



Gazeta de

# Física

Sociedade Portuguesa de Física

Número especial dedicado à Conferência

## AS ENERGIAS DO PRESENTE E DO FUTURO

Instituto Superior Técnico

21 e 22 de Novembro de 2005

Editor

CARLOS VARANDAS



DIRECTOR Carlos Fiolhais  
DIRECTORAS ADJUNTAS Constança Providência e Lucília Brito  
EDITORA Paula Alexandra Almeida

CORRESPONDENTES Paulo Crawford (Lisboa),  
Joaquim Santos (Coimbra) e João Pedro Araújo (Porto)

COLABORAM AINDA NESTE NÚMERO

Aníbal Traça de Almeida, António Vallêra, Carlos Varandas,  
Eduardo Oliveira Fernandes, Filipe Duarte Santos, Filipe  
Moura, João A. Peças Lopes, José Dias Urbano, José Manuel  
Viegas, Manuel Collares Pereira, Maria Fernanda Rosa, M. E.  
Manso, Miguel Centeno Brito, Pedro Coelho, Pedro Miguel  
de Sampaio Nunes, Pedro Soares Moura, Rui Namorado  
Rosa, Tiago Lopes Farias.

SECRETARIADO

Maria José Couceiro (Lisboa)  
e Cristina Silva (Coimbra)

DESIGN

MediaPrimer - Tecnologias e Sistemas Multimédia Lda  
Rua Sanches da Gama, n.º 160  
3030-021 Coimbra  
E-mail info@mediaprimer.pt

PRÉ-IMPRESSÃO E IMPRESSÃO

Carvalho & Simões, Artes Gráficas, Lda  
Estrada da Beira 479 / Anexo  
3030-173 Coimbra

TIRAGEM 2300 exemplares

PREÇOS Número avulso 5,00 € (inclui IVA).  
Assinatura anual 15,00 € (inclui IVA).  
A assinatura é grátis para os sócios da SPF.

PROPRIEDADE DA SOCIEDADE PORTUGUESA  
DE FÍSICA

ADMINISTRAÇÃO E REDACÇÃO  
Avenida da República 37-4º 1050-187 Lisboa  
Tel 217 993 665 Fax 217 952 349  
E-mail secretariado@spf.pt

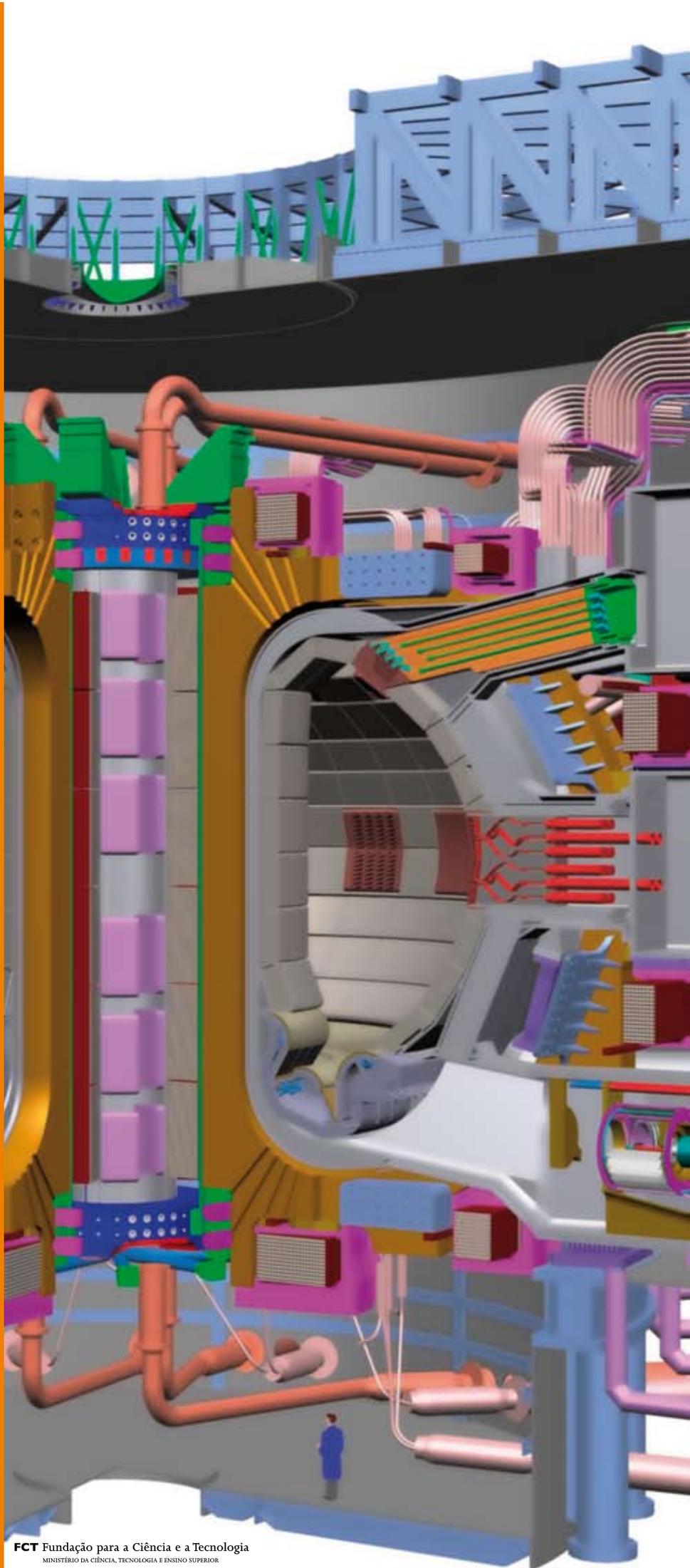
NIPC 501094628  
REGISTO ICS n.º 110856  
ISSN 0396-3561  
DEPÓSITO LEGAL n.º 51419/91  
PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL

A Gazeta de Física publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Deverá constituir também um espaço de informação para as actividades da SPF, nomeadamente as suas Delegações Regionais e divisões Técnicas. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física. As opiniões expressas pelos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Os manuscritos devem ser submetidos em duplicado, dactilografados em folhas A4 a dois espaços (máximo equivalente a 3500 palavras ou 17500 caracteres, incluindo figuras, sendo que uma figura corresponde em média a 140 palavras). Deverão ter sempre um curto resumo, não excedendo 130 palavras. Deve(m) ser indicado(s) o(s) endereço(s) completo(s) das instituições dos autores, assim como o endereço electrónico para eventual contacto. Agradece-se o envio dos textos em disquete, de preferência "Word" para PC. Os originais de figuras devem ser apresentados em folhas separadas, prontas para reprodução, e nos formatos electrónicos jpg, gif ou eps.

