáveis para usar em aplicações escolares.

A Figura 1 mostra várias imagens da vista em perspetiva do geoide.

RESULTADOS

Para o elipsoide de referência o maior raio do elipsoide é $a = 6378,1370$ km e define o raio da circunferência equatorial. O menor raio do elipsoide é $c = 6356,7523$ km e é definido pela distância do centro do elipsoide até aos polos [2]. O achatamento do elipsoide é dado por

$$f = \frac{a - c}{a} = \frac{1}{298,252} \quad (1)$$

e pode ser relacionado com a excentricidade por

$$e = \sqrt{1 - \frac{c^2}{a^2}} = \sqrt{2f - f^2} \quad (2)$$

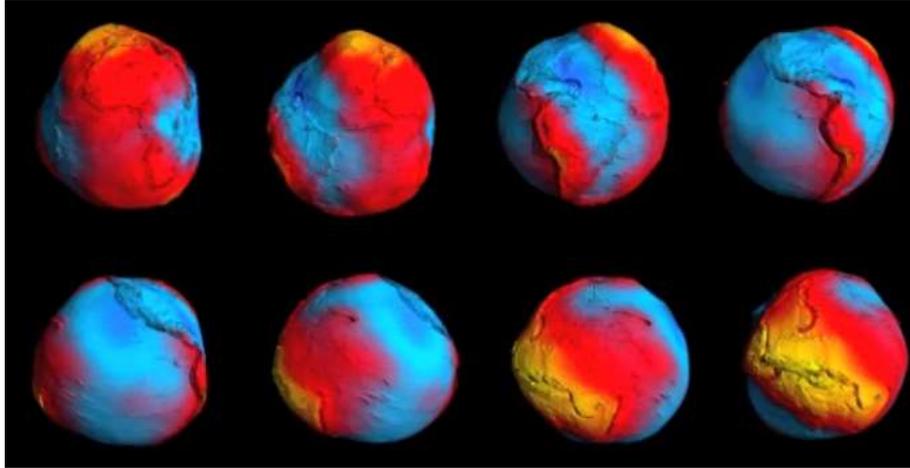


Figura 1. Imagens de vistas em perspectiva do geóide [4].

Tendo em conta que $\theta = \frac{\pi}{2} - \phi$ (Figura 2), as coordenadas geográficas (ϕ , λ) podem ser relacionadas com as coordenadas cartesianas e esféricas por

$$\begin{aligned} x &= a \sin \theta \cos \lambda \\ y &= b \sin \theta \sin \lambda \\ z &= c \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

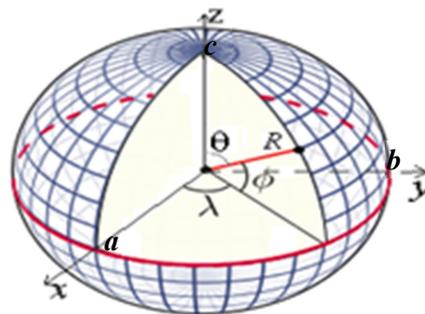


Figura 2. Coordenadas cartesianas (x , y , z) e esféricas (R , θ , λ). Latitude ϕ e longitude λ .

Se considerarmos a Terra uma esfera perfeita $a = b = c = R_T$, onde R_T é o raio da esfera equivalente, com 6371,0072 km [5]. R_T é o raio de uma esfera perfeita hipotética que tem a mesma área de superfície do elipsoide de referência, Figura 2.

Comprimento de um arco sobre o meridiano de Greenwich (modelo do elipsoide)

Tendo em conta que os meridianos são as elipses definidos pelo grande círculo da terra passando pelos polos e por qualquer ponto na superfície da Terra. O cálculo de um segmento desta curva pode ser determinado por

$$L = \int dl = \int_{p_1}^{p_2} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx \quad (4)$$

Desenvolvendo a equação 4 temos que o comprimento de um arco sobre o meridiano [6] é dado por

$$L \approx \theta a \left(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256} \right) \quad (5)$$

Conhecendo o raio equatorial a para o elipsoide, o comprimento do arco entre dois pontos L à mesma latitude (medido *on-map* no *Google Earth*) e θ podemos usar o método iterativo simples para determinar o menor raio da elipsoide c . Por outro lado, conhecendo c ou e podemos determinar qualquer comprimento de arco sobre um meridiano. Por exemplo, para um quarto do meridiano de Greenwich obtém-se o valor de 10001,97 km. No *Google Earth* o valor medido é 10003,28 km, Figura 3.

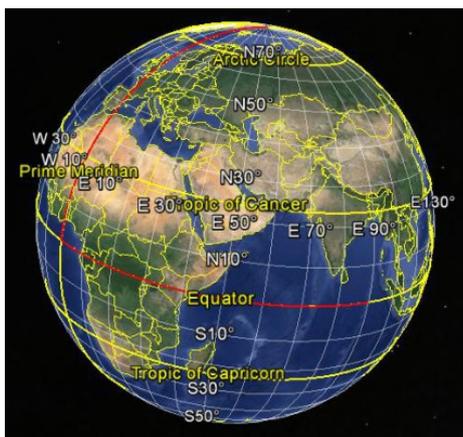


Figura 3. Imagem do *Google Earth* com um quarto do comprimento do círculo do Equador definido pelas coordenadas geográficas (0°00'00.07"N; 0°00'00.35"E) e (0°00'00.07"N; 90°00'00.16"E) com 10018,75 km e um quarto do comprimento do meridiano de Greenwich definido por coordenadas (0°00'00.15"N; 0°00'00.40"E) e (89°59'17.50"N; 179°59'22.66"E) com 10003,28 km (linhas vermelhas).

Comprimento do arco entre dois pontos (Modelo esférico)

Tendo em conta dois pontos (P_1 e P_2) na superfície de Terra, definem-se os vetores \vec{r}_1 e \vec{r}_2 com origem no centro da Terra. A partir da definição de produto escalar obtém-se o ângulo β entre eles que é dado por

$$\cos(\beta) = \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{R_{T+h}^2} \quad (6)$$

Para distâncias $\overline{P_1P_2} = R_{T+h}$ temos $\overline{P_1P_2} \approx ds = R_{T+h} \beta$.

R_{T+h} é raio da esfera equivalente mais a altura h de P_1 e P_2 relativamente ao nível médio da água do mar.

Na Tabela 1 estão apresentadas as medidas de três pistas olímpicas de 100 m realizadas com o *Google Earth* e comparadas com os valores obtidos a partir das coordenadas geográficas, usando o modelo esférico da Terra.

Tabela 1. Comparação entre os comprimentos de pistas de 100 m medidas com o *Google Earth* e os calculados com o modelo esférico.

| Estádio Olímpico de Montjuic, Espanha ($h = 87$ m) | Sydney Olympic Park, Austrália ($h = 15$ m) | York Lions Stadium, Canadá ($h = 212$ m) |
|--|---|--|
|--|---|--|

| | P_1 | P_2 | P_1 | P_2 | P_1 | P_2 |
|------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Latitude | 41°21'51,58"N | 41°21'55,02"N | 33°50'59,33"S | 33°50'02,52"S | 43°46'28,53"N | 43°46'28,53"N |
| Modelo esférico | | | | | | |
| Longitude | 02°09'18,67"E | 02°09'18,75"E | 151°03'50,58"E | 151°03'49,89"E | 79°30'24,22"W | 79°30'24,22"W |
| $P_1P_2(m)$ | 100,094 | | 100,102 | | 99,903 | |
| Google Earth | | | | | | |
| $P_1P_2(m)$ | 100,01 | | 100,07 | | 100,03 | |

CONCLUSÕES

O trabalho apresentado poderá ser uma boa estratégia para o ensino das coordenadas curvilíneas aos alunos dos primeiros anos do ensino superior. Com estes exemplos os alunos podem melhorar os seus conhecimentos e aplicá-los num caso real.

Este tipo de problema pode ser usado em projetos de ciências com exatidões inferiores a 1%.

REFERÊNCIAS

- [1] Lecture 3: earth's figure, gravity, and geoid: http://www.soest.hawaii.edu/GG/FACULTY/conrad/classes/GG612_S11/Lecture_03.pdf. (consultado a 3 de setembro de 2016).
- [2] Chamba F., Ricard Y., Valette. B. Flattening of the Earth: further from hydrostaticity than previously estimated. *Geophys. J. Int.* 183, 727-732, 2010.
- [3] Torge W. *Geodesy* (3rd ed.) Walter de Gruyter (Berlin) 2001.
- [4] ESA: http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2011/03/GOCE_Geoid. (consultado a 3 de setembro de 2016).
- [5] International Organization for Standardization, Geographic information — Spatial referencing by coordinates. ISO/FDIS 19111:2002.
- [6] Soares A. Catarino P. Teaching curvilinear coordinates with google earth. *EDULEARN16 Proceedings* 1261-1266, 2016.

MATERIALES DIDÁCTICOS SOBRE FUERZAS Y MOVIMIENTO PARA LA ENSEÑANZA SECUNDARIA

Verónica Tricio¹, Ramón Viloria², Gema Calleja³

¹ Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos (España)

E-mail: vtricio@ubu.es

² Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Burgos (España)

E-mail: rviloria@ubu.es

³ Alumna del Máster Universitario de Profesorado de ESO y Bachillerato de la Universidad de Burgos (España)

E-mail: gcl0009@alu.ubu.es

RESUMEN

Se han elaborado materiales didácticos sobre las fuerzas y el movimiento, que constituyen un bloque de contenidos en el currículo básico de la Enseñanza Secundaria en España. Están adecuados a un conjunto de actividades propuestas para favorecer el aprendizaje de las fuerzas en los estudiantes de FP Básica. Se presentan instrumentos de elaboración propia utilizados con ese fin, entre otros: cuestionario para conocer y analizar las ideas previas de los estudiantes, presentaciones en el aula y demostraciones de cátedra. Finalmente se muestran los resultados obtenidos durante la implementación realizada y se proponen otras actividades adaptadas a niveles de ESO y Bachillerato.

1. INTRODUCCIÓN. IDEAS PREVIAS Y CAMBIO CONCEPTUAL

Incluso antes de acceder a cualquier tipo de enseñanza formal, se construyen concepciones sobre uno mismo y sobre el entorno: estas suelen denominarse concepciones alternativas o ideas previas. Según Limón y Carretero (2008) [1]: *Las ideas previas son construcciones personales que suelen estar guiadas por la percepción, la experiencia y el conocimiento cotidiano del alumno, hay diferencia en la especificidad de cada una de ellas, tienen cierto grado de estabilidad, así como de coherencia y solidez, que las hacen constituir representaciones difusas y aisladas, o por el contrario formar parte de un modelo mental explicativo.*

Concretamente, las ideas previas más notables sobre términos de Física están relacionadas con el concepto de fuerza, debido a su utilización habitual en gran variedad de contextos y con diferentes acepciones [2] así como a la observación cotidiana de objetos en movimiento que entran en conflicto con el punto de vista científico [3].

Según Pozo [1], el cambio conceptual consiste en la “formación de conceptos científicos a partir de la reestructuración de las concepciones alternativas que ya posee el alumno”. Por lo tanto, el aprendizaje en el ámbito de las ciencias es un proceso de cambio conceptual [4] [5].

Para fomentar dicho proceso, es necesario producir un conflicto cognitivo entre las ideas previas de los alumnos y el funcionamiento de la naturaleza [6]. Para ello, pueden determinarse las concepciones alternativas de los estudiantes y presentar eventos discrepantes que las contradigan (demostraciones o fenómenos que tengan que explicar y hacer predicciones sobre ellos). Además, si las metodologías empleadas fomentan la participación activa y la interacción entre los alumnos, estos muestran cambios conceptuales significativos [7].

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo ha sido planificar y preparar materiales didácticos relativos a actividades dirigidas a:

- a) conocer y analizar las ideas previas de los alumnos sobre el concepto de fuerza,
- b) favorecer el cambio conceptual y mejorar el aprendizaje sobre la fuerza,

c) implicar y motivar al alumnado en el proceso de aprendizaje de la Física.

3. MATERIALES DIDÁCTICOS

Para favorecer el aprendizaje de las fuerzas en los estudiantes de FP Básica (FPB), Educación Secundaria Obligatoria (ESO) y Bachillerato (BAC), en este trabajo se presentan algunos instrumentos de elaboración propia utilizados con ese fin. Para los estudiantes de FPB destacamos, entre otros, algunos que se han implementado con los estudiantes de ese nivel educativo: cuestionarios para conocer, analizar y superar las ideas previas de los estudiantes, presentaciones en el aula y demostraciones de cátedra. Adicionalmente se han elaborado materiales y realizado propuestas de otras actividades adaptados a niveles de ESO y BAC. En los párrafos que siguen se explican brevemente las actividades desarrolladas y las actividades propuestas utilizando los materiales citados.

3.1 ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Por un lado, diferentes materiales didácticos se han elaborado e implementado en el aula con alumnos de 2º curso de FPB. Los materiales consisten en: cuestionario inicial, demostraciones de cátedra, explicación sobre las leyes de Newton y cuestionario final. La Tabla 1 muestra un esquema de los materiales preparados para cada una de estas actividades.

Tabla 1. Materiales didácticos elaborados para cada actividad desarrollada.

| Actividad desarrollada | Materiales elaborados |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Cuestionario inicial | Versión alumnos |
| | Versión profesor |
| Demostraciones de cátedra | Versión profesor |
| | Presentación de diapositivas |
| | Preguntas para responder en grupo |
| Explicación sobre las leyes de Newton | Presentación de diapositivas |
| Cuestionario final | Versión alumnos |
| | Versión profesor |

En primer lugar, los alumnos responden al cuestionario inicial para conocer sus ideas previas y conocimientos sobre el concepto de fuerza. Este cuestionario consta de diez preguntas tipo test de respuesta cerrada y única, tanto de elaboración propia como adaptadas de otros cuestionarios, que contemplan ideas previas sobre fuerza que pueden plantear dudas o interrogantes entre los estudiantes. Se han preparado dos versiones del cuestionario: una para los alumnos, que contiene únicamente las preguntas a contestar, y otra para los profesores que, además de las preguntas y su origen, incluye las respuestas correctas y los objetivos que persigue cada cuestión.

A continuación, se llevan a cabo actividades para favorecer el cambio conceptual, consistentes en demostraciones de cátedra y explicaciones sobre las leyes de Newton. Las demostraciones de cátedra constan de presentaciones de diferentes casos sobre varios tipos de fuerzas: mecánica, gravitatoria, eléctrica y magnética. Se llevan a cabo empleando materiales de fácil acceso y de bajo coste (pelotas pequeñas de plástico, globos, latas de refresco vacías e imanes), que se muestran en la Figura 1, y siguiendo una presentación de diapositivas de elaboración propia que contiene explicaciones, dibujos y esquemas sobre las fuerzas tratadas. A lo largo de la actividad, también se plantean por escrito algunas preguntas relacionadas para que los alumnos las contesten en grupo.