PUBLICAÇÃO SUBSIDIADA

APOIOS:  
Ministério da Educação - Sistema de Incentivos à Qualidade da Educação



FÍSICA, ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	4
José Dias Urbano	
AS ENERGIAS DO PRESENTE E DO FUTURO	6
Carlos Varandas, Aníbal Traça de Almeida, António Vallêra, Eduardo Oliveira Fernandes, Manuel Collares Pereira e Pedro Coelho	
MEIO SÉCULO DE HISTÓRIA FOTOVOLTAICA	10
António M. Vallêra e Miguel Centeno Brito	
OS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS - O PROBLEMA DO PEAK OIL	16
Rui Namorado Rosa	
ENERGIA E CLIMA: DESAFIO AMBIENTAL DO SÉCULO XXI	22
Filipe Duarte Santos	
A ENERGIA SOLAR: APLICAÇÕES TÉRMICAS	30
Manuel Collares Pereira	
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	36
António Vallêra	
SITUAÇÃO ACTUAL DOS BIOCMBUSTÍVEIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	42
Maria Fernanda Rosa	
HIDROGÉNIO E CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL	50
Aníbal Traça de Almeida e Pedro Soares Moura	
NOVAS FORMAS DE CISÃO NUCLEAR	56
Pedro Miguel de Sampaio Nunes	
FUSÃO NUCLEAR, UMA OPÇÃO ENERGÉTICA PARA O FUTURO	66
M. E. Manso e C. A. F. Varandas	
VEÍCULOS ALTERNATIVOS	74
Tiago Lopes Farias	
A PROCURA E A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NOS TRANSPORTES	78
José Manuel Viegas e Filipe Moura	
OFERTA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉCTRICOS	86
João A. Peças Lopes	

## AS ENERGIAS DO PRESENTE E DO FUTURO

Centro de Congressos do Instituto Superior Técnico  
21 e 22 de Novembro de 2005

### COMISSÃO ORGANIZADORA

CARLOS VARANDAS  
Instituto Superior Técnico

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ANTÓNIO VALLÊRA  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

EDUARDO OLIVEIRA FERNANDES  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

MANUEL COLLARES PEREIRA  
Instituto Nacional de Tecnologias Industriais

PEDRO COELHO  
Instituto Superior Técnico

# FÍSICA, ENERGIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A Conferência “As Energias do Presente e do Futuro” inseriu-se num conjunto de actividades que, sob o mesmo título, integraram o programa da Sociedade Portuguesa de Física para celebrar o Ano Internacional da Física 2005 em Portugal. As outras actividades foram (e são, pois ainda estão a decorrer) a realização de palestras e a produção de materiais de divulgação.

Ao declarar o ano de 2005 como o Ano Internacional da Física, a Assembleia-Geral das Nações Unidas convidou a UNESCO a celebrá-lo em colaboração com as sociedades de Física e grupos de todo o mundo, incluindo os países em desenvolvimento. Por sua vez a UNESCO escolheu como objectivo principal “a promoção da Física a todos os níveis, no mundo inteiro”.

Uma das formas mais eficazes de promover a Física é mostrar que, quando aliada a outros ramos do saber, ela pode ajudar a identificar e resolver alguns dos maiores problemas com que a humanidade se defronta. Um desses problemas é precisamente o de satisfazer as crescentes necessidades de energia, sem danificar o ambiente.

A Comissão Organizadora de “As Energias do Presente e do Futuro” escolheu criteriosamente a data e o local da Conferência. A data (21 e 22 de Novembro de 2005) foi escolhida de forma a coincidir com o centenário da publicação, em 21 de Novembro de 1905, do célebre artigo de Einstein sobre “a dependência da inércia dum corpo do seu conteúdo energético”. O local foi o Centro de Congressos do Instituto Superior Técnico, uma das mais emblemáticas escolas de ciência e tecnologia do País, que presta especial atenção às energias do presente e do futuro.

No referido artigo, Einstein apresentou, pela primeira vez, a sua célebre fórmula  $E=mc^2$ , que alguns consideram “a fórmula mais famosa do mundo”. Com aquela fórmula Einstein ligou dois conceitos até então desligados um do outro, o de massa e o de energia. E fê-lo, aplicando a sua teoria da relatividade restrita que ligava dois conceitos que, até então, se referiam também a aspectos diferentes da descrição da realidade física, o espaço e o tempo.

A ideia de que a massa de um corpo se pode transformar em energia, e vice-versa, foi confirmada em situações muito diferentes e teve um papel determinante no aprofundamento

do nosso entendimento sobre a constituição e as propriedades dos sistemas físicos. Ela está na base da compreensão da ligação dos constituintes fundamentais em sistemas tão diversos quanto as galáxias, as estrelas, os planetas, os sólidos, as moléculas, os átomos, os núcleos atómicos e os nucleões. Essa fórmula é, em última análise, a fonte primária de todas as formas de energia.

A importância que a UNESCO dá aos problemas da energia e do ambiente, e a esperança que deposita na contribuição dos físicos e da física para ajudar a resolvê-los, ficaram patentes quando incluiu esse tópico na Conferência Mundial “A Física e o Desenvolvimento Sustentável” que se realizou de 30 de Outubro a 2 de Novembro, em Durban, África do Sul.

Em sintonia com esta iniciativa da UNESCO, a Comissão Organizadora, presidida pelo Prof. Carlos Varandas, definiu como principais objectivos do projecto “As Energias do Presente e do Futuro” os seguintes:

- a) Alertar para a importância das políticas energéticas no desenvolvimento económico e social, sustentável, da humanidade;
- b) Informar sobre as várias opções energéticas;
- c) Realçar o papel da Física no progresso científico e tecnológico da área das energias, com ênfase especial na procura de soluções para a produção de energia no futuro;
- d) Cativar os jovens para o estudo da Física e das Tecnologias.

A competência e o profissionalismo com que a Comissão encarou a difícil tarefa de organizar actividades que são de alguma forma inéditas em Portugal, permitem antever que aqueles objectivos irão ser alcançados. O sucesso da Conferência, em que as várias formas de produzir energia foram brilhantemente apresentadas e vivamente confrontadas, é um indicador muito positivo, que nos permite acalentar essa esperança.

Resta-me, em nome da Sociedade Portuguesa de Física, agradecer à Comissão Organizadora e aos conferencistas o seu esclarecido e empenhado contributo; aos participantes o terem aderido à iniciativa; e ao POCI 2010 o financiamento concedido. Ele possibilita, nomeadamente, a publicação deste número especial da *Gazeta de Física*, o qual permitirá levar a audiências mais vastas os ensinamentos da Conferência.