Figura 1. Materiales utilizados durante las demostraciones de cátedra.

Después de las demostraciones de cátedra, se explican las leyes de Newton para completar los conocimientos sobre fuerzas, todo ello empleando una presentación de diapositivas de elaboración propia que contienen explicaciones e imágenes sobre el contenido tratado. En la Figura 2 se presenta una de las diapositivas de la presentación.

LEYES DE NEWTON

2ª Ley de la dinámica. Ley fundamental de la dinámica

La fuerza ejercida sobre un objeto es directamente proporcional a la aceleración que adquiere:

Unidades de medida de la fuerza en el S.I.: **Newtons (N)**

Figura 2. Diapositiva para la explicación de las leyes de Newton.

Por último, los alumnos responden al cuestionario final, cuyo objetivo es determinar la existencia de cambios conceptuales sobre la fuerza, debidos a las actividades realizadas previamente. Este cuestionario, al igual que el inicial, contiene diez preguntas tipo test de respuesta cerrada y única, tanto de elaboración propia como adaptadas de otros cuestionarios. Se han elaborado dos versiones del cuestionario: una para los alumnos y otra para los profesores, con las mismas características que las del cuestionario inicial.

3.2 ACTIVIDADES PROPUESTAS

Por otro lado, los materiales didácticos presentados a continuación se han elaborado y preparado para su utilización en el aula y están destinados a diferentes niveles de educación secundaria: FPB, ESO y BAC.

Estos materiales toman como referencia las ideas previas sobre fuerzas que se encuentran más presentes entre los estudiantes de educación secundaria [2] [3], de manera que dichas propuestas puedan ayudar a conseguir el cambio conceptual y faciliten la asimilación de los conocimientos científicos.

Las actividades propuestas se han seleccionado atendiendo a diversos factores: los estudios previos consultados, los currículos determinados por la Ley Orgánica para la mejora de la calidad educativa (LOMCE) [8] [9] y los resultados obtenidos durante la implementación en el aula de las actividades mencionadas anteriormente.

Un esquema simplificado de las diferentes actividades preparadas se muestra en la Tabla 2. Para cada una de ellas, se ha elaborado una ficha en la que se indica el título y una breve explicación de la actividad, seguido de los posibles niveles a los que está dirigido, los objetivos tanto didácticos como de aprendizaje que se busca conseguir con ella, el material necesario para su realización, el procedimiento a seguir, las cuestiones de reflexión que se pueden plantear y, en último lugar, las fuentes utilizadas para su elaboración.

Tabla 2. Materiales propuestos, fuerzas que intervienen y niveles educativos a los que están dirigidos.

| Materiales propuestos | Fuerza que interviene | 2º ESO | 3º ESO | 4º ESO | 2º FP Básica | 1º Bachillerato | 2º Bachillerato |
|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Jugando con las fuerzas | Mecánica | | | X | X | X | |
| Bombardeo de preguntas | Mecánica | | | X | X | | |
| Sin moverse del sitio | Mecánica | X | X | | X | | |
| Con el libro a rastras | Mecánica | | X | X | X | X | |
| Pendiendo de un hilo | Gravitatoria | | | | | X | |
| Unas cargas muy influyentes | Eléctrica | | | | | X | X |
| Columpio magnético | Magnética | | | | | | X |

La actividad *Jugando con las fuerzas* es una práctica de simulación dedicada a la comprensión de conceptos acerca de la primera y la segunda ley de Newton empleando una simulación virtual [10] que contiene cuatro escenarios diferentes.

En la actividad *Bombardeo de preguntas*, que incluye tanto simulaciones como resolución de cuestiones, se van a resolver tres preguntas de tipo test sobre la primera ley de Newton con la ayuda de simulaciones virtuales [11] relacionadas con las preguntas que se plantean.

Durante la actividad *Sin moverse del sitio* [12], que puede llevarse a cabo como demostración de cátedra o como práctica grupal a realizar por los alumnos, se tratan aspectos de la primera ley de Newton utilizando materiales caseros, para comprobar de un modo cualitativo la inercia que poseen los cuerpos al iniciarse un movimiento y determinando también las variables de las que depende esta.

En cuanto a la actividad *Pendiendo de un hilo*, es una clásica práctica de laboratorio [13] que se centra en la fuerza gravitatoria y pretende determinar, de forma experimental y empleando representaciones gráficas, la fuerza de la gravedad a partir de los mismos materiales, pero con diferentes características.

La actividad *Unas cargas muy influyentes* es una práctica de simulación en la que se propone la utilización de un simulador virtual [14] (Figura 3) para trabajar con partículas puntuales cargadas, observar las fuerzas de atracción o repulsión existentes entre ellas y calcular la fuerza neta en función de su separación y su carga.

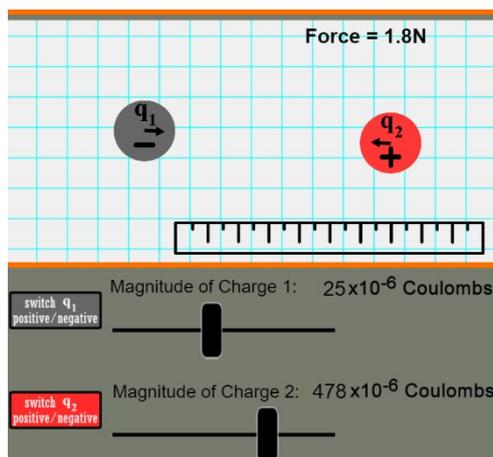


Figura 3. Simulador virtual de la actividad Unas cargas muy influyentes.

La actividad *Columpio magnético* es una práctica de laboratorio [15] que se centra en mejorar la comprensión de conceptos relacionados con la fuerza electromagnética, comprobando qué variables influyen en ella y mostrando la relación existente entre campo eléctrico y magnético (Figura 4).

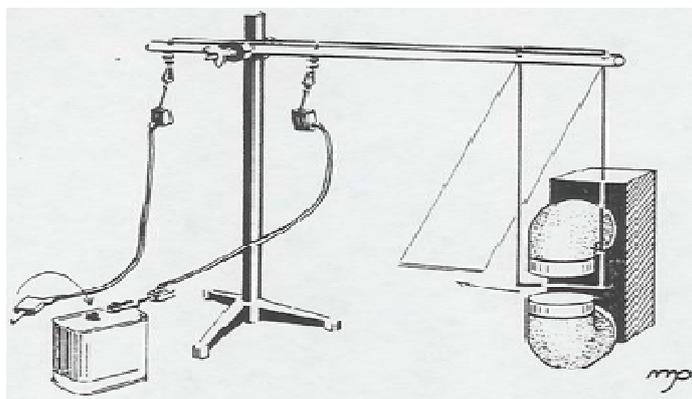


Figura 4. Montaje de la actividad Columpio magnético.

REFERENCIAS

- [1] Nava M., Arrieta X., Flores M. Ideas previas sobre carga, fuerza y campo eléctrico en estudiantes universitarios. Consideraciones para su superación, *TELOS Revista de Estudios Disciplinarios en Ciencias Sociales*, vol. 10, no. 2, 308-323, 2008.
- [2] Mora C., Herrera D. Una revisión sobre ideas previas del concepto de fuerza, *Latin American Journal of Physics Education*, vol. 3, no. 1, 72-86, 2009.
- [3] Tao P. Confronting students' alternative conceptions in mechanics with the Force and Motion Microworld, *Computers in Physics*, vol. 11, no. 2, 199-207, 1997.
- [4] Colombo L., Fontdevilla P. A. Concepciones previas en el aprendizaje significativo del electromagnetismo, *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 8, no. 3, 215-222, 1990.
- [5] Hurtado M., Müller G., Sebastián J. M., d'Alessandro A. Concepciones intuitivas de los estudiantes (de educación media y la universidad) sobre el principio de acción y reacción, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 16, no. 8, 1-4, 1994.
- [6] Rezende L., Raimann E., Rodrigues R., de Souza M. W. Força & movimento: a realidade virtual como instrumento de estudo de concepções espontâneas em dinâmica, *XIII Symposium on Virtual Reality*, pp. 89-95, 2011.
- [7] Picquart M. ¿Qué podemos hacer para lograr un aprendizaje significativo de la Física? *Latin American Journal of Physics Education*, vol. 2, no. 1, 29-36, 2008.

[8] Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.

[9] Real Decreto 127/2014, de 28 de febrero, por el que se regulan aspectos específicos de la Formación Profesional Básica de las enseñanzas de formación profesional del sistema educativo.

[10] PhET. Forces and motion: Basics 2.0.1: http://phet.colorado.edu/sims/html/forces-and-motion-basics/latest/forces-and-motion-basics_en.html (consultado el 10 de septiembre de 2016).

[11] Leyes de Newton. Ibercaja Aula en Red: <http://aulaenred.ibercaja.es/contenidos-didacticos/leyes-de-newton/> (consultado el 10 de septiembre de 2016).

[12] Escotet M. C. Experimentos de Física. Investigación científica en Secundaria, vol. 2, 51-54, 1999.

[13] Valle J., Arranz G., Pérez P. J., Cachorro V. E., Vilorio R. E., Ramos M. C. Física general. Prácticas de laboratorio, Servicio de publicaciones Universidad de Valladolid, 1987.

[14] The Physics Classroom. Coulomb's Law: <http://www.physicsclassroom.com/Physics-Interactives/Static-Electricity/Coulomb-s-Law> (consultado el 10 de septiembre de 2016).

[15] García M. J. Fuerza magnética sobre un conductor de corriente: <http://www.ual.es/~mjgarcia/fmagnetica.pdf> (consultado el 10 de septiembre de 2016).

A MEDIÇÃO PRECISA DE g NUM PÊNDBULO GRAVÍTICO: DEPENDÊNCIA NAS PEQUENAS AMPLITUDES E NO ATRITO

Rui Jorge Agostinho^{1,2}

¹ Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

² Observatório Astronómico de Lisboa, Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço

E-mail: rui.agostinho@oal.ul.pt

RESUMO

No estudo do pêndulo gravítico como oscilador harmónico [1,2] é comum usar a solução das pequenas amplitudes e desprezar os termos de atrito aerodinâmico. Estas simplificações tal como a dependência dos resultados nos cuidados experimentais, em geral produzem incertezas na ordem dos $0.01m/s^2$. Para demonstrar estes efeitos e como compensá-los, além de se querer determinar o valor da aceleração gravítica g com grande precisão, montou-se um pêndulo de $l = 3.4$ m de comprimento cujos resultados, permitem deduzir que $g = 9.8009 \pm 0.0005m/s^2$.

1. INTRODUÇÃO

Um pêndulo gravítico que conserva a energia, sendo largado numa abertura máxima θ_m (à vertical) segue a equação do movimento

$$\frac{d\theta}{dt} = \sqrt{\frac{2g}{l}} \sqrt{\cos(\theta) - \cos(\theta_m)} \quad (1)$$

onde l é a distância do ponto de oscilação ao centro de massa.

A solução aproximada provém dum integral elíptico cujo argumento se desenvolve em série de potências, para pequenos valores de θ_m :

$$T_p = T_0 \left(1 + \frac{1}{4} \text{sen}^2\left(\frac{\theta_m}{2}\right) + \frac{9}{64} \text{sen}^4\left(\frac{\theta_m}{2}\right) + \Lambda \right)$$

Como θ_m não ultrapassa o 4° a expressão anterior desenvolve-se em [1]:

$$T_p = T_0 \left(1 + \frac{1}{16} \theta_m^2 + \frac{11}{3072} \theta_m^4 \right) \quad (2)$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3)$$

A equação (3) dá sempre um valor por defeito do período T_p do pêndulo, mas ao calcular g pela medição real de T_p , *o seu valor também fica por defeito*. Deste modo, para se obter uma precisão $\Delta g/g \leq 0,01\%$ é preciso usar a equação (2) com mais termos e amplitudes de movimento inferiores a 4° , como se depreende da figura 1.

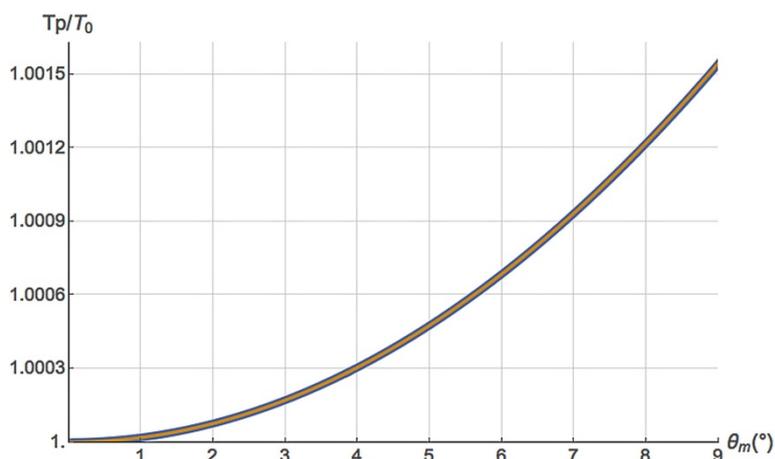


Figura 1. A azul está o plot da equação (2) e a amarelo o valor da mesma até ao termo de 2ª ordem, suficiente para pequenos ângulos.

1.1. A MONTAGEM EXPERIMENTAL

Montou-se um pêndulo de comprimento $l = 3.3748 \pm 0.0002$ m que foi medido (12 a 20 vezes) no segmento mais alto com um laser de precisão Leica DISTO A6. No teto foi instalado um pequeno rolamento, de diâmetro $D_{rol} = 18.43 \pm 0.02$ mm, lubrificado e limpo para reduzir o atrito. Também se fizeram experiências com um novo rolamento com $D_{rol} = 15.13 \pm 0.01$ mm, obtendo-se melhores resultados. A massa foi presa num fio de aço multifilar macio e por isso quase inextensível. A massa de 500 g é de forma cilíndrica (figura 2) e tem uma altura $h_m = 42.89 \pm 0.05$ mm e diâmetro $D_m = 41.73 \pm 0.06$ mm. D_m é o comprimento que interrompe a fotoporta e serve para medir o período da oscilação no ponto mais baixo da trajetória, onde se mede a velocidade máxima v_m . O material foi todo da PASCO: fotoporta, ScienceWorkshop 500, PasPort e software DataStudio. A análise teórica e de dados foi feita em *Mathematica*.



Figura 2. Massa cilíndrica de 500 g, bases da fotoporta, de alinhamento e largada.