José Dias Urbano

Presidente do Conselho Directivo da Sociedade Portuguesa de Física  
Comissário Nacional para o Ano Internacional da Física 2005

# AS ENERGIAS DO PRESENTE E DO FUTURO

CENTRO DE CONGRESSOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

21|22 Novembro 2005

spf  
SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA



## 21 NOVEMBRO

09:30 Sessão de Abertura

### I. A FÍSICA E A ENERGIA

Presidente: José Dias Urbano

- 10:00 **A Física e a Energia**  
João Caraça
- 10:40 *Intervalo*
- 10:50 **Combustíveis Fósseis: O Problema**  
Rui Namorado Rosa
- 11:10 **A Energia e o Ambiente I - Clima**  
F. Duarte Santos
- 11:30 **A Energia e o Ambiente II - Território**  
Teresa Andresen
- 11:50 **Debate**
- 13:00 *Fim da sessão da manhã*

### II. ENERGIA E CONHECIMENTO - 1ª Parte

Presidente: Aníbal Traça de Almeida

- 14:30 **A Energia em Portugal - Ponto de Situação:**  
E. de Oliveira Fernandes
- 15:00 **Energia Hídrica**  
A. Gonçalves Henriques
- 15:20 **Energia Eólica**  
Álvaro H. Rodrigues
- 15:40 **Energia Solar Térmica**  
M. Collares Pereira
- 16:00 **Energia Solar Fotovoltaica**  
A. Vallera
- 16:20 *Café*
- 16:40 **Energia das Ondas**  
A. Falcão
- 17:00 **Energia dos Biocombustíveis**  
Fernanda Rosa
- 17:20 **A Energia e a Cidade: Matriz Energética**  
Lívia Tirone
- 17:40 **Debate**

## 22 NOVEMBRO

### III. ENERGIA E CONHECIMENTO - 2ª Parte

Presidente: António Vallera

- 09:30 **Introdução**  
António Vallera
- 09:40 **Utilização Limpa de Combustíveis**  
J. Toste Azevedo
- 10:00 **Hidrogénio**  
A. Traça Almeida
- 10:20 **Novas Tecnologias de Cisão Nuclear**  
P. Sampaio Nunes
- 10:40 **Fusão Nuclear**  
Maria Emília Manso
- 11:00 *Intervalo*
- 11:20 **Veículos Alternativos**  
Tiago Farias
- 11:40 **Procura e Eficiência Energética I - Transportes**  
J.M. Viegas
- 12:00 **Oferta e Eficiência Energética II - Sistemas eléctricos**  
J.P. Lopes
- 12:20 **Procura e Eficiência Energética III - Edifícios**  
Ricardo Sá
- 12:40 **Debate**
- 13:00 *Fim da sessão da manhã*

### IV. A ENERGIA PARA TODOS

Presidente: Carlos Varandas

- 14:30 **Debate com Carlos Varandas, José Sucena Paiva (IST),  
A. Sá da Costa (APREN) e Gomes Martins (UC).**

PATROCÍNIOS:



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



Membros da Comissão Organizadora da Conferência  
“As Energias do Presente e do Futuro”, Sociedade  
Portuguesa de Física, Novembro de 2005

CARLOS VARANDAS<sup>1</sup>, ANÍBAL TRAÇA DE  
ALMEIDA<sup>2</sup>, ANTÓNIO VALLÊRA<sup>3</sup>, EDUARDO  
OLIVEIRA FERNANDES<sup>4</sup>, MANUEL COLLARES  
PEREIRA<sup>5</sup>, PEDRO COELHO<sup>6</sup>

<sup>1,6</sup> Instituto Superior Técnico

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

<sup>3</sup> Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

<sup>4</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Tecnologias Industriais

# AS ENERGIAS DO PRESENTE E DO

Os problemas energéticos têm condicionado o desenvolvimento sustentável da nossa sociedade, directamente ou através das suas implicações no clima e ambiente. Para além das políticas de eficiência energética e do aumento do recurso às energias renováveis, os governos devem investir, cada vez mais, na procura de novas tecnologias energéticas, capazes de serem fontes alternativas aos combustíveis fósseis e de proporcionarem uma solução global para os problemas energéticos da humanidade.

A política energética mundial tem sido baseada, essencialmente, na queima de combustíveis fósseis, com relevo especial para o petróleo. O carvão, o petróleo e o gás natural são responsáveis por aproximadamente 80% da energia final consumida anualmente, enquanto as energias renováveis (hídrica incluída) e nuclear representam cerca de 10% cada.

Existem várias justificações para este panorama: (i) em primeiro lugar, razões históricas decorrentes da descoberta do poder calorífico da combustão e das invenções revolucionárias da máquina a vapor e do motor de combustão interna; (ii) o preço do petróleo manteve-se baixo e atractivo até ao início da década de setenta do século passado; (iii) os combustíveis fósseis, e em particular o petróleo, podem ser facil-

Sector	Portugal	Reino Unido
INDÚSTRIA	29%	21%
TRANSPORTES	35%	35%
EDIFÍCIOS	29%	30%
OUTROS	7%	14%

Tabela I - Distribuição do consumo energético por sector de actividade.

# FUTURO

mente usados quer na produção de energia eléctrica quer directamente na indústria e nos transportes (o qual, neste caso, representa entre 30% e 40% do consumo energético de um país desenvolvido (Tabela 1)); (iv) a energia nuclear, convencional, produzida a partir de reacções de fissão de núcleos de elementos pesados (como, por exemplo, o urânio), tem uma aceitação fraca pela opinião pública.

Esta política energética tem, contudo, um preço elevado para a humanidade e coloca várias questões importantes para o futuro. De facto: (i) a queima de combustíveis fósseis liberta para a atmosfera grandes quantidades de dióxido de carbono, o qual é o principal responsável pelo chamado efeito de estufa. Este efeito cria perturbações graves no clima e no ambiente, nomeadamente o aquecimento global da Terra (Fig. 1), com todas as suas consequências; (ii) os recursos naturais dos combustíveis fósseis são limitados. As jazidas que conhecemos permitem satisfazer as necessidades actuais da humanidade durante respectivamente 40, 50 ou 300 anos consoante o combustível considerado seja o petróleo, o gás natural ou o carvão; (iii) as jazidas de petróleo e de gás natural estão concentradas em certas regiões da Terra, caracterizadas por grande instabilidade política e social (Tabela 2), facto que cria problemas económicos e políticos, de que o actual aumento excessivo do preço do petróleo e os conflitos frequentes no Médio Oriente são exemplos elucidativos.