1.2. CUIDADOS NO ALINHAMENTO E A PRECISÃO ALCANÇADA

i) Colocar a fotoporta na posição de equilíbrio do pêndulo, para se conseguir uma dispersão mínima nos valores obtidos. O bom procedimento é, com o DataStudio, medir os semi-períodos à esquerda e à direita: fazendo o plot ao vivo destes valores ajusta-se a posição da fotoporta de modo a ficarem iguais. Aqui, a forma cilíndrica da massa joga a favor.

ii) A massa deve ser largada sem oscilações algumas. Devido à fragilidade do sistema é fácil induzir uma rotação da massa em torno do ponto onde o fio se prende, assim como deixá-la num movimento cónico em vez dum movimento num plano vertical. O próprio fio de 3.4 m *entra em vibração* e, por isso, deve-se deixar tudo isto amortecer, antes de iniciar-se a recolha de dados.

iii) A interface ScienceWorkshop 500 está limitada a uma precisão de 10^{-4} s e, sendo digital, *trunca os valores nesta casa*. Este efeito surge nos gráficos. Por isso, também se usou a

interface PasPort (PASCO) que melhora esta precisão para 10^{-6} s, em conjunto com o novo rolamento. Os resultados *na dispersão de valores medidos* e perda de energia foram assim melhorados.

2. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

2.1. O PRIMEIRO PÊNDBULO

As medições do período do primeiro pêndulo estão na figura 3, que oscilou durante 65 minutos. Nota-se o truncamento nos 10^{-4} s da interface usada. Apesar de todos os cuidados na medição, o valor do período oscila na casa dos 0.3 ms nos movimentos com maior amplitude; aumenta um pouco para 0.4 ms a meio e quando a amplitude $\theta_m < 1^\circ$, chega ao 1 ms.

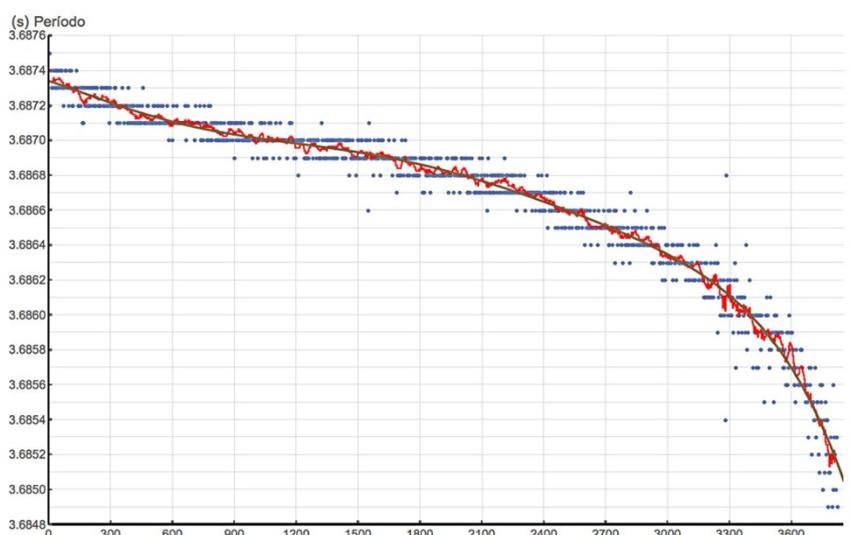


Figura 3. Variação temporal (65 min) do período do primeiro pêndulo. A curva a vermelho é uma média móvel dos dados. A castanha está um ajuste polinomial simples à média móvel.

Do tempo de passagem na fotoporta obtém-se a velocidade máxima $v_m(t)$ (figura 4) que vai diminuindo. É devido tanto ao termo da amplitude $\theta_m(t)$ decrescente como à fricção aerodinâmica (proporcional a v^2) e ao atrito do rolamento, constante.

Para destrinçar os diferentes efeitos calcula-se primeiro a dependência em $\theta_m(t)$. O ângulo máximo θ_m em cada oscilação obtém-se da velocidade v_m , *assumindo que há conservação de energia mecânica*. Apesar de não haver, a perda de amplitude em cada semi-oscilação é de apenas 0.0048° , nos primeiros 5 minutos quando há maior velocidade. Diminui para 0.0011° /semi-oscilação nos movimentos finais. Com esta suposição, estimou-se o ângulo de abertura máxima para cada oscilação, aproximando às pequenas amplitudes: $\theta_m \approx v_m(t) / \sqrt{gl}$ (ver fig. 4, à direita).

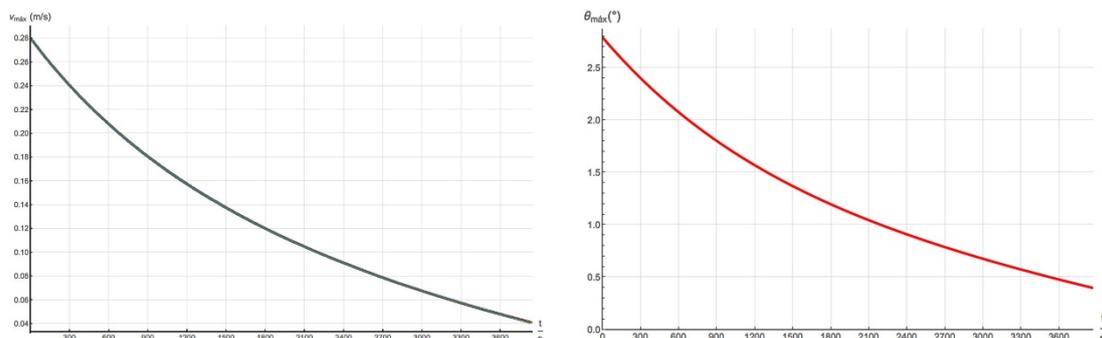


Figura 4. Esq: A variação temporal da velocidade máxima v_m (m/s) do 1º pêndulo. Dir: A variação temporal do ângulo de abertura máxima θ_m (°).

Dos valores $T_p(t)$ e $\theta_m(t)$ calculou-se o período $T_0(t)$, cujo comportamento está na curva azul da figura 5, ajustada com um polinómio (a preto). Nota-se que a partir dos 1700 s ($\theta_m \approx 1.2^\circ$) o valor de $T_0(t)$ inicia uma perda mais acentuada, indicativo de que os atritos cinético e de fricção aerodinâmica, se tornam dominantes.

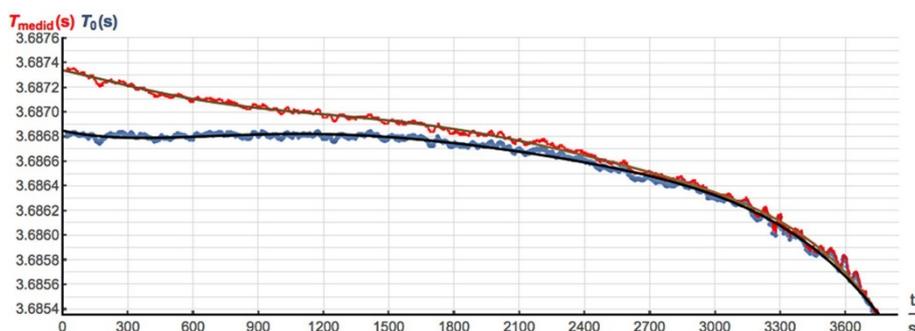


Figura 5. Primeiro pêndulo. A curva a vermelho é a média móvel dos dados originais com o ajuste polinomial a castanho. Aplicada a correção da equação (2) obtém-se a média móvel que representa $T_0(t)$ (curva azul), à qual foi ajustada um polinómio (curva a preto).

Deduz-se o valor de g com o $T_0 = 3.68685$ s do patamar da curva azul e recorrendo à equação (3). Obtém-se que $g = 9.8015 \pm 0.0005 \text{ m/s}^2$ que está desviado de apenas $+0.0008 \text{ m/s}^2$ (0,008%) ao valor obtido com um gravímetro [3] ($g = 9.80071 \pm 0.00002 \text{ m/s}^2$) no lab do 4º piso do edifício C8 da FCUL, em Lisboa.

2.2. O SEGUNDO PÊNDULO

Trocou-se o rolamento e usou-se a interface PasPort da PASCO com uma precisão nos 10^{-6} s. Os resultados do período deste pêndulo estão resumidos na figura 6, que oscilou durante 80 min. O novo e melhor rolamento produziu uma queda no período de apenas 1 ms em 1 hora de oscilação, em vez dos 2 ms do caso anterior.

A abertura inicial de 2.8° terminou nos 0.3° , sendo a perda de amplitude em cada semi-oscilação de apenas 0.0049° , nos primeiros 5 minutos quando há maior velocidade. Diminuiu para 0.0009° /semi-oscilação ao fim de 1 hora. Assim, dada a semelhança nestes valores (com dois rolamentos diferentes), a perda de energia está a refletir a dominância da fricção aerodinâmica variável em $v(t)^2$ pois foram lançados com o mesmo $\theta_m(0)$.

O comportamento final será dominado pelo atrito de rolamento, de valor constante, pois a velocidade já é muito pequena e diminui a fricção aerodinâmica.

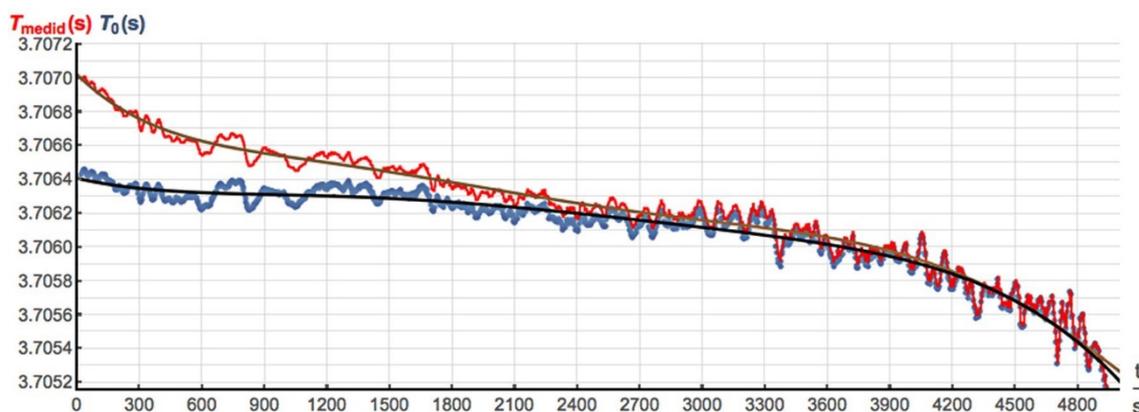


Figura 6. O segundo pêndulo: a curva a vermelho é a média móvel dos dados originais com o ajuste polinomial a castanho. Aplicando a equação (2) obtém-se a média móvel que representa $T_0(t)$ (curva azul), à qual foi ajustada um polinómio simples (curva a preto).

O comprimento total ficou em $l = 3.4136 \pm 0.0002$ m. Uma análise semelhante leva ao gráfico de $T_0(t)$, na figura 6. Daí deduz-se o valor de $g = 9.8011 \pm 0.0006$ m/s^2 que está desviado de apenas $+0.0004$ m/s^2 (0,004%) ao valor gravimétrico local [3].

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O comportamento da variação temporal do período T_p é bem caracterizado enquanto é decrescente, pois representa tanto a equação (2) assim como o aumento do tempo de oscilação associada à travagem da fricção do ar.

O movimento oscilatório com forças de atrito contrárias à velocidade, inclui tanto o cinético devido ao rolamento (de coeficiente μ_c) como à fricção aerodinâmica que é proporcional a v^2 (de coeficiente λ , num pêndulo de comprimento l). É descrita pela equação diferencial:

$$\theta''(t) + \omega^2 \theta(t) = -\text{sign}(\theta'(t)) (\mu_c + 2\lambda(l|\theta'(t)|)^2) \quad (4)$$

onde $\omega = 2\pi/T_p$. Esta equação não tem uma solução analítica pois o lado esquerdo oscila entre valores positivos e negativos em cada semi-período. Contudo pode ser resolvida numericamente. Um caso exemplificativo está na figura 7 onde foi considerado um pêndulo com $l = 3.4$ m, $\theta_m = 5^\circ$, $\mu_c = 0.00007$, $\lambda = 0.07$ e um período natural de $T_0 = 3.7$ s.

Como se observa na figura 7, a força de fricção do ar provoca um aumento do período de oscilação apenas enquanto a velocidade é suficiente para tal, perdendo-se esse efeito para oscilações de menor amplitude. Por outro lado, o atrito cinético de rolamento que é constante, torna-se dominante nesta altura e produz novamente um aumento do período. Este comportamento é contrário ao verificado nos dados obtidos. Isto pode ser (eventualmente) explicado pelo método de deteção do período: para pequenas oscilações o diâmetro do cilindro é quase tão grande quanto o comprimento da semi-oscilação, o que parece induzir erros nas medições. Tal é evidente na maior dispersão nos valores medidos para o período (ver figura 3). Por isso, esta parte da curva foi sempre ignorada na análise de dados.

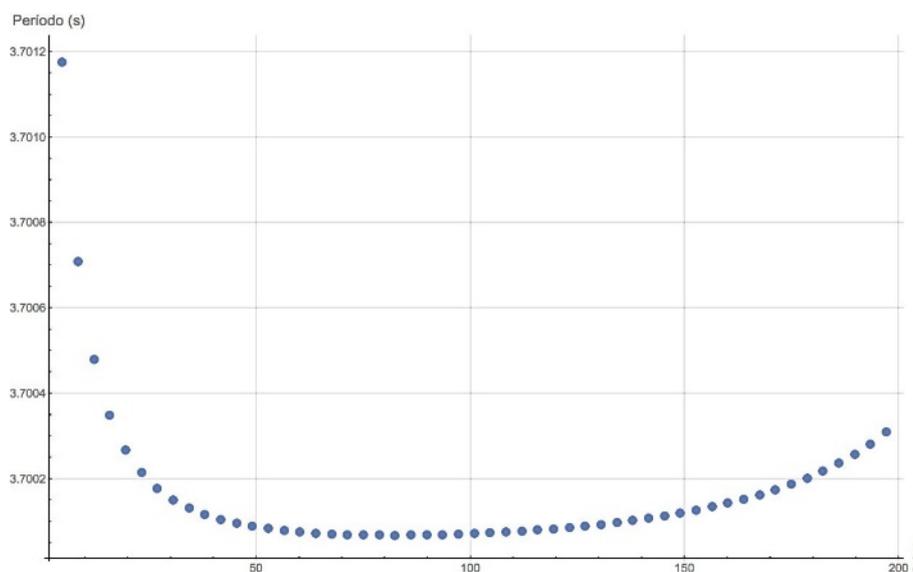


Figura 7. Variação do período (s) de oscilação, entre duas passagens consecutivas no ponto de equilíbrio.

4. CONCLUSÕES

Os cuidados experimentais tornam mais evidente que (com a precisão utilizada) é necessário recorrer à equação (2) para interpretar a variação do período com o ângulo máximo θ_m de abertura do pêndulo, em cada oscilação.

O sistema não é conservativo e o período de oscilação diminui com a amplitude do movimento. Neste caso, a equação (2) descreve apenas o termo dominante, mas é necessário incluir as forças de atrito (fricção aerodinâmica e o do rolamento) para ter a interpretação completa do fenómeno.

Este efeito também surge nos osciladores de Pohl (discos com rotação e travão eletromagnético, proporcional à velocidade) onde estas variações dificultam a escolha do correto valor do período.

Mostrou-se que é possível deduzir um valor da aceleração gravítica g de grande precisão, usando um pêndulo gravítico simples, desde que o tratamento de dados inclua a correção de θ_m e haja bons cuidados experimentais.

REFERÊNCIAS

- [1] Robert Nelson, M. G. Olsson, “The pendulum – Rich physics from a simple system”, Am. J. Physics, 54 (2), 112-121, 1986.
- [2] Claudio G. Carvalhães & Patrick Suppes, “Approximations for the period of the simple pendulum based on the arithmetic-geometric mean”, Am. J. Phys. 76 (12), pp. 1150-1154, 2008.
- [3] Carlos M. Antunes (comunicação privada, FCUL, 2013) e dados do Instituto Geográfico Português, Direção de Serviços de Geodesia, 2004.

O QUE É 1 METRO NA VIDA DE UM FOTÃO?

Fernanda Saraiva

Instituto Português da Qualidade, Rua António Gião, 2; 2829-513 CAPARICA
fsaraiva@ipq.pt

RESUMO

A 20 de Maio de 1875, é assinada em Paris a Convenção do metro, e com ela nasce o departamento internacional de pesos e medidas: o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM). Cem anos depois, em 1975, a 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM)[1], recomenda a utilização do valor de 299 792 458 m/s, para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vazio, c_0 . Considera ainda prematura uma mudança da definição do metro e só em 1983, o metro, unidade de base do SI [2], é redefinido em função da constante fundamental e exata da física, c_0 .

O fenómeno de interferência da luz utilizado como princípio de funcionamento do interferómetro (sistema óptico desenvolvido por A. Michelson) explica e realiza a medição de comprimentos, com exatidão elevada e incerteza de medição baixa. A definição atual do metro pode ser apresentada a partir da equação física que traduz o comprimento do trajeto percorrido por um corpo ($x = v \times t$). No caso da luz o corpo é o fóton.

METRO – DO ARTEFACTO À QUÂNTICA

Atualmente, o metro não é definido nem realizado a partir de um artefacto. A barra de platina iridiada com seção em X e comprimento de 1 metro, distribuída na 1ª CGPM pelos países assinantes da Convenção do metro, é agora uma peça de museu.

No final do séc. XIX iniciaram-se os primeiros estudos interferométricos que levaram a que, no início do século XX, A. Michelson (Prémio Nobel da Física em 1907) propusesse o uso da interferometria (ramo da óptica que usa o fenómeno da interferência resultante da interação entre duas ou mais ondas luminosas) para determinar o valor de grandezas físicas. Desenvolveu trabalhos no BIPM e juntamente com Benoît, determinou o comprimento do metro padrão em função do comprimento de onda da linha vermelha do espectro da lâmpada de cádmio. No entanto, apenas em 1960, graças ao envolvimento da comunidade científica na criação de novos métodos experimentais, e do conhecimento cada vez maior das estruturas atómicas e dos fenómenos físicos, surgiu, a par com a implementação do Sistema Internacional de Unidades (SI), o primeiro padrão metrológico quântico, o da realização prática do metro. Na 11.ª CGPM, foi atualizada a anterior convenção do metro passando o metro a ser igual a 1 650 763,73 comprimentos de onda, no vazio, da transição $2p_{10} - 5d_5$ dos níveis de energia atómica do isótopo de cripton 86 ($\lambda(2p_{10}, 5d_5) = 0,60578021 \text{ nm}$) [3].

A evolução tecnológica permitiu posteriormente a estabilização em frequência da radiação emitida pelos lasers o que levou à definição e à realização atual do metro.

DEFINIÇÃO ATUAL DO METRO

O BIPM, encarregado desde a sua criação de produzir os protótipos internacionais, tem atualmente, como principais atribuições: a coordenação, a realização e a melhoria dos sistemas de medição em todo o mundo, a realização de desenvolvimentos científicos e técnicos nos seus laboratórios em nome de todos os Estados Membros, a promoção da importância da metrologia em todas as vertentes, a coordenação das comparações internacionais de padrões de medição nacionais e principalmente a definição das unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) [4]. Hoje, as unidades de medida de base são sete: o metro (m), o quilograma (kg), o segundo (s), o ampere (A), o kelvin (K), a candela (cd) e a mole (mol).

O Sistema Métrico Decimal, que apenas adotou 3 unidades de medida: o metro, o litro e o quilograma, foi criado em 1789, na sequência da revolução francesa, pela Academia de Ciências de Paris, e é a origem do SI.

O metro teve já quatro definições desde a sua criação como padrão de uma das unidades de medida. Estas atualizações devem-se ao facto de que um padrão metrológico tem que ser o mais estável possível, ser reproduzível e ser realizado com a máxima exatidão possível. Hoje o metro é definido a partir de radiações eletromagnéticas (luz), tornando as medições de comprimento independentes do local e do tempo, ou seja pode ser realizado em qualquer parte do mundo com o mesmo nível de exatidão.

Para isso muito contribuiu a teoria eletromagnética e em particular as Leis de Gauss e Ampère bem como os trabalhos de Maxwell, que permitiram concluir que a radiação eletromagnética se propaga à velocidade da luz. Ao longo do século XX, com a evolução do conhecimento, foi possível medir a velocidade da luz com uma exatidão muito elevada e uma incerteza de medição muito baixa (tabela 1), levando a que a 15ª CGPM realizada em 1975, recomendasse a utilização do valor de 299 792 458 m/s, para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vazio (c_0), sendo atualmente uma das constantes fundamentais e exatas da física [5].

Em 1983, a 17ª CGPM, aproveitando o valor de c_0 e após os progressos científicos e tecnológicos obtidos na estabilização e medição da frequência emitida por lasers, adotou a definição atual do metro.

O metro é assim definido como sendo o comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vazio, durante um intervalo de tempo de $1/299\,792\,458$ do segundo [6].

Tabela 1. Valores da velocidade da luz, obtidos em função da evolução científica e tecnológica, durante o século XX.

| Ano | Cientista /técnica | Velocidade da Luz / (km/s) | Incerteza / (km/s) |
|------|--|-------------------------------|-----------------------|
| 1926 | Albert A. Michelson / espelho rotativo | 299 796 | 4 |
| 1950 | Essen e Gordon-Smith / cavidade de ressonância | 299 792,5 | 3,0 |
| 1958 | K.D. Froome / interferometria radio | 299 792,4562 | 0,10 |
| 1972 | Evenson et al./ interferometria laser | 299 792,4562 | 0,0011 |
| 1975 | 15ª CGPM, Resolução nº 2 | 299 792,458 | exata |

ESTADO DA ARTE

O Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ é a Instituição Nacional de Metrologia responsável pela realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais das unidades de medida e pela sua rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades, pela promoção e disseminação das unidades, pela rastreabilidade das medições efetuadas no território nacional, pela implementação de cadeias hierárquicas de padrões de medida, pela realização de comparações de padrões e pela garantia do rigor das medições realizadas.

Compete ao IPQ aprovar os padrões nacionais que realizam as unidades de medida legais. No que respeita ao padrão de medição nacional da unidade SI de base, **metro**, ela é realizada através de padrões altamente reproduzíveis: um sintetizador de frequências ópticas (cujas frequências ópticas com exatidão elevada, são rastreadas ao padrão nacional de tempo) e de um laser de He-Ne estabilizado com célula de iodo (em que a emissão de um feixe de luz monocromático estabilizado, de acordo com as recomendações do BIPM, permite a realização prática da sua definição).

DISSEMINAÇÃO DO METRO

A única forma de realizar medições exatas com “bons” resultados de medição é utilizando equipamentos de medição calibrados. Seria incomportável que todos os instrumentos de medição (IM) de comprimento fossem calibrados diretamente com o padrão primário de

comprimento, no entanto, todos os IM devem estar rastreados metrologicamente ao padrão nacional. Este objetivo é conseguido através de uma sequência de padrões com níveis de exatidão mais baixos e calibrações com as quais se relaciona um resultado de medição a uma referência (cadeia de rastreabilidade metrológica a uma unidade de medida) [7].

Os padrões de trabalho com exatidão mais baixa são calibrados com padrões de classes de exatidão superior, determinando-se assim os erros de medição associados aos instrumentos de medição, garantindo-se a disseminação da unidade e a universalidade das medições (tabela 2).

São exemplo de padrões de trabalho com rastreabilidade metrológica ao padrão nacional de comprimento, o interferómetro laser para medições de distâncias, os blocos padrão lineares e angulares, a régua micrométrica, os padrões de diâmetro, o autocolimador, o nível eletrónico, os padrões de defeito de forma (planeza, circularidade), os padrões de rugosidade, o microscópio de medição, o micrómetro, o paquímetro e todos os demais IM's cujas mensurandas têm como unidade de referência o metro.

Tabela 2. Exemplo de uma cadeia de rastreabilidade metrológica de comprimento

| Tipo de padrão de medição | Padrão / instrumento de medição | Método de medição |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| nacional | Sintetizador de frequências ópticas | “Reprodução” do metro |
| secundário | Lasers padrão | Batimento de frequências |
| referência | Interferómetro laser | Batimento de frequências |
| trabalho | Blocos padrão lineares | Interferometria |
| trabalho | Paquímetros, micrómetros | Comparação |

SALA DE AULAS – METROLOGIA DIMENSIONAL

O que medimos e porque medimos são as primeiras questões que devemos colocar quando pretendemos falar sobre metrologia. O que os cidadãos, os artesãos, os engenheiros ou os cientistas medem são as grandezas, definindo-se grandeza como sendo a “*propriedade dum fenómeno, dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência*” [7]. Exemplificando, pensemos num frigorífico: para o descrevermos teremos de nos referir às suas propriedades, qual a altura ou volume externo, quais os valores de temperatura, etc. A estas propriedades é possível atribuir um valor numérico, no entanto para definirmos a grandeza para além do valor quantitativo (número) há que associar a unidade de medida (referência). A tabela 3 apresenta exemplos de grandezas físicas.

Tabela 3. Terminologia e valores que caracterizam uma propriedade física.

| Grandeza | Mensuranda* | Valor numérico | Unidade de medida | Valor da mensuranda ou da grandeza |
|-------------|-----------------------|----------------|-------------------|------------------------------------|
| Comprimento | <i>Altura, h</i> | 1,7 | m | 1,7 m |
| Comprimento | <i>Comprimento, l</i> | 0,7 | m | 0,7 m |
| Volume | <i>Capacidade, V</i> | 0,8 | m ³ | 0,8 m ³ |
| Temperatura | <i>Temperatura, T</i> | 280,15 | K | 280,15 K |

* A mensuranda é a grandeza que se pretende medir.

Quanto à resposta à segunda questão, porque medimos as grandezas, Lorde Kelvin físico inglês no final do século XIX referiu “*O conhecimento é sempre incompleto enquanto não formos capazes de o medir e traduzir por números*”. Assim, no dia-a-dia, medimos para monitorizar, quando pretendemos conhecer ao longo do tempo o estado de uma propriedade, medimos para controlar quando pretendemos manter o valor duma propriedade dentro de parâmetros especificados e medimos também para investigar e avançar no caminho da ciência, quando procuramos compreender e explicar resultados de medição não espectáveis.

A medição implica a comparação de grandezas e a utilização de vários tipos de padrões e instrumentos de medição que definem as unidades e as várias escalas de medição em uso. Partindo da definição atual do metro procuremos descrever como se mede o comprimento. Em física o comprimento do trajeto (l) percorrido por um corpo, que viaje à velocidade (v), durante um intervalo de tempo (t) é dado por $l = v \times t$, se esse corpo for um fóton tem-se:

$$l_{luz} = c_0 \times 1/c_0 = 1 \text{ m}$$

Ou seja, ao lermos a equação resulta: o comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vazio durante um intervalo de tempo de ($1/c_0$) é igual a 1 metro. Com esta equação escreve-se, em linguagem matemática, a atual definição do metro (e responde-se à pergunta inicial “O que é 1 metro na vida de um fóton?”).

A realização prática do metro, como referido anteriormente é efetuada através de lasers, instrumentos que emitem luz monocromática. A luz, devido às suas características ondulatórias, produz um fenómeno chamado de interferência que corresponde à sobreposição de uma ou mais ondas num ponto, criando no espaço franjas de interferência. As ondas são caracterizadas pelo seu comprimento de onda (λ) e medir com ondas é como utilizar uma régua com divisões muito pequenas. É medir comprimento à ordem do nanometro (nm).

$$\lambda_{Luz\ vermelha} \cong 0,632 \text{ nm} \quad (1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 0,000\ 000\ 001 \text{ m})$$

A. Michelson utilizou esta propriedade da luz e construiu e desenvolveu o chamado interferómetro de espelhos (Figura 1).

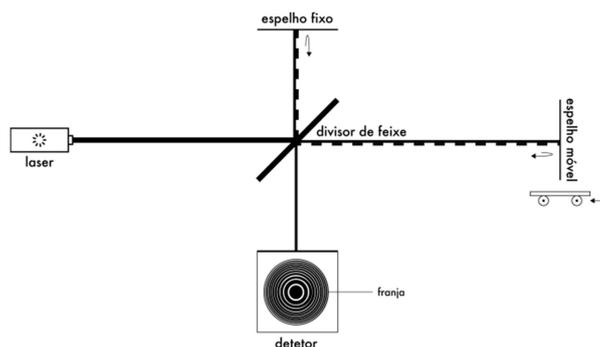


Figura 1. Esquema do interferómetro de espelhos de tipo Michelson.

Neste, o feixe de luz emitido λ_{Laser} é separado em dois e enviado para trajetos diferentes (braços do interferómetro). Após a reflexão em espelhos colocados nos topos dos braços, os feixes são recombinados, gerando-se no espaço um padrão de franjas de interferências. Se fixarmos o comprimento de um dos braços, quando o espelho de topo do outro braço se afasta numa distância de $\lambda_{Laser}/2$, cada franja desloca-se de uma inter-franja e ocupa o lugar da franja adjacente. Contando o número de franjas (n), que passam num dado ponto de referência determina-se a distância total (d) percorrida pelo espelho móvel [8].

$$d = n \times \frac{\lambda_{laser}}{2}$$

Na prática, no laboratório ou na sala de aulas, com um laser, um divisor de feixe, dois espelhos e alguns suportes mecânicos é possível montar um interferómetro e verificar que a partir do comprimento de onda da luz emitida (λ) se consegue medir comprimento. No entanto, apenas conseguirá medir comprimento com exatidão se tiver calibrado e determinado o valor do comprimento de onda emitido pelo laser, através da comparação com o valor do padrão nacional de comprimento, por batimento de frequências.