Por outro lado, o consumo de energia vai aumentar em resultado do crescimento da população mundial, do desenvolvimento de alguns países (como, por exemplo, a China e a Índia) e, ainda, se bem que de forma já hoje bastante moderada, da melhoria da qualidade de vida nos países desenvolvidos. A análise das evoluções no tempo do consu-

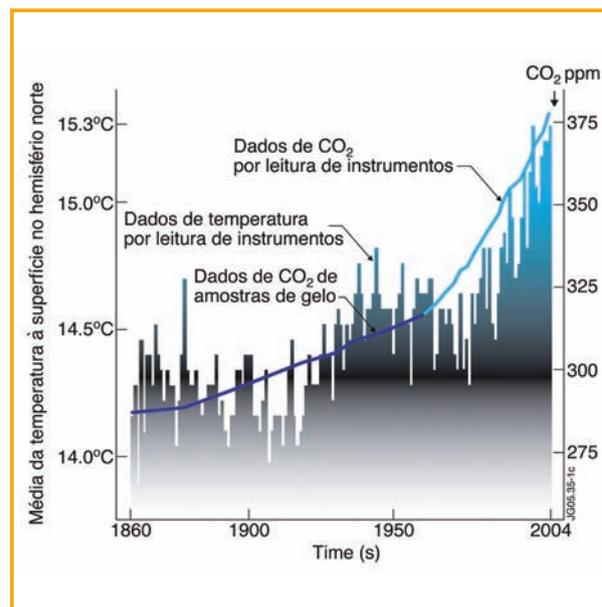


Fig. 1 - Evolução da temperatura média à superfície da Terra no hemisfério norte.

mo de energia e das reservas das actuais fontes energéticas (Fig. 2) permite concluir que a partir de 2040 o consumo será superior às reservas convencionais e que a diferença aumentará significativamente ao longo dos anos seguintes.

Os factos referidos nos dois parágrafos anteriores indicam a necessidade de uma nova política energética, capaz de corresponder aos desafios do desenvolvimento sustentável e do progresso social. Esta nova política energética deve estar baseada nos seguintes conceitos fundamentais:

- **Eficiência** na utilização (conversão, transporte e consumo) da energia, através de programas de eficiência energética na produção e no transporte e na distribuição de electricidade e em todos os sectores de actividade, mas com ênfase especial nos edifícios e nos transportes;
- **Flexibilidade**, de modo a que a política energética possa

Região	Petróleo	Gás natural
MÉDIO ORIENTE	61,7%	40,6%
ÁFRICA	9,4%	7,8%
ÁSIA PACÍFICO	3,5%	7,9%
AMÉRICA DO NORTE	5,1%	4%
AMÉRICA CENTRAL E DO SUL	8,5%	4%
EUROPA E EURO-ÁSIA	1,7%	35,7%

Tabela 2 - Distribuição das reservas de petróleo e gás natural (Fonte: BP Statistical Review of World Energy, Junho de 2005).

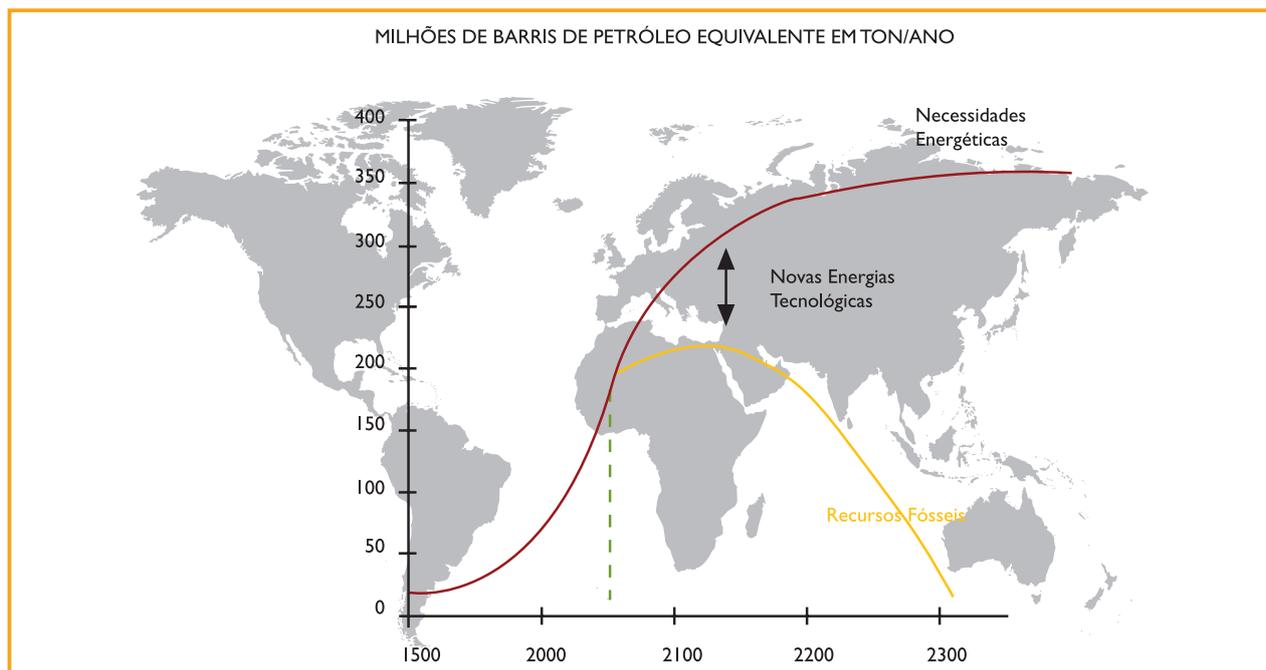


Fig. 2 - Evolução do consumo e da energia disponível, admitindo que a população mundial estabiliza em 10 biliões e um consumo a 2/3 da taxa de consumo dos Estados Unidos em 1985.

ser facilmente adaptada a alterações nos mercados e nos condicionalismos externos;

- **Diversidade**, através do recurso simultâneo a várias formas de energia, de modo a garantir o fornecimento barato, seguro e eficiente. É necessário incrementar fortemente a construção de centrais hidroeléctricas, aumentar significativamente o peso das energias renováveis (solar térmica, solar fotovoltaica, ondas, marés, eólica, biomassa e biocombustíveis) e, se necessário, recorrer a outras energias alternativas (energia nuclear convencional, areias betuminosas e óleos pesados);

- **Inovação e desenvolvimento tecnológico**, de modo a trazer até ao estado comercial novas fontes energéticas, assim como novas fontes de armazenamento e novas tecnologias de utilização de energia. Esta necessidade decorre do facto das actuais fontes energéticas não proporcionarem uma resposta global para as necessidades energéticas do futuro. É, por isso, necessário apoiar a investigação científica e o desenvolvimento tecnológico de todas as fontes energéticas com potencial para darem contribuições importantes, ainda que a médio ou longo prazo, como as tecnologias do hidrogénio e da fusão nuclear.