CONCLUSÃO

Atualmente a utilização de interferômetros laser, cujo feixe é rastreado metrologicamente aos padrões nacionais do metro, permite a calibração de padrões de trabalho de comprimento com exatidão elevada e incertezas de medição baixas.

REFERÊNCIAS

- [1] *Resolution 2 of the 15th CGPM (1975)*: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/15/2/>, (consultado a 6 de outubro de 2016)
- [2] Saraiva, F. ; e outros, “O laser na realização prática da definição do metro”, *Gazeta de Física*, Vol. 34, nº1; 2011
- [3] *Resolution 6 of the 11th CGPM (1960)*: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/11/6/> (consultado a 6 de outubro de 2016)
- [4] *Le Système international d’unités The International System of Units*; 8.ª edição, BIPM, 2016, disponível em: http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8.pdf
- [5] CODATA *Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants*: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c|search_for=universal_in (consultado a 6 de outubro de 2016)
- [6] *Resolution 1 of the 17th CGPM (1983)*: <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/17/1/> (consultado a 6 de outubro de 2016)
- [7] Vocabulário Internacional de Metrologia – conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM), 1ª edição Luso-Brasileira, 2012, disponível em: www.ipq.pt
- [8] Interferómetro de tipo Michelson: www.youtube.com/watch?v=j-u3IEgcTiQ (consultado a 6 de outubro de 2016).

THE ROLE OF MEASUREMENT DATA SPACING AND RANGE

M. A. Salgueiro da Silva^{1,2}, T. M. Seixas^{1,2}

¹ Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre, 687, 4169-007 Porto

² Centro de Investigação da Terra e do Espaço da Universidade de Coimbra, Av. Dr. Dias da Silva, 3000-134 Coimbra
E-mails: massilva@fc.up.pt, tmseixas@fc.up.pt

ABSTRACT

In this work, we show that measurement procedures should provide a higher density of data points in the range where errors are larger, to more effectively average out random errors and thus mitigate accuracy errors in parameter determination. Knowing the effective independent variable helps defining an adequate data spacing. Moreover, when feasible, increasing data range width is more effective than increasing the number of data points on the same data range in reducing the uncertainty in the slope of a regression line. The intercept's uncertainty is minimum when the dataset is centred at the ordinate axis.

INTRODUCTION

When conducting experiments involving the measurement of physically related quantities, choosing an appropriate spacing for the experimental independent variable is a crucial procedure whose consequences may go beyond data graphical visualization. This is particularly true if the measured quantities are nonlinearly related and experimental errors are nonuniform. Knowing the effective experimental independent variable helps defining an adequate data spacing. Measuring one physical quantity as a function of another often requires two important choices: the data range where measurements should focus and the number (n) of data points to acquire in the chosen data range. Here, we consider data range as the interval of variation of the independent variable (x) which is associated with a given interval of variation of the dependent variable (y). Regarding data fitting, it is generally accepted that increasing the number of data points helps improving parameter estimation by reducing the associated uncertainties. In the following, we particularize the discussion to the role of the width and lower endpoint of data range on parameter estimation by linear regression. Since successful measurement methodologies require a good understanding of factors ruling data analysis, it is pedagogically justified and highly recommended to teach these two subjects alongside.

THE ROLE OF MEASUREMENT DATA SPACING

To illustrate the problem [1], we will consider in the following the example of the distance (d) inverse square law dependence of the intensity (I) of a point light source: $I = k/d^2$, where k is a constant. This is an iconic physics experiment which is part of many introductory physics laboratory courses. The inverse square law can be linearized by taking d^{-2} as the effective independent variable, which allows the application of linear regression [2] for the determination of constant k . To ensure controllable and reproducible data, the analysis will be based on numerically simulated data. Knowing the true value of k a priori is important to compare with calculated values, which could not be assured by experimental data. Most laboratory protocols of the experiment specify measuring I at regularly spaced source-detector distances d , which translates into a pronounced nonuniform spacing in d^{-2} and I . This is visible in Figure 1(a) as the accumulation of data points close to the origin of the graph of I vs d^{-2} , corresponding to high values of d , and a lower density of data points in the graph region corresponding to low values of d .

We notice that it is the independent variable after linearization d^{-2} and not d that should be uniformly spaced. Let d_{min} and d_{max} be, respectively, the minimum and maximum values of d

measurement range. The corresponding lower and upper limits of d^{-2} are, respectively, $a = 1/d_{max}^2$ and $b = 1/d_{min}^2$. For an n points $\{(d_i, I_i); i = 1, \dots, n\}$ dataset, equally spaced d^{-2} values can be obtained by $d_i^{-2} = b - (i - 1)\Delta(d^{-2})$, where $\Delta(d^{-2}) \equiv (b - a)/(n - 1)$ is the corresponding spacing. A uniform spacing in d^{-2} is then obtained (see Figure 1(b)) if I is measured at d values given by $d_i = 1/\sqrt{b - (i - 1)(b - a)/(n - 1)}$.

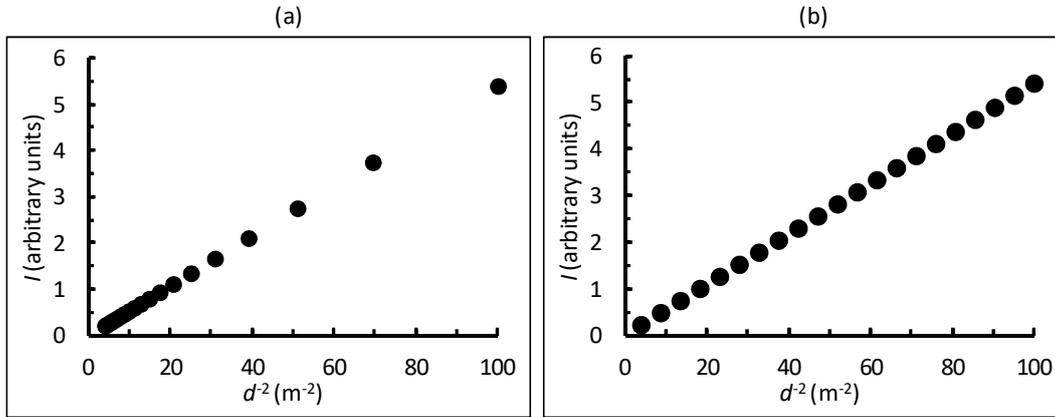


Figure 1. Simulated variation of the error-free intensity of a point light source with inverse square distance for uniform spacing in d (a) and in d^{-2} (b).

Here our main focus is to ascertain to what extent data spacing may affect the determination of model parameter k . This requires the exclusion, besides linearization schemes based on a nonlinear transformation of I , of any other factor that may also produce concurrent effects on final results. For this purpose, linear fits to simulated data will be made by unweighted linear regression (ULR) in detriment of weighted linear regression (WLR), which is specially recommended for data with a nonuniform error distribution. In fact, by attributing lower statistical weights to data points having larger (absolute) error bars [2-3], WLR can compensate, at least partially, for deficient error averaging resulting from a bad data spacing choice, thus masking the effect of data spacing. Using WLR has also some drawbacks that should not be underestimated. First, in introductory laboratories, ULR is still the standard for linear data fittings and general-purpose data analysis software as Microsoft Excel provide no built-in tools for WLR. Second, WLR assumes that the error distribution in the dependent variable is known, which is often barely justified prior to the calculations [3].

Results of repeated simulations show that when random errors in I have a constant standard deviation (σ_I) there is no advantage in using uniform spacing in d^{-2} instead of uniform spacing in d . In practice, however, light intensity measurements may be affected by source-detector misalignment errors. This type of error in I is larger at close source-detector distances and decreases with increasing distance. For simplicity, we assume that the associated relative error bar in I (σ_I/I) is independent of I , though any other type of error bar dependence on I is acceptable, as long as it ensures that σ_I is an increasing function of I . In Figure 2, we show statistically representative results of linear regression of I vs d^{-2} for uniform d (dataset A) and d^{-2} (dataset B) spacings, considering intensity data calculated with $k = 5.4 \times 10^{-2}$ (arbitrary units) and affected by normally distributed (gaussian) random errors with a 5% relative error bar ($\sigma_I = 0.05I$) [4].

An interesting observation is that, despite both datasets have been generated with the same relative error bar, data scatter is clearly more pronounced in the graph of dataset B. This is not surprising since this dataset has a greater density of data points in the region where random errors are larger. Indeed, in the range $0.05 \text{ m} \leq d \leq 0.10 \text{ m}$ ($100 \text{ m}^{-2} \leq d^{-2} \leq 400 \text{ m}^{-2}$), dataset A has only 2 data points compared to 17 data points of dataset B. The standard deviations of the parameters of the I vs d^{-2} regression line of dataset A are also smaller than

those of dataset B. In face of these results, we may ask what advantage, if any, has dataset B compared to dataset A. To answer this question, we note that the slope $((5.59 \pm 0.01) \times 10^{-2})$ of the regression line of dataset A differs appreciably from its expected value ($k = 5.40 \times 10^{-2}$) in the absence of errors. The observed difference (1.9×10^{-3}) is approximately 20 times larger than the slope standard deviation, which means that the determination of k from dataset A leads to a statistically significant accuracy error. In contrast, the difference (4×10^{-4}) between the slope of dataset B regression line and its expected value is not only smaller than the difference observed for dataset A, but also smaller than its associated uncertainty (8×10^{-4}). The intercept of dataset B is larger than that of dataset A but, unlike the latter, can be considered 0 within its uncertainty.

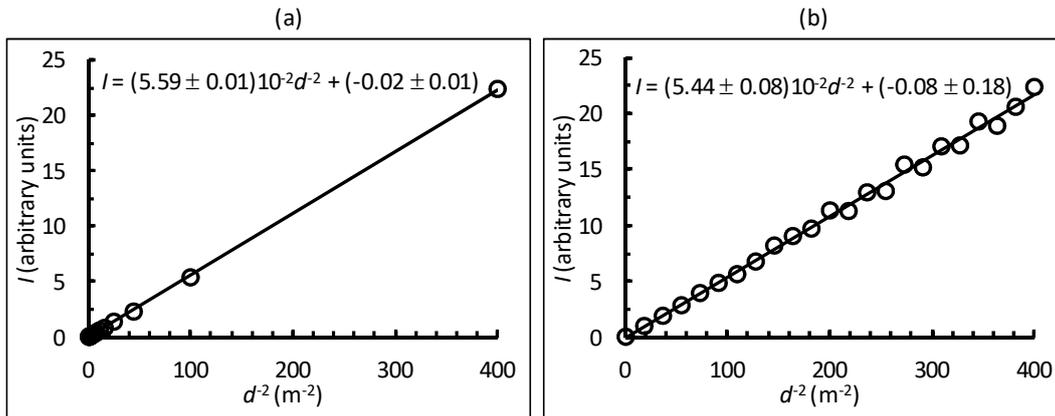


Figure 2. Simulated variation of the intensity of a point light source with inverse square distance for uniform spacing in d (a) and in d^{-2} (b). Both datasets include 23 points in the range $0.05 \text{ m} \leq d \leq 1.15 \text{ m}$. Regression line parameters and corresponding standard deviations are given in the top legends.

Therefore, due to a higher density of data points in the range where experimental errors are larger, measuring light intensity with uniform spacing in d^{-2} is more effective in averaging out random errors and reducing residual accuracy errors in parameter determination than with uniform spacing in d . This conclusion can be generalized to other linearization cases of data presenting nonuniform experimental error bars and for which the spacing of the effective independent variable can be adjusted to maximize error averaging. If necessary, we can get additional averaging of random errors through WLR [2-3]. We notice that these conclusions also apply to cases where direct nonlinear fitting to raw experimental data [5-6] is performed in alternative to linear regression on linearized data. This supports the general idea that it is always better to extract information from simple analysis of adequately measured data than from complex analysis of poorly measured data.

THE ROLE OF MEASUREMENT DATA RANGE

To isolate the effects of data range from the concurrent effects of data point distribution and error bar variation, we will consider uniformly distributed data exhibiting a uniform error bar in the dependent variable. Such restrictions are, actually, crucial for an analytic treatment of the problem. Let us assume that the two measured quantities (x, y) are linearly related by $y = ax + b$, where a and b are model parameters to be determined from experimental data. If errors in y have a random gaussian distribution with constant standard deviation (σ_y) and errors in x are negligible, we can estimate parameters a and b by applying ULR [7-9] to an experimental dataset $\{(x_i, y_i); i = 0, 1, \dots, n - 1\}$. To render the problem analytically tractable, we will assume in the following that this dataset is uniformly spaced in x , e. g., $x_i = x_0 + i \cdot h$, where h is the corresponding spacing. Accordingly [7-9], the estimates for a and b are given, respectively, by

$$a = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\Delta} \quad (1a)$$

$$b = \frac{\langle x^2 \rangle \langle y \rangle - \langle x \rangle \langle xy \rangle}{\Delta} \quad (1b)$$

where $\Delta \equiv \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$ and $\langle \dots \rangle$ stands for average value. The standard deviations in a (σ_a) and b (σ_b) can also be estimated [7-9]:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\bar{y}}}{\sqrt{\Delta}} \quad (1c)$$

$$\sigma_b = \sigma_{\bar{y}} \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle}{\Delta}} \quad (1d)$$

where $\sigma_{\bar{y}} \equiv \sigma_y / \sqrt{n}$ is the standard deviation of the mean of y , $\bar{y} \equiv \langle y \rangle$. In case σ_y is unknown a priori, it can be approximated by the standard deviation of the experimental points with respect to the regression line [7-9]. Expressing equations (1c-d) in terms of n , x_0 , and h , we have:

$$\sigma_a = \frac{2\sqrt{3}\sigma_y}{h\sqrt{n^3-n}} \quad (2a)$$

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{2(2n-1)}{n(n+1)} + \frac{12}{n(n+1)} \left(\frac{x_0}{h}\right) + \frac{12}{n(n-1)(n+1)} \left(\frac{x_0}{h}\right)^2} \quad (2b)$$

It is clear from (2a-b) that only σ_b depends on x_0 . Moreover, for fixed h and large n , σ_a decreases faster with n than σ_b : $\sigma_a \sim n^{-3/2}$; $\sigma_b \sim n^{-1/2}$. This means that, under these assumptions, to decrease σ_a by a factor of 10 we need to increase the number of data points by a factor of about 5. To get a similar reduction in σ_b , however, n must be increased by a factor of 100. Substituting the relation $h = w/(n-1)$ in equations (2a-b), we can highlight explicitly the dependences of σ_a and σ_b on n , x_0 and w :

$$\sigma_a = \frac{2\sqrt{3}\sigma_y}{w\sqrt{\frac{n(n+1)}{n-1}}} \quad (3a)$$

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{2(2n-1)}{n(n+1)} + 12 \left(\frac{n-1}{n+1}\right) \left[\left(\frac{x_0}{w}\right)^2 + \frac{x_0}{w}\right]} \quad (3b)$$

It can be seen from (3a) that, for large n , σ_a has a more pronounced dependence on data range width ($\sigma_a \sim w^{-1}$) than on the number of data points ($\sigma_a \sim n^{-1/2}$). In fact, increasing w by a factor of f is equivalent to increasing n by a factor of f^2 . This means that increasing w with n fixed is more effective than increasing n with w fixed in reducing the uncertainty in a . Regarding the dependence of σ_b on data range, according to (3b), it has a non monotonic variation with the ratio x_0/w , reaching its minimum value $\sigma_{b,min} = \sigma_{\bar{y}}$ for $x_0 = -w/2$. This optimum ratio corresponds to a dataset centred at $x = 0$, for which the intercept (b) of the fitted line matches exactly the ordinate of its centroid, i. e., $b = \langle y \rangle \equiv \bar{y}$. It makes sense conceptually that the smallest uncertainty in the intercept occurs when data straddles y -axis, because the uncertainty in the slope makes values at the limits of data range less certain than at points near the centroid, which in this case would lie on y -axis. Since σ_b is an increasing function of $|x_0/w + 1/2|$, a bad choice of x_0/w may result in such a large value of σ_b that its reduction may require a comparatively high number of data points. Therefore, not only the width but also the origin of the measurement data range is crucial for a satisfactory estimation of regression line parameters.

The preceding analysis has shown that increasing data range width is more effective than increasing the number of data points on the same data range in reducing the uncertainty in the slope of a regression line. This is valid as long as σ_y remains unaltered. In practice, however, increasing w may imply changing the measuring scale of y to one with a larger full-scale reading. As often occurs with digital meters featuring the same number of digits across several measuring scales [10], such y upscaling might be accompanied by a proportionally larger value of σ_y , which would mask the increase in w , so that σ_a would remain roughly the same. Therefore, in most situations, increasing the width of measurement data range should be

constrained to limits compatible with the same y measuring scale. The uncertainty in the intercept of the regression line depends on n and also on the ratio x_0/w , reaching its minimum value $\sigma_{b,min} = \sigma_{\bar{y}}$ for $x_0/w = -1/2$. Because, for this particular value of x_0/w , the dataset is centred at $x = 0$, i. e., $\langle x \rangle = 0$, the covariance of the regression line parameters vanishes [11], $cov(a, b) = -\sigma_a^2 \langle x \rangle = 0$. This simplifies considerably the estimation of the uncertainty in any quantity depending on both a and b [12]. Such variation of σ_b with x_0/w resembles the dependence of the confidence interval for y estimates on the distance $|x - \langle x \rangle|$ [13]. Setting x_0 close to its optimum value $-w/2$, although desirable, may be impossible in some cases, particularly if x is a positive quantity by definition. In any case, however, setting x_0/w to ensure the lowest possible value of $|x_0/w + 1/2|$ contributes, as increasing n , to reduce σ_b .

CONCLUSIONS

In this work, we have shown that, provided the effective independent variable can be appropriately defined, measurement data spacing can be adjusted to ensure a higher density of data points in the range where experimental errors are larger. This procedure is often more effective in averaging out random errors and reducing residual accuracy errors in parameter determination than with uniform spacing in raw data. On the other hand, increasing data range width is more effective than increasing the number of data points on the same data range in reducing the uncertainty in the slope of a regression line. Moreover, the uncertainty in the intercept of a regression line depends not only on the number of data points but also on the ratio between the lower endpoint and the width of the measurement data range, reaching its minimum when the dataset is centred at the ordinate axis.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is financed by FCT through UID/Multi/00611/2013.

REFERENCES

- [1] Seixas, T. M. and Salgueiro da Silva, M. A.: The Importance of Measurement Data Spacing Phys. Teach. **53** 356-7, 2015.
- [2] Berendsen, H. J.: A student's guide to data and error analysis, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 87-92, 2011.
- [3] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P.: Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Cambridge, 2nd ed, pp. 504-506, 1992.
- [4] Billo, E. J.: Excel for Scientists and Engineers: Numerical Methods, Wiley, 2007.
- [5] Rupright, M. E.: Measuring systematic error with curve fits, Phys. Teach. **49**, 54–55 (Jan. 2011).
- [6] McCall, R. P.: More on Systematic Error in a Boyle's Law Experiment, Phys. Teach. **50**, 22-23 (Jan. 2012).
- [7] Taylor, J. R.: An Introduction to Error Analysis 2nd ed. (University Science Books), pp. 182-8, 1997.
- [8] Bevington, P. R., and Robinson D. K.: Data reduction and error analysis 3rd ed. (McGraw-Hill Higher Education, New York), pp. 104-10, 2003.
- [9] Kirkup L.: Data Analysis with Excel: An Introduction for Physical Scientists (Cambridge University Press), pp. 217-26, 2002.
- [10] Rabinovich, S. G.: Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice, 3rd ed. (Springer), pp. 36-47, 2005.
- [11] Berendsen, H. J.: A student's Guide to Data and Error Analysis (Cambridge University Press, Cambridge), p. 89, 2011.
- [12] See [9] pp. 232-3.

[13] See [9] pp. 233-5.

DETERMINACIÓN DEL ESTADO DE CARGA DE LAS BATERÍAS DE AUTOMOCIÓN: UNA PRÁCTICA DE LABORATORIO CON BATERÍA DE PLOMO-ÁCIDO.

Ana Gayol¹, Verónica Tricio²

¹ Departamento de Física Aplicada, Universidad de Vigo, Lagoas-Marcosende s/n, 36310 Vigo, España.

E-mail: anagayol@uvigo.es

² Departamento de Física, Universidad de Burgos, Plaza de Misael Bañuelos s/n, 09001 Burgos, España.

E-mail: vtricio@ubu.es

RESUMEN

Es enorme el interés científico y tecnológico de las baterías como elementos de acumulación y aplicaciones de energía eléctrica. En la actualidad, resulta imprescindible encontrar nuevas baterías con mejores prestaciones técnicas y ambientales, aunque las baterías de plomo ácido tienen todavía mucho recorrido en el tiempo y se siguen utilizando en muchos vehículos de automoción. Con objeto de favorecer el aprendizaje de los estudiantes y utilizando resultados experimentales de investigaciones realizadas por una de las autoras, se preparó una práctica de laboratorio para el nivel de grado en ciencias o en ingenierías. Los objetivos didácticos fueron el análisis del comportamiento de las baterías de plomo-ácido y la determinación del estado de carga como uno de los parámetros físicos que las caracterizan.

1. INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, las baterías han motivado un enorme interés científico y tecnológico como elementos de acumulación y aplicaciones de energía eléctrica. En la actualidad, hay necesidad de reducir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera y de desarrollar tecnologías para promover el desarrollo sostenible. Si bien resulta pues imprescindible encontrar nuevas baterías con mejores prestaciones técnicas y ambientales, las baterías de plomo ácido tienen todavía mucho recorrido en el tiempo y se siguen utilizando en muchos vehículos de automoción. Como refuerzo a su conocimiento y al aprendizaje de los estudiantes, se presenta una práctica de laboratorio con estas baterías de plomo ácido para desarrollar en grados de ciencias y de ingeniería.

La batería es un dispositivo de almacenaje de energía en forma de energía química. Su finalidad es la transformación de energía química en energía eléctrica. Están formadas por dos electrodos que son el ánodo o electrodo negativo y el cátodo o electrodo positivo, los cuales previamente han sido separados y se introducen en una disolución también denominada electrolito [1].

La batería está formada por celdas electroquímicas que pueden estar en serie o en paralelo. Por lo tanto, tanto el potencial total, como la intensidad de corriente de la batería se calculan mediante ecuaciones diferentes, que se muestran en la Tabla 1 (ecuaciones 1-2).

Tabla 1. Potencial e intensidad en función de la conexión.

| Conexión | Potencial | Intensidad | Ecuaciones |
|----------|------------------------|------------------------|------------|
| Serie | $V = \sum_{i=1}^n V_n$ | $I = I_n$ | 1 |
| Paralelo | $V = V_n$ | $I = \sum_{i=1}^n I_n$ | 2 |

Los orígenes de la batería de plomo ácido datan del siglo XIX, cuando Volta creó una batería de plata y zinc, utilizando ácido sulfúrico como electrolito. Posteriormente Planté creó la batería de plomo ácido (Figura 1) que se trata en este trabajo, y que aún se utiliza actualmente sobre todo en el automóvil. En función de la colocación de las celdas, en serie da lugar a una batería monopolar [2] y en paralelo a una batería bipolar [3].



Figura 1. Esquema de una batería de plomo ácido [4].

La batería de plomo ácido, presenta las siguientes características:

- Bajo costo.
- Capacidades para alta o baja intensidad de corriente a temperatura ambiente.
- Ciclo de vida largo.
- Potencial alto, concretamente 2.04 V/celda.
- La descarga se realiza a altos valores de intensidad.
- El potencial de las baterías comerciales oscila entre 6-12 V.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se describen diversos apartados de las experiencias preparadas para ser realizadas durante la práctica de laboratorio y una secuencia de actividades que se propone resolver a los alumnos. Como materiales didácticos para el desarrollo de la práctica, se han utilizado resultados experimentales de investigaciones realizadas por una de las autoras [5].

2.1 EQUIPOS Y SENSOR DE PLATINO

Para la realización del estudio experimental del potencial de las baterías de plomo ácido se utiliza un sensor [6] de platino de alta pureza y metacrilato que se muestra en la Figura 2, que ha sido diseñado en la Universidad de Vigo.

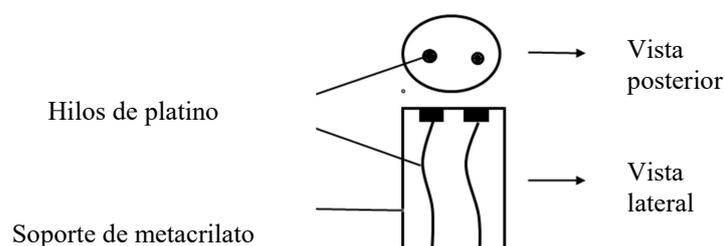


Figura 2. Esquema del sensor de platino.

Para la realización de las medidas, conjuntamente con el sensor de platino, es necesario utilizar diversos equipos, que son el conductivímetro (CRISON, [7]), densímetro (ANTON-PAAR DMA 35 [8]), refractómetro (ABBEMAT MW [8]) y multímetro (amperímetro – voltímetro (VC99LCD [9]), que se muestran en la Figura 3.



Figura 3. Imágenes de los instrumentos utilizados.

Actividad 1. a) En el sensor de platino, dar una justificación razonada de por qué se usan hilos de platino. b) ¿qué función tiene el soporte de metacrilato?. c) Describir el fundamento físico de los instrumentos de medida que se van a utilizar en la experiencia. d) Indicar las magnitudes y unidades que miden dichos instrumentos.

2.2. PROCESOS DE CARGA Y DESCARGA

Si se estudian las semireacciones globales de la Tabla 2, Pb, PbSO₄ y PbO₂ son sólidos. Por tanto, se encontraron dos procesos carga y descarga de la batería utilizada en la práctica, según las reacciones que se muestran en dicha tabla, puede presentarse un proceso de carga (1.3-1.5) según la concentración de la disolución, ya que cuando se consume el agua presente se libera ácido sulfúrico. Sin embargo, en el proceso de descarga (1.6-1.8) hay una dilución donde se presenta la reacción opuesta. Por lo cual, según las semireacciones se observa las relaciones de las propiedades del electrolito con el estado de carga de que se mide en los electrodos de la celda.

Tabla 2. Reacciones sin ajustar de los procesos de carga y descarga [10].

| Carga | | Ecuaciones |
|------------------|--|-------------------|
| Ánodo (+): | $Pb^{+2} \longrightarrow Pb^{+4}$ | 3 |
| Cátodo (-): | $Pb^{+2} \longrightarrow Pb^0$ | 4 |
| REACCIÓN GLOBAL: | $Pb^{+2} \longrightarrow Pb^0 + Pb^{+4}$ | 5 |
| Descarga | | Ecuaciones |
| Ánodo (-): | $Pb^{+2} + SO_4^{2-} \longrightarrow Pb^{+2-}$ | 6 |
| Cátodo (+): | $Pb^{+4} \longrightarrow Pb^{+2}$ | 7 |
| REACCIÓN GLOBAL: | $Pb^0 + Pb^{+4} \longrightarrow Pb^{+2}$ | 8 |

Actividad 2. a) Ajustar las reacciones de carga y descarga que se producen en el ánodo y en el cátodo. b) Utilizar los datos de la Tabla 2 para obtener las semireacciones globales.

2.3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS Y CALIBRADO DEL SENSOR

Para proceder a la realización práctica de este experimento, hay que hacer alguna tarea previa. Para la preparación de las muestras es necesario ácido sulfúrico (en nuestro caso 95% Sigma-Aldrich), con el cual se preparan las disoluciones de medida. Para su preparación, siempre se toma primero el agua y se adiciona el ácido sulfúrico, porque es una reacción exotérmica. También es necesario cloruro potásico anhidro (99% Fluka), para preparar una disolución 1 M de KCl.

Actividad 3. a) Preparar diferentes disoluciones de ácido sulfúrico de distintas concentraciones en peso en el rango de 0% al 40%, cada 5%. b) ¿qué significa que la reacción es exotérmica?. c) Explicar razonadamente cómo se ha obtenido una disolución 1 M de KCl. d) Justificar la necesidad de hacer esta operación de calibrado del sensor. e) Calibrar el sensor y encontrar el valor de la constante de celda.

3. MEDICIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han realizado medidas de conductividad para disoluciones de ácido sulfúrico a diferentes concentraciones y para distintas temperaturas de cada una de ellas (en el intervalo entre 20 y 40 °C), ya que en función de estos dos parámetros varían los valores de algunas propiedades de la disolución como son el índice de refracción, la densidad y la conductividad.