A Física tem dado ao longo dos séculos contribuições importantes para a problemática da energia. De facto, e para além dos conceitos básicos que estão subjacentes a muitas fontes de energia e ao funcionamento das centrais

eléctricas, a Física tem ajudado a estabelecer modelos que permitem explicar, e até prever, as alterações climáticas e a desenvolver novas fontes de energia baseadas em conceitos com grande ligação à Física.

Não admira, por isso, que a Sociedade Portuguesa de Física tenha incluído no programa das comemorações nacionais do “2005 Ano Mundial da Física” um conjunto de actividades subordinadas ao tema “As energias do presente e do futuro”. De entre as iniciativas desenvolvidas, assumiu relevância especial uma Conferência Nacional, realizada no Centro de Congressos do Instituto Superior Técnico, nos dias 22 e 23 de Novembro de 2005. Recorde-se que foi no dia 22 de Novembro de 1905 que Einstein publicou a célebre fórmula,  $E=mc^2$ , que relaciona a massa com a energia, relação que viria mais tarde a explicar a origem da energia libertada em reacções nucleares. Saliente-se também que em 17 de Março do mesmo ano Einstein tinha publicado o artigo sobre o efeito fotoeléctrico, que lhe valeu o prémio Nobel em 1921, artigo esse que serviu de base ao nosso entendimento da conversão fotovoltaica.

Este número especial da *Gazeta de Física* contém artigos correspondentes a algumas das comunicações feitas na conferência acima referida. As cópias destas apresentações estão disponíveis em:

[www.cfn.ist.utl.pt/conf\\_energia/index.html](http://www.cfn.ist.utl.pt/conf_energia/index.html).

# EXPOSIÇÃO



à luz de

# EINSTEIN

1905-2005

## Coimbra

Museu Nacional  
da Ciência  
e da Técnica  
Doutor Mário Silva

16 de Maio  
a 24 de Novembro  
de 2006



FUNDAÇÃO  
CALOUSTE  
GULBENKIAN

Colégio das Artes [antigo Hospital UC] Praça D. Dinis | 10h > 18h • Segunda > Sábado | Tel: 239 851 940 | mnct@mnct.pt | www.mnct.pt



Ciência **Inovação**  
2010

Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954. Tinha apenas dois centímetros quadrados de área e uma eficiência de 6%, gerando 5 mW de potência eléctrica. Cinquenta anos depois, em 2004, foram produzidos cerca de mil milhões de células, com eficiências da ordem dos 16%, ultrapassando pela primeira vez a barreira de 1 GW de potência eléctrica anual instalada.

ANTÓNIO M. VALLÊRA

Departamento de Física e Centro de Física da  
Matéria Condensada (CFMC),  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

amvallera@fc.ul.pt

MIGUEL CENTENO BRITO

Centro de Física da Matéria Condensada (CFMC)  
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

mcbrito@fc.ul.pt

# MEIO SÉCULO D HISTÓRIA FOTO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Edmond Becquerel que verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num electrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz [1].

Mais tarde, em 1877, dois inventores norte americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutoras do selénio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de electricidade por exposição à luz [2].

Tratava-se de um filme de selénio depositado num substrato de ferro e com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia de contacto frontal. Apesar da baixa eficiência de conversão, da ordem de 0,5%, nos finais do século XIX o engenheiro alemão Werner Siemens (fundador do império industrial com o seu nome) comercializou células de selénio como fotómetros para máquinas fotográficas.

A história da energia fotovoltaica teve de esperar os grandes desenvolvimentos científicos da primeira metade do século XX, nomeadamente a explicação do efeito fotoeléctrico por Albert Einstein em 1905, o advento da mecânica quântica

# DE VOLTAICA

e, em particular, a teoria de bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício: sem a ciência moderna, seria impensável o nascimento da energia solar eléctrica. As descobertas acidentais e o desenvolvimento empírico nunca nos teriam levado a ultrapassar o limiar de eficiência que a tornou viável.

## O nascimento: a primeira célula solar moderna

A história da primeira célula solar começou em Março de 1953 quando Calvin Fuller, um químico dos Bell Laboratories (Bell Labs), em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América, desenvolveu um processo de difusão para introduzir impurezas em cristais de silício, de modo a controlar as suas propriedades eléctricas (um processo chamado “dopagem”). Fuller produziu uma barra de silício dopado com uma pequena concentração de gálio, que o torna condutor, sendo as cargas móveis positivas (e por isso é chamado silício do “tipo p”). Seguindo as instruções de Fuller, o físico Gerald Pearson, seu colega nos Bell Labs, mergulhou esta barra de silício dopado num banho

quente de lítio, criando assim na superfície da barra uma zona com excesso de electrões livres, portadores com carga negativa (e por isso chamado silício do “tipo n”). Na região onde o silício “tipo n” fica em contacto com o silício “tipo p”, a “junção p-n”, surge um campo eléctrico permanente.

Ao caracterizar electricamente esta amostra, Pearson verificou que produzia uma corrente eléctrica quando a amostra era exposta à luz. Pearson tinha acabado de fazer a primeira célula solar de silício. Morton Prince, um outro físico dos Bell Labs, conta numa entrevista [3] como Pearson ficou surpreendido com a descoberta e o chamou ao laboratório para que testemunhasse as medidas, assinando o seu caderno de laboratório.

Entusiasmado, Pearson foi ter com o engenheiro Daryl Chapin, também seu colega nos Bell Labs, que estudava soluções para substituir as baterias eléctricas que mantinham em funcionamento redes telefónicas remotas. Chapin ensaiara células solares de selénio, conhecidas há muito, mas com resultados decepcionantes: a eficiência máxima que conseguira era bem inferior a 1%. Ensaando a nova célula, Chapin e Pearson verificaram que a eficiência de conversão era de cerca de 4%, muitas vezes maior do que a melhor célula de selénio.

Continuando o estudo da nova célula, rapidamente o grupo encontrou vários obstáculos. Por um lado a célula revelava uma resistência-série muito significativa<sup>1</sup>, devida à dificuldade em soldar contactos eléctricos ao material. Por outro lado, mesmo à temperatura ambiente, verificaram que o lítio migrava para o interior do silício, pelo que a junção p-n (a “zona activa” da célula solar) ficava cada vez mais profunda e inacessível aos fotões da radiação solar, diminuindo assim a eficiência da célula.

Fuller experimentou fazer a dopagem do tipo n usando uma difusão de fósforo, e obteve uma junção p-n mais estável do que a anterior. Porém, o problema dos contactos persistia.

Foi então que Fuller substituiu o gálio por arsénio (formando um substrato do tipo n) seguido por uma difusão



Fig. 1 - Calvin Fuller prepara uma amostra de silício dopado com arsénio para a colocar num forno de difusão de modo a criar uma junção p-n.

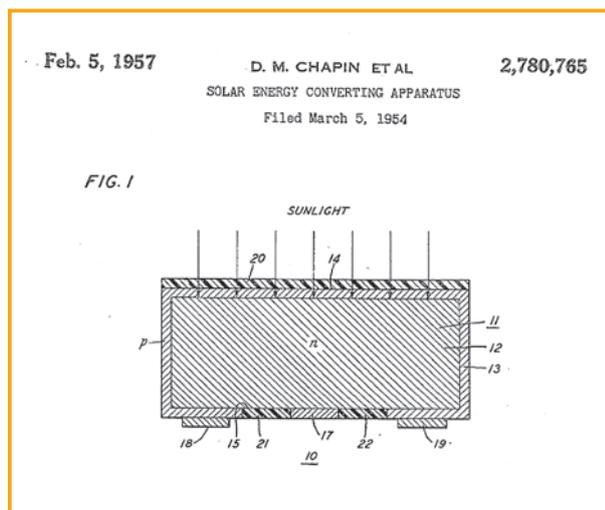


Fig. 2 - Extracto da patente da primeira célula solar, registada em Março de 1954.

de boro (formando uma zona do tipo p à superfície). As novas células podiam agora ser facilmente soldadas e revelaram uma eficiência recorde, atingindo 6%.

Perante estes resultados, e depois de o Pentágono ter autorizado a sua publicação, a primeira célula solar foi apresentada na reunião anual da National Academy of Sciences, em Washington, e anunciada numa conferência de imprensa no dia 25 de Abril de 1954. Os resultados foram submetidos para publicação no *Journal of Applied Physics* [4] e foi registada uma patente [5] (Fig. 2).

A demonstração pública da “pilha solar” consistiu numa transmissão via rádio de algumas palavras entre D. E. Thomas e Morton Prince usando um sistema portátil alimentado por uma célula solar<sup>2</sup>. A reacção da imprensa foi entusiástica. Nas páginas do *New York Times* podia ler-se que aquela primeira célula solar “marca o princípio de uma nova era, levando, eventualmente, à realização de um dos mais belos sonhos da humanidade: a colheita de energia solar sem limites, para o bem-estar da civilização”.

A primeira aplicação das células solares de Chapin, Fuller e Pearson (Fig. 3) foi realizada em Americus, no estado da Georgia, para alimentar uma rede telefónica local (Fig. 4). O painel, com nove células com 30 mm de diâmetro, foi montado em Outubro de 1955 e removido em Março de 1956. Os resultados foram promissores, embora o painel tivesse ficado rapidamente coberto por uma massa opaca de fezes ornitológicas! [6].

No entanto, rapidamente se compreendeu que o custo das células solares era demasiado elevado, pelo que a sua utilização só podia ser economicamente competitiva em aplicações muito especiais, como, por exemplo, para pro-

duzir electricidade no espaço. Recordemos que o primeiro satélite, o Sputnik, lançado em 1957, acabara de inaugurar oficialmente a corrida ao espaço entre os Estados Unidos e a União Soviética.



Fig. 3 - Gerald Pearson, Daryl Chapin, Calvin Fuller e a sua primeira célula solar, desenvolvida nos laboratórios da Bell Telephone C. em 1954.



Fig. 4 - A primeira aplicação de uma célula solar de silício foi como fonte de alimentação de uma rede telefónica local em Americus, na Geórgia, Estados Unidos da América, em 1955.

### Infância e adolescência

Inicialmente, os satélites usaram pilhas químicas ou baseadas em isótopos radioactivos. As células solares eram consideradas uma curiosidade, e foi com grande relutância que a NASA aceitou incorporá-las, como *back-up* de uma pilha convencional, no *Vanguard I*, lançado em Março de 1958 (Fig. 5). A pilha química falhou, mas o pequeno painel com cerca de 100 cm<sup>2</sup>, que produzia quase 0,1 W, manteve o transmissor de 5 mW em funcionamento muito para além de todas as expectativas: o *Vanguard I* manteve-se operacional durante oito anos. Depois desta demonstração de fiabilidade, durabilidade e baixo peso, o programa espacial norte-americano adoptou as células solares como fonte de energia dos seus satélites.

Também o programa espacial soviético viu nas células solares a solução para uma fonte de energia inesgotável para os seus satélites. Dois meses depois do lançamento do *Vanguard I*, foi a vez do *Sputnik-3*. E muitos outros se seguiram nas décadas seguintes. Hoje, todos os veículos espaciais são equipados com células solares, desde a *Inter-*

*national Space Station* aos *Mars Rover*, que ao fim de dois anos continuam a percorrer o solo marciano.

O desenvolvimento de células solares cada vez mais eficientes para utilização no espaço levou a alguns avanços tecnológicos importantes na década que se seguiu. É o caso da substituição, a partir de 1960, do contacto frontal único por uma rede de contactos mais finos mas espalhados, reduzindo a resistência série e aumentando a eficiência [7].

Enquanto nas primeiras células solares norte-americanas o substrato das células era silício do tipo n, os investigadores do programa espacial soviético escolheram substratos do tipo p, por ser mais económico de produzir. Mais tarde, verificou-se que o silício do tipo p é mais resistente à radiação pelo que, depois da descoberta das cinturas de radiação de Van Allen, em 1960, o programa espacial norte americano começou também a desenvolver células em substrato do tipo p [8].

Outro avanço importante foi a chamada “célula violeta”, dos COMSAT Laboratories [9]. Esta célula tinha uma do zona tipo n significativamente mais fina que as anteriores, o que permitiu eliminar a zona inactiva à superfície, melhorando portanto a resposta no azul. A célula violeta obteve uma eficiência recorde de 13,5%. Destaque-se ainda a utilização de um campo eléctrico na superfície posterior da célula (o *Back Surface Field* - BSF) criado por uma difusão de alumínio, para melhorar a resposta da célula no vermelho<sup>3</sup> [10], e a texturização da superfície frontal para reduzir as perdas por reflexão [11].

Mas, se o desenvolvimento das células solares nos anos sessenta foi sobretudo motivado pela corrida ao espaço, o que levou a células mais eficientes mas não necessariamente mais económicas, foi nessa década que surgiram as primeiras aplicações terrestres. Foi o caso das células da SOLAREX, uma empresa de Joseph Lindmeyer, que começou a produzir painéis fotovoltaicos para sistemas de telecomunicações remotos e bóias de navegação. Este tipo de aplicações muito específicas eram então as únicas economicamente interessantes devido à inexistência de fontes de energia alternativas à electricidade solar. Esta situação viria a mudar de figura quando, no outono de 1973, o preço do petróleo quadruplicou.