Según datos de valores de densidad del ácido sulfúrico de la batería de plomo [11], se puede conocer el estado de carga, como muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Relación entre la densidad del H_2SO_4 ($g \cdot cm^{-3}$) y el estado de carga de la batería.

| Estado de carga | Densidad H_2SO_4 ($g \cdot cm^{-3}$) |
|---------------------------|--|
| Cargada | 1.25-1.30 |
| Semicargada | 1.20-1.24 |
| Carga deficiente | 1.12-1.19 |
| Profundamente desecargada | <1.12 |

Actividad 4. a) Realizar experimentalmente las mediciones de conductividad de cada disolución para las temperaturas fijadas. b) Representar los valores de conductividad frente a la concentración de H_2SO_4 . c) Definir el estado de carga de la batería en relación con la concentración de iones. d) Dar los valores de las magnitudes medidas: densidad, potencial eléctrico e intensidad de corriente. e) Calcula la impedancia para los distintos estados de carga.

3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En base a los resultados obtenidos en el laboratorio, se observa la presencia de un máximo de conductividad, a una concentración del 20% en peso de H_2SO_4 y posteriormente disminuye, según muestra la Figura 4.

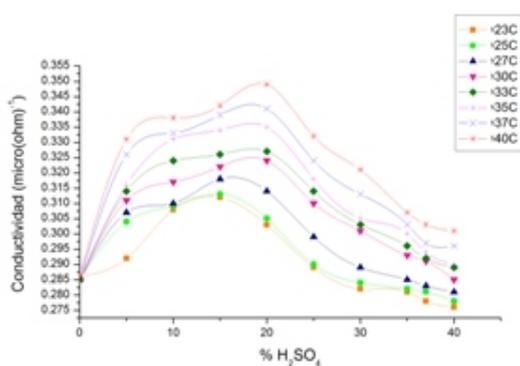


Figura 4. Conductividad a distintas temperaturas.

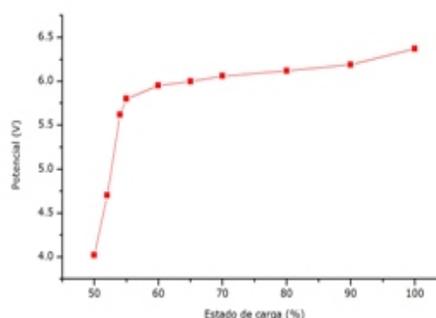


Figura 5. Potencial frente al estado de carga.

Para facilitar a los estudiantes la interpretación de los resultados, se muestran algunas gráficas con valores experimentales a temperatura ambiente encontrados; en concreto las del potencial (V) y la impedancia ($\Omega \cdot cm^2$) eléctricos en función del % estado de carga (Figuras 5 y 6) y la de intensidad de corriente (I) en función del tiempo (s) (Figura 7).

Actividad 5. a) Analizar las curvas de la Figura 4 e interpretar el significado físico para los valores máximos que se observan. b) Dar una interpretación cualitativa de los resultados que se

aportan en las Figuras 5, 6 y 7. c) Comparar los valores experimentales de V, Z encontrados en nuestra experiencia con los de las Figuras 5, 6 y 7.

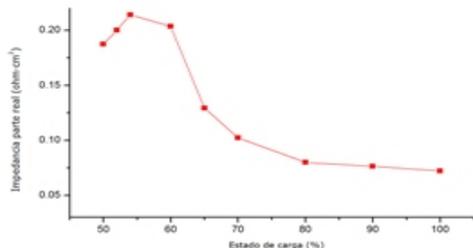


Figura 6. Impedancia frente al estado de carga.

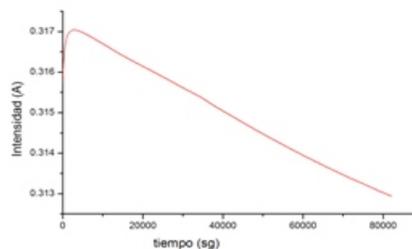


Figura 7. Intensidad frente al tiempo.

3.2. PARÁMETROS DE AJUSTE

El comportamiento que muestra la Figura 4 es semejante a la campana de Gauss para cada una de las curvas representadas. Dichas curvas se ajustan mediante la ecuación de la curva gaussiana [5,6], ecuación 9

$$y = y_0 + \frac{A}{w \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \exp\left(-2 \cdot \frac{(x-x_c)^2}{w^2}\right)} \quad (9)$$

Siendo A: área bajo el pico de la curva de Gauss; w = ancho de la curva a la mitad del máximo; x_c = centro del pico de la curva de Gauss; x = % H_2SO_4 al que se realiza el cálculo; y = cálculo de la línea base compensada, y_0 = es el desplazamiento de la línea base. En la Tabla 4 se muestran los parámetros obtenidos en las investigaciones precedentes para el estado de carga de 70%.

Tabla 4. Parámetros de ajuste de curva gaussiana de la conductividad, a distintas temperaturas.

| Temperatura (°C) | y_0 | A | w | x_c |
|------------------|--------|---------|--------|--------|
| 23 | 0.2775 | 0.70548 | 16.179 | 13.419 |
| 25 | 0.2797 | 0.6886 | 16.098 | 13.232 |
| 27 | 0.2806 | 0.845 | 17.94 | 14.836 |
| 30 | 0.2812 | 1.144 | 21.222 | 16.735 |
| 33 | 0.2843 | 1.1454 | 20.279 | 16.573 |
| 35 | 0.2876 | 1.1601 | 18.562 | 16.462 |
| 37 | 0.2858 | 1.5019 | 21.527 | 17.156 |
| 40 | 0.2795 | 2.1147 | 24.964 | 18.174 |

También se obtiene una relación entre el estado de carga de las baterías de plomo y la del potencial (Figura 5) y la intensidad frente al tiempo (Figura 6). Cuya relación se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Relación entre estado de carga de la batería (%), potencial (V) e intensidad (A).

| Estado de carga (%) | Potencial (V) | Intensidad (A) |
|---------------------|---------------|----------------|
| 100 | 6.37 | 8.0 |
| 90 | 6.19 | 7.2 |
| 80 | 6.12 | 6.4 |
| 70 | 6.06 | 5.6 |
| 65 | 6.00 | 5.2 |
| 60 | 5.95 | 4.8 |

| | | |
|----|------|-----|
| 55 | 5.80 | 4.4 |
| 54 | 5.62 | 4.3 |
| 52 | 4.70 | 4.2 |
| 50 | 4.02 | 4.0 |

Se resalta en particular que el potencial de la batería es independiente del estado de carga, hasta que este toma un valor próximo al 60%, posteriormente se modifica, ya que como se observa en la Tabla 5, el potencial varía muy poco en el rango 100%-60% del estado de carga.

Actividad 6. a) Utilizar la ecuación 9 para realizar el ajuste de una de las curvas experimentales obtenidas (esta actividad es para alumnos aventajados). b) Utilizando los datos obtener los parámetros de la Tabla 4 conductividad para los estados de carga 7.5%, 22.5%, 37.5% a las temperaturas de 25°C, 30°C y 35°C e interpolar los valores de la conductividad para dichos estados. c) Finalmente, utilizando los datos de la Tabla 5 obtenidos en experiencias precedentes, calcular la impedancia de cada estado de carga a temperatura ambiente. d) Comparar dichos valores con los de la Figura 6 e interpretar esos valores.

A modo de conclusiones, se desea indicar que la práctica de laboratorio planteada con este conjunto de experiencias y actividades secuenciales permiten mejorar el aprendizaje de las baterías de plomo-ácido para los alumnos del grado de ingeniería, mediante la determinación de su estado de carga como parámetro característico de la batería y el análisis de su comportamiento.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan su más sincero agradecimiento a Dr. Jorge Marcos Acevedo, Profesor del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Vigo.

REFERENCIAS

- [1] Serway, Raymond A., Jewett, John W., Física para ciencias e ingeniería, Mexico, D.F. Cengage Learning, 2014.
- [2] Kathryn R. Bullock. J. Electrochem. Soc., 35 (3) 1726-1731, 1995.
- [3] D.A.Rand, R.Woods, R.M.Dell, Batteries for electric vehicles, Reseach Studies Press Ltd, cap.5, 1998.
- [4] <http://subestacionesdedistribucion.blogspot.com.es> (consultado el 20 de septiembre de 2016)
- [5] Gayol, Ana, Determinación del estado de carga de las baterías de plomo ácido, Editorial Académica Española, 2011.
- [6] Gayol, Ana, Marcos, Jorge, Nóvoa, X. Ramón, Peñalver, Carlos M., Pérez, M. Consuelo, The 18th International Electric Vehicle Symposium, "Resistivity measurements in lead-acid battery", 136, Berlin (Germany), Octubre, 2001.
- [7] <http://www.crisoninstruments.com> (consultado el 20 de septiembre de 2016)
- [8] www.anton-paar.com (consultado el 20 de septiembre de 2016)
- [9] www.aliexpress.com (consultado el 20 de septiembre de 2016)
- [10] Murugan, K., Vanmathi, G., Rangarajan, S.K., J. Electrochem. Soc. 142 (6) 1770-1776, 1995.
- [11] http://www.emporibat.com.ar/preguntas_frecuentes.htm (consultado el 20 de septiembre de 2016)

INVESTIGADORAS EN LA LUZ Y EN LAS TECNOLOGÍAS BASADAS EN LA LUZ

Ana J. López¹, María del Mar Sánchez-López², Augusto Beléndez³, Pascuala García-Martínez⁴

¹ Escola Politécnica Superior, Universidade da Coruña, 15471 Ferrol, Spain

E-mail: ana.xesus.lopez@udc.es

² Instituto de Bioingeniería, Universidad Miguel Hernández, 03202 Elche, Spain

E-mail: mar.sanchez@umh.es

³ Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, 03080 San Vicent del Raspeig, Spain

E-mail: a.belendez@ua.es

⁴ Facultat de Física, Universitat de València, 46100 Burjassot, Spain

E-mail: pascuala.garcia@uv.es

RESUMEN

El año 2015 fue declarado por la ONU Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz. Varias personas del Grupo Especializado de Mujeres en Física de la Real Sociedad Española de Física y a la Sociedad Española de Óptica llevamos a cabo el proyecto “Investigadoras en la luz y las tecnologías basadas en la luz” dentro del cual se han desarrollado una serie de actividades con el objetivo de visibilizar a mujeres investigadoras que han realizado su labor en estos campos y cuya contribución científica es poco o nada conocida. En este trabajo presentamos nuestra experiencia y resultados de esta iniciativa singular, tanto a nivel nacional como internacional por tratar temas de género en la ciencia.

INTRODUCCIÓN

Entre los días 4 y 6 del pasado mes de febrero tuvo lugar en la ciudad de Mérida, (México) la clausura oficial del Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías basadas en la Luz [1]. Se ponía de este modo punto final a un año intenso durante el cual se llevaron a cabo, a lo largo y ancho del planeta, infinidad de actividades para poner de manifiesto el papel fundamental que desempeñan la luz y sus tecnologías en todas las actividades humanas. Basta mirar a nuestro alrededor para comprobar que los avances científicos en este campo y las numerosas aplicaciones de la luz han revolucionado nuestra sociedad a través de la ingeniería, la medicina, las comunicaciones o la energía; pero también la astronomía o la arquitectura así como la cultura, el arte o el ocio.

De entre los objetivos que la Asamblea General de las Naciones Unidas perseguía al declarar 2015 Año Internacional de la Luz queremos destacar dos: el de “promocionar el empoderamiento de la mujer en la ciencia” y “fomentar vocaciones científicas en el ámbito de la luz y de sus aplicaciones”. Estas fueron las dos motivaciones que nos guiaron a un grupo de personas pertenecientes al Grupo de Mujeres en Física de la Real Sociedad Española de Física (RSEF) y a la Sociedad Española de Óptica (SEDOPTICA) para poner en marcha una iniciativa que permitiese visibilizar a aquellas mujeres que con sus investigaciones hayan contribuido significativamente al avance científico y/o tecnológico en ámbitos relacionados con la luz. Esta iniciativa se materializó en el proyecto “Investigadoras en la luz y las tecnologías basadas en la luz” coordinado por la profesora de la Universidad de Valencia, Pascuala García Martínez.

En el día a día de nuestra labor como docentes en distintas universidades españolas, así como en nuestro trabajo de investigación en temas relacionados con la luz, percibimos la gran brecha de género que aún persiste en la universidad en general y, de manera particular y muy acusada, en las titulaciones científico-tecnológicas. Esta brecha de género se manifiesta, entre otras cosas, en los bajos porcentajes de chicas que optan por seguir estudios de ingeniería o de las llamadas “ciencias duras” [2-5]. Son muchas y complejas las causas de esta situación, en las que intervienen variables tanto personales como socioculturales [6-8], pero entre ellas se apunta a la falta de referentes femeninos en ciencia y tecnología que favorece la persistencia de estereotipos

a la hora de elegir carrera; numerosos estudios concluyen que la ausencia de mujeres en los libros de texto en primaria y secundaria, contribuye a reforzar esta situación [9-11].

Consideramos por tanto necesario llevar a cabo una labor de visibilización de las mujeres científicas para crear referentes femeninos en los que puedan apoyarse las jóvenes y que, de alguna manera, ayude a corregir esta deficiencia en los distintos niveles educativos; pero también para hacer justicia a esas mujeres brillantes y valientes que nos abrieron camino y, a pesar de las muchas dificultades a las que debieron enfrentarse, consiguieron llevar adelante su vocación científica.

Fruto de esta motivación nace la exposición “Investigadoras en la Luz y en las Tecnologías de la Luz” que ha viajado por numerosas universidades y centros educativos y culturales desde su inauguración el pasado mes de septiembre en la XI Reunión Nacional de Óptica celebrada en Salamanca. Es indudable que dando visibilidad a la labor de estas científicas y reconociendo sus aportaciones en el avance de las tecnologías ópticas y fotónicas, muchas veces ocultas en el ámbito académico bajo el discurso de la neutralidad de la ciencia; estamos creando referentes para futuras científicas y tecnólogas y contribuyendo a la consecución de la igualdad efectiva entre mujeres y hombres.

DESARROLLO DEL TRABAJO

Muchos fueron los hitos en la historia de la ciencia de la luz que conmemoramos en 2015 y detrás de todos ellos se encontraba el nombre de un investigador: Alhazen, Fresnel, Maxwell, Einstein, Penzias, Wilson y Kao. Todos varones. Sin embargo, es absurdo pensar que la otra mitad de la humanidad ha estado ausente en el devenir de los descubrimientos científicos. A lo largo de la Historia de la Ciencia ha habido mujeres valientes y brillantes que, pese a las prohibiciones explícitas de acercarse al conocimiento o la negación continuada de sus vocaciones, han sabido abrirse camino y nos han iluminado con sus descubrimientos sobre la luz. Era pues momento de iluminarlas a ellas.