O pânico criado pela crise petrolífera de 1973 levou a um súbito investimento em programas de investigação para reduzir o custo de produção das células solares. Algumas das tecnologias financiadas por estes programas revolucionaram as ideias sobre o processamento das células solares. É o caso da utilização de novos materiais, em particular o silício multicristalino (em vez de cristais únicos de silício, monocristais, muito mais caros de produzir) ou de métodos de produção de silício directamente em fita (elimi-

nando o processo de corte dos lingotes de silício, e todos os custos associados). Outra inovação particularmente importante do ponto de vista de redução de custo foi a deposição de contactos por serigrafia em vez das técnicas tradicionais: a fotolitografia e a deposição por evaporação em vácuo [12]. O resultado de todos estes avanços foi a redução do custo da electricidade solar de 80 \$/Wp para cerca de 12 \$/Wp em menos de uma década<sup>4</sup>.

Do ponto de vista da eficiência de conversão das células solares, a barreira dos 20% de eficiência foi pela primeira vez ultrapassada pelas células de silício monocristalino da Universidade de New South Wales, na Austrália [13], enquanto a equipa de Dick Swanson atingiu os 25% de eficiência em células com concentrador<sup>5</sup> [14].



Fig. 5 - Imagem do *Vanguard I*, o primeiro satélite com células solares, lançado em Março de 1958 levando a bordo um pequeno painel solar com 100 cm<sup>2</sup> visível na janela em cima à esquerda.

### A maturidade

As décadas de oitenta e noventa foram também marcadas por um maior investimento em programas de financiamento e de demonstração motivados sobretudo pela consciência crescente da ameaça das alterações climáticas devido à queima de combustíveis fósseis<sup>6</sup>. Exemplos destas iniciativas são a instalação da primeira central solar de grande envergadura (1 MWp) na Califórnia, em 1982, e o lançamento dos programas de “telhados solares” na Alemanha (1990) e no Japão (1993). Os poderes políticos compreenderam então que a criação de um verdadeiro mercado

fotovoltaico não poderia basear-se apenas no desenvolvimento tecnológico, aumentando a eficiência das células (como na época da corrida ao espaço), ou reduzindo o seu custo de produção (como depois da crise do petróleo) mas também através de uma economia de escala: quantas mais células forem fabricadas menor será o custo unitário. Um exemplo do impacto deste tipo de política fica bem claro quando se consultam as conclusões de um estudo financiado pela Comissão Europeia, o MUSIC FM, que mostrou que, utilizando tecnologia actual, melhorada apenas por investigação focada com resultados previsíveis, uma fábrica de painéis solares com um nível de produção da ordem dos 500 MW anuais levaria a uma redução dos custos dos painéis solares para valores competitivos com a energia convencional (1 euro/Wp) [15].

Foi do resultado de iniciativas de estímulo ao mercado fotovoltaico, como por exemplo a lei das tarifas garantidas na Alemanha, que resultou o crescimento exponencial do mercado da electricidade solar verificado no final dos anos noventa e princípios deste século: em 1999 o total acumulado de painéis solares atingia a fasquia do primeiro gigawatt, para, três anos depois, o total acumulado ser já o dobro.

Entretanto, o desenvolvimento tecnológico do fotovoltaico não pára. Assim, em 1998 foi atingida a eficiência recorde de 24,7%, com células em silício monocristalino [16], enquanto, no ano passado, o grupo do Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems anunciou uma eficiência superior a 20% para células em silício multicristalino [17]. Células solares com configurações mais complexas, as chamadas células em cascata (ou *tandem*) que consistem na sobreposição de várias células semicondutoras, cada uma optimizada para um dado comprimento de onda da radiação, permitem atingir rendimentos de conversão superiores a 34% [18].

### O futuro

A European Photovoltaic Industry Association (EPIA) publicou em 2004 um roteiro que avança as perspectivas da indústria fotovoltaica para as próximas décadas. Prevendo um crescimento do mercado semelhante ao dos últimos anos (superior a 30% por ano) e uma redução nos custos proporcional ao crescimento de painéis instalados, a EPIA antecipa que em 2020 cerca de 1% da electricidade consumida mundialmente será de origem fotovoltaica, elevando-se essa fracção para cerca de 26% em 2040 [19]. Ainda segundo o mesmo relatório, do ponto de vista tecnológico o ênfase será dado à redução de custos através da redução da matéria-prima (silício) utilizada por unidade de potência instalada, usando células mais finas ou produzidas directamente em fita. Destaque-se ainda o desenvolvimento de novas técnicas de soldadura dos contactos eléctricos

entre células individuais que hoje limitam fortemente a automatização dos processos de montagem de painéis solares.

### Conclusão

Decorrido meio século desde a construção da primeira célula solar de silício, a tecnologia fotovoltaica atingiu finalmente uma fase de maturidade que permite antecipar que, nas próximas décadas, o fotovoltaico se pode vir a transformar numa das mais importantes formas de produção de electricidade.

Se à sombra da corrida ao espaço, os primeiros 25 anos de vida da célula solar assentaram na procura de maiores eficiências, o choque petrolífero e a percepção da ameaça das alterações climáticas devido à emissão de gases e consequente efeito de estufa estimularam o início do desenvolvimento de técnicas de processamento de células com menores custos. Hoje é dado ênfase a mecanismos de apoio à criação e desenvolvimento de um verdadeiro mercado de electricidade solar sustentável que, nos próximos 25 anos, possa levar a energia fotovoltaica a muitos dos lares do planeta.

### BIBLIOGRAFIA

Para mais detalhes sobre a história das células solares de silício consultar os seguintes textos:

1. Flood, M., *Solar cells, Design and Innovation*, Open University Press (1986) 56.
2. Green, M., “Silicon Photovoltaic Modules: A Brief History of the First 50 Years”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **13** (2005) 447.
3. Perlin, J., Kazmerski, L. and Moon, S., “Silicon solar cell turns 50”, *Solar Today* **1** (2004).
4. Siemer J., “First steps into the solar age”, *Photon International* **6** (2004) 65.
5. Treble, F., “Milestones in the development of crystalline silicon solar cells”, *Renewable Energy* **15** (1998) 473.
6. Willeke, G. P., “The crystalline silicon solar cell: history, achievements and perspectives”, *Proceedings 19th EPVSEC* (2004).