Son doce las científicas protagonistas de esta exposición. La elección de este número responde al objetivo de editar, en paralelo a la exposición, un calendario que pudiese ser distribuido entre un público más amplio, en particular centros de secundaria. Una vez decidido el número ¿qué criterios debíamos seguir para seleccionar a las 12 homenajeadas? Afortunadamente, y pese a la brecha antes mencionada, después de una primera búsqueda, nos encontramos con que el número de candidatas superaba con creces la docena; por lo que las siguientes cuestiones que nos planteamos fueron: ¿debemos centrarnos en científicas actualmente en activo?, ¿debemos optar por una perspectiva histórica? Esta última opción nos pareció la más acertada, dado el contexto en que se presentaba la exposición, la celebración del Año Internacional de la Luz.

LAS 12 PROTAGONISTAS

Gracias a la erudición de Gabrielle Émilie Le Tonnelier de Breteuil, más conocida como Madame de Châtelet y a su traducción de los “Principia Mathematica” al francés, la mecánica de Newton se difundió por todo el continente europeo. Martha Coston fue la primera persona en diseñar y fabricar un sistema de comunicación para los barcos basado en bengalas luminosas, contribuyendo con ello a salvar muchas vidas. Henrietta Swan Leavitt descubrió el camino para conocer el tamaño de nuestra galaxia y la escala del universo. Hedwig Kohn realizó un minucioso trabajo en espectrometría y pirometría, hoy considerados estándares de iluminación.

Katherine Burr Blodgett inventó los cristales antirreflejantes, mientras que Yvette Cauchois creó un espectrógrafo de rayos X que permitió descubrir nuevos elementos del sistema periódico. Maria Goppert Mayer, segunda mujer en la historia galardonada con el premio Nobel de Física, predijo en 1930, en su tesis, el mecanismo de absorción a dos fotones, que fue confirmado experimentalmente treinta años después y Marie Luise Spaeth inventó el láser sintonizable de colorante y desarrolló los telémetros láser. Rosalind Franklin obtuvo, mediante difracción de rayos X, la famosa Fotografía 51, que probó experimentalmente la estructura helicoidal del ADN. Martha Jane Berghin Thomas mejoró las fuentes de iluminación desarrollando materiales

fosforescentes para lámparas de bajo consumo. Jean McPherson Bennet aportó ideas originales que son un referente en el estudio de las superficies ópticas y fue la primera mujer en ocupar la presidencia de la Optical Society of America. Por último, Jocelyn Bell Burnell descubrió los “faros” del universo, los púlsares, descubrimiento considerado el más importante del siglo XX en Astronomía y que ha supuesto la prueba indirecta más sólida de la existencia de ondas gravitacionales.



Figura 1. Diseño gráfico de cada una de las investigadoras elegidas para la exposición.

En este homenaje no solo hemos pretendido resaltar las aportaciones de estas mujeres al campo de la ciencia y tecnología de la luz, sino también reflejar las circunstancias personales y el momento histórico en que se realizaron; ¡tener que “meter la tijera” en la información recopilada sobre cada una de ellas fue sin duda lo más difícil y doloroso! En cada reseña hemos tratado de encapsular en unas 200 palabras la biografía, las aportaciones científicas y algunos aspectos singulares de su vida en el contexto de su época. No ha sido fácil, hemos tenido que conformarnos con dar unas pinceladas; confiamos en que sean suficientes para despertar el interés por estas mujeres singulares.

INAUGURACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y RECORRIDO

La exposición se inauguró el 2 de septiembre de 2015, durante la XI Reunión Nacional de Óptica, celebrada en Salamanca. Desde ahí los paneles iniciaron su recorrido por diversos puntos de España, viajando a distintas universidades, entre ellas la Universidad de Valencia (del

21 de enero al 10 de marzo) en la cual coincidió con la conferencia que una de las científicas homenajeadas, la astrofísica Jocelyn Bell Burnel, impartió en el ciclo de conferencias de la Facultad de Física, precisamente el 11 de febrero, día en que se anunció la detección de ondas gravitacionales y se celebraba el Día Internacional de las Mujeres y las Niñas en la Ciencia (Figura 2 a)).

Con el fin de alcanzar la máxima difusión, los contenidos de la exposición son de libre acceso en la página web oficial (en España) del año internacional de la Luz [12,13], por lo que muchas universidades y otros centros han optado por descargarlos e imprimir sus propios paneles.



Figura 2. a) La astrofísica Jocelyn Bell Burnell de visita en la Universitat de València (centro), junto con M.^a del Mar Sánchez-López, colaboradora de la Exposición (izquierda), y Pascuala García-Martínez, coordinadora de la misma (derecha). b) Cartel de la exposición realizado para centros de Educación Secundaria

La acogida que ha recibido esta iniciativa ha sido muy buena desde el primer momento. Sociedades científicas tan relevantes como SPIE (International Society for Optics and Photonics) se hicieron eco, tanto a través de su revista a los socios SPIE Professional [14] como de su sección Women in Optics [15]. Así lo han hecho también numerosos blogs sobre Ciencia en general [16-20] o sobre temas de Mujer y Ciencia [21]. Es de destacar que el post que sobre la exposición escribió Marta Macho-Stadler, de la Universidad del País Vasco, en su blog mujeresconciencia fue difundido a centros de secundaria para organizar actividades con los estudiantes a partir de la impresión de los ficheros de la exposición.

Pero no solo los paneles impresos sino también los medios audiovisuales han servido para su rápida difusión. En este sentido, uno de los autores de este trabajo, el profesor Augusto Beléndzha realizado varios vídeos tanto en su versión en español [22] como en inglés [23] que son accesibles en Internet a través de Vimeo. Por otra parte, la profesora Carmen Carreras Béjar ha contribuido a su difusión radiofónica [24,25]. La Exposición también ha formado parte de una exposición en la Biblioteca Central de la UNED, denominada “Mujeres Científicas. La evidencia de sus investigaciones” (8 de marzo-8 de abril de 2016) y de la que Carmen Carreras ha sido comisaria [26].

Para finalizar sólo nos queda señalar que, gracias a una ayuda de SPIE (Outreach Program Grant), se ha podido editar un cartel sobre las 12 investigadoras homenajeadas (Figura 2b)) que está siendo distribuido a los centros de educación secundaria lo cual, junto con el Calendario 2016, ha aumentado el alcance de esta iniciativa.

AGRADECIMIENTOS

La realización y difusión de este proyecto no habría sido posible sin la ayuda de distintas entidades tales como el Grupo Especializado de Mujeres en Física (GEMF) de la RSEF, la

propia RSEF, SEDOPTICA, la Unitat d'Igualtat de la Universitat de València, el Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas (AMIT) y la International Society for Optics and Photonics (SPIE). Para la realización del calendario, también contribuyeron las unidades de igualdad de la Universidade de Santiago de Compostela y de la Universidade da Coruña.

Queremos agradecer la inestimable ayuda de las investigadoras del Grupo Especializado en Mujeres en Física (GEMF) de la RSEF, Pilar López Sancho (Presidenta del GEMF), Carmen Carreras Béjar, M.^a Josefa Yzuel Giménez y M.^a Luisa Calvo Padilla. También agradecemos a Amparo Pons Martí su participación y disponibilidad en la corrección de los paneles.

REFERENCIAS

- [1] International Year of Light <http://www.light2015.org/Home.html> (consultado a 27 de agosto de 2016).
- [2] Huyer, Sophia; Is the gender gap narrowing in science and engineering?, UNESCO Science Report: Towards 2030, UNESCO Publishing, 2015. https://en.unesco.org/sites/default/files/usr15_is_the_gender_gap_narrowing_in_science_and_engineering.pdf (consultado a 1 de septiembre de 2016)
- [3] The ABC of Gender Equality in Education: Aptitude, Behaviour, Confidence, PISA, OECD Publishing, 2015. <https://www.oecd.org/pisa/keyfindings/pisa-2012-results-gender-eng.pdf> (consultado a 1 de septiembre de 2016).
- [4] Libro Blanco Situación de las Mujeres en la Ciencia Española, UMYC, Ministerio de Ciencia e Innovación, 2011. http://www.idi.mineco.gob.es/stfls/MICINN/Ministerio/FICHEROS/UMYC/LibroBlanco_Interactivo.pdf (consultado a 1 de septiembre de 2016)
- [5] She Figures 2015. https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_gender_equality/she_figures_2015-final.pdf (consultado a 1 de septiembre de 2016)
- [6] Hill, Catherine; Corbett, Christianne; St. Rose, Andresse. Why so few? Women in science, technology, engineering, and mathematics. American Association of University Women, 2013. <http://www.aauw.org/files/2013/02/Why-So-Few-Women-in-Science-Technology-Engineering-and-Mathematics.pdf>
- [7] Kenney, Lynda; McGee, Pamela & Bhatnagar, Kininika. Different, not deficient: The challenges women face in STEM fields. The Journal of Technology, Management, and Applied Engineering, vol. 28 (2012) pp. 2-9.
- [8] Novas, María; Filgueira, Almudena; Fiorucci, Maria Paula; López Ana J. Gender stereotypes in technological studies: University of A Coruña case study. Proceedings of INTED2015 Conference, Madrid, 2015.
- [9] Subirats, Marina; La educación como perpetuadora de un sistema de desigualdad: la transmisión de estereotipos en el sistema escolar. Infancia y sociedad: revista de estudios, vol. 10 (1991) pp. 43-52.
- [10] Sánchez Bello, Ana. El androcentrismo científico: el obstáculo para la igualdad de género en la escuela actual. Educar vol. 29 (2002) pp. 91-102.
- [11] Lopez-Navajas, Ana. Analysis of the absence of women in the ESO textbooks: a hidden genealogy of knowledge. Revista de Educacion vol. 363 (2014) pp. 282-308.
- [12] <http://www.luz2015.es/documen/20150925mujeres.pdf>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [13] http://www.luz2015.es/documen/20151221EMO_Calendario_web.pdf. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [14] <http://spie.org/x115605.xml> (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [15] <http://spie.org/x115422.xml> (consultado a 27 de agosto de 2016)

- [16] http://cort.as/YHV_. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [17] <https://losmundosdebrana.wordpress.com/2015/10/06/video-de-la-exposicion-investigadoras-en-la-luz-y-en-las-tecnologias-de-la-luz>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [18] <http://www.agenciasinc.es/Multimedia/Ilustraciones/Doce-mujeres-iluminadas-por-la-luz>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [19] <http://pessicsdciencia.blogspot.com.es/2015/11/investigadoras-en-la-luz-y-en-las.html?m=0>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [20] <http://www.cienciacanaria.es/secciones/te-puede-interesar/585-las-mujeres-que-iluminaron-el-progreso-con-ciencia>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [21] <http://mujeresconciencia.com/2015/10/02/exposicion-investigadoras-en-la-luz-y-las-tecnologias-de-la-luz/>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [22] <https://vimeo.com/135479240>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [23] <https://vimeo.com/135466642>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [24] <http://ciencia-luciernagas.blogspot.com.es/search?q=doce+científicas+de+la+luz>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [25] <https://canal.uned.es/mmobj/index/id/46695>. (consultado a 27 de agosto de 2016)
- [26] <https://canal.uned.es/mmobj/index/id/49394>. (consultado a 27 de agosto de 2016)

LISTAGEM DE AUTORES

A. B. McDonald, 3
A. D. Reis, 93, 97
A. Hernández, 155
A. Moura Santos, 203
A. Queiruga-Dios, 155
Alberto Câmara, 167
Alexandra R. S. Ferreira, 107, 113, 119
Ana Gayol, 235
Ana Inácio, 33
Ana J. López, 241
Ana Luísa Lopes, 75
Ana Tavares Sousa, 187
André L. Almeida, 107, 113, 119
Ariel Guerreiro, 63
Armando A. Soares, 57, 87, 139, 181, 207
Augusto Beléndez, 241
Bernardo B. Carvalho, 45, 125
Bernardo Tomé, 23
C. F. F. P. Ribeiro Pacheco, 93, 97
C. Rodríguez, 155
Catarina E. Santo, 23
Cesarina Augusto, 139
Cristina Prieto, 81, 155
D. Corona, 45
Fernanda Saraiva, 223
Florbelá Aura Dias, 145
Francisco Diogo, 23
Gema Calleja, 211
Guilhem Mariotte, 39
H. Figueiredo, 45
H. Veiga, 93
Horácio Fernandes, 45, 125, 173, 199, 203
Hugo Simões, 75
Isabel Godinho, 145
J. A. R. Pacheco de Carvalho, 93, 97
J. Herrera, 45
J. Viana, 203
Joana Lencart, 75
João A. M. Santos, 75
João A. S. Barata, 75
João Carvalho, 51
João Espadanal, 23
João Fortunato, 125, 173
João S. Cabaço, 107, 113, 119
José Jorge Teixeira, 181, 207
José L. Santos, 107, 113, 119
José Lameira, 57
José M.M.M. de Almeida, 107, 113, 119
José Maneira, 9
José P. Cravino, 139, 193
Josué Lopes, 173
L. Caramelo, 57
Lígia Teixeira, 181
Lorenzo Cazon, 23
Ludovic Leclercq, 39
Luís Coelho, 107, 113, 119
Luís J. M. Amoreira, 81
Luis Lopes, 23
Luis Mendes, 23
Luís Ribeiro, 145
M. A. Salgueiro da Silva, 101, 229
M. Inácio, 69
M. J. Quintas, 177
M.D. Merchán, 155

M.J. de Almeida, 149
Mª Jesús Santos, 155
Mafalda Braz, 193
Manuel A. González, 155
Manuel B. Marques, 133
Manuel Santos, 173
María del Mar Sánchez-López, 241
Mário Pimenta, 23
Marisa L. Monteiro, 133
Maurício Moreira-Soares, 51
Miguel A. González, 155
Miguel Ferreira, 23
N. Cruz, 45
Olivier Pellegrino, 145
P. Almeida, 69
P. L. Silva, 87
P. Ribeiro, 203
P. Simeão Carvalho, 177
P.M. Gordo, 149
Pascuala García-Martínez, 241
Paula Catarino, 207
Paulo Crespo, 75
Paulo Ferreira, 23
Paulo Fonte, 23
Pedro A. S. Jorge, 63
Pedro Abreu, 23
Pedro Assis, 23
Pedro Lourenço, 45, 125
R. Figueiredo, 203
Ramón Vilorio, 211
Raul Sarmento, 23
Ricardo Luz, 23
Rita Coimbra, 51
Rita S. Rodrigues Ribeiro, 63
Ruben Conceição, 23
Rui Jorge Agostinho, 187, 217
Rui Ribeiro, 87
Rui Travasso, 51
S. Soares, 69
Samuel Balula, 173
Sérgio Batista, 39
Simão Sá, 63
Sofia Andringa, 15, 23
Stefan-Alexandru Nae, 29
T. Esperança, 149
T. M. Seixas, 101, 229
Tânia Pacheco, 167
Thais Djenane Nunes de Souza, 161
The SNO+ Collaboration, 9, 29, 33
Tiago Pereira, 125
Verónica Tricio, 211, 235