## REFERÊNCIAS

- [1] Becquerel, E., “Memoires sur les effets electriques produits sous l’influence des rayons”, *Comptes Rendues* **9** (1839) 561.
- [2] Adams, W.G. and Day, R.E., “The action of light on selenium”, *Proceedings of the Royal Society*, **A25** (1877) 113.
- [3] Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., “A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power”, *Journal of Applied Physics* **25** (1954) 676.
- [4] Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., *Solar Energy Converting Apparatus*, Patent US2780765.
- [5] Pearson, G. L., “Conversion of solar to electric energy”, *American Journal of Physics* **25** (1957) 591.
- [6] Wolf, M., “Limitations and possibilities for improvement of photovoltaic solar energy converters”, *Proceedings of the IRE* **48** (1960) 1246.
- [7] Koltun, M. M., “History of solar cell development in the Soviet space program and the terrestrial potential for this technology”, *Solar Energy Materials and Solar cells* **44** (1996) 293-317.
- [8] Lindemeyer, J. and Allison, J. F., “An improved solar cell: the violet cell”, *Proceedings 9th IEEE PSC*, Silver Spring (1972) 83.
- [9] Mandelkorn, J. and Lamneck, J. H., “Simplified fabrication of back surface electric filed silicon cell and novel characteristics of such cells”, *Proceedings 9th IEEE PSC*, Silver Spring (1972) 66.
- [10] Haynos, J. G. et al., “The COMSAT non-reflexive silicon solar cell: a second generation improved cell”, *Proceedings International Conference on PV Power Generation*, Hamburg (1974) 487.
- [11] Ralph, E. L., “Recent advances in low cost solar cell processing”, *Proceedings 11th IEEE PVSC* (1975) 315.
- [12] Green, M. A. et al., “Improvements in silicon solar cell efficiency”, *Proceedings 18th IEEE PVSC*, Las Vegas, Nevada (1985) 39.
- [13] Sinton, R. A. et al., “Silicon point contact concentrator solar cells”, *Proceedings 18th IEEE PVSC*, Las Vegas, Nevada (1985) 61.
- [14] Bruton, T. et al., “Multimegawatt upscaling of silicon and thin film solar cell and module manufacturing”, *MUSIC FM, Final Report RENA-CT94-0008* (1997).
- [15] Zhao, J., Wang, A., Green, M. A. and Ferrazza, F., “Novel 19.8% efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cell”, *Applied Physics Letters* **73** (1998) 1991.
- [16] Schultz, O., Glunz, S. W. and Wileke G. P., “Multicrystalline Silicon Solar Cells Exceeding 20% Efficiency”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **12** (2004) 553.
- [17] King, R. R., et al., “Lattice-matched and metamorphic GaInP/GaInAs/Ge concentrator solar cells”, *Proceedings of the World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-3)*, Osaka (2003).
- [18] Viaud, M., Hoffman, W. and Aulich H., “European PV Industry roadmap”, *Proceedings 19th EPVSEC* (2004).

## NOTAS

<sup>1</sup> A resistência série de uma célula solar representa o conjunto das diversas perdas óhmicas do dispositivo que reduzem o rendimento da célula.

<sup>2</sup> Cinquenta anos depois, uma destas células originais foi reapresentada na Conferência Mundial de Energia Fotovoltaica, que teve lugar em Osaka, no Japão, em Maio de 2003. Passado meio século, a sua eficiência degradou-se um pouco e é agora de 5,1% (medição certificada pelo NREL).

<sup>3</sup> O BSF repele os portadores da superfície posterior da célula solar, diminuindo efectivamente a sua probabilidade de recombinação.

<sup>4</sup> O  $W_p$  (watt-peak) é a unidade de medida da potência eléctrica de um painel fotovoltaico quando iluminado em determinadas condições padrão (1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25 °C e o espectro da radiação solar AM1.5).

<sup>5</sup> Os concentradores focam a radiação solar numa área mais pequena, onde se encontra a célula solar.

<sup>6</sup> Com a excepção dos E.U.A., que introduziram cortes significativos no financiamento da energia fotovoltaica durante a administração Reagan.

O crescimento demográfico, a inovação técnica, a substituição e diversificação de “fontes primárias” de energia, a diversificação de vectores energéticos, a multiplicação das utilizações de “energia final”, a omnipresença de “máquinas” e a integração económica mundial, são conducentes à intensificação da utilização de energia que suporta o “crescimento económico”. Será este sustentável?

A génese dos hidrocarbonetos é conhecida e o conhecimento dos seus recursos é quase exaustivo. São finitos e escassos. Os recursos mais “acessíveis” foram explorados primeiro, o “custo energético” de extracção cresce e a sua “disponibilidade” diminui: obter energia fóssil requer cada vez mais energia. Há um limite para a quantidade disponível: quando o custo em energia dispendida igualar o benefício em energia recolhida. A eficiência energética de extracção é uma medida física útil para abordar este problema.

RUI NAMORADO ROSA

Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora  
R. Romão Ramalho, 59  
7000 Évora

Instituto Superior Técnico e Association for the Study  
of Peak Oil and Gas

rosa@uevora.pt

# OS COMBUSTÍV O PROBLEMA D

## SUBSTITUIÇÃO DE MATÉRIAS-PRIMAS

A energia é crucial para todas as economias. O ferro pode substituir o cobre, o alumínio pode substituir o ferro ou o cobre, o ferro pode substituir a madeira, o betão pode substituir o ferro, o titânio pode substituir o alumínio, com eventuais constrangimentos ou até grandes vantagens. Mas energia só pode ser substituída por energia, eventualmente de outra origem, mas por opção ou por constrangimento? Com vantagem ou desvantagem?

A captação ou extracção de uma fonte de energia primária é uma actividade económica que ela própria consome recursos, e em particular energia. Por cada barril de petróleo investido no Golfo Pérsico podem ser extraídos, refinados e transportados trinta ou mais barris. O retorno, no caso de extracção de hidrocarbonetos a partir de areias betuminosas e xistos asfálticos, é próximo de 2 ou 3; essa extracção implica enorme mobilização de energia (actualmente gás natural) e de massa (desmonte de rochas e consumo de caudais de água) para obter quantidades relativamente modestas de energia útil. A evolução para fontes ou tecnologias de menor retorno energético implica

# OS PELOS FÓSSIS - O PEAK OIL

a redução da energia efectivamente disponível para as restantes actividades e/ou o aumento do investimento e a diminuição da rentabilidade do sector energético.

A progressiva escassez dos hidrocarbonetos (petróleo e gás natural), que representam dois terços do aprovisionamento mundial de energia, é assunto que preocupa um número cada vez maior de cientistas, políticos e cidadãos.

## HIDROCARBONETOS CONVENCIONAIS A CAMINHO DA EXAUSTÃO

Os sinais de alarme vão-se acumulando. A experiência industrial dos vários países produtores de petróleo tem revelado que a sua capacidade de produção atinge o respectivo máximo cerca de 25 a 40 anos após a ocorrência da taxa máxima de descoberta de reservas nos seus depósitos petrolíferos (esta variabilidade depende de factores geológicos, mas também de factores económicos e políticos). Essa observação tem-se repetido consecutivamente na larga maioria dos países produtores. Nos EUA a curva de produção exibiu o seu pico em 1971, na Indonésia em

1977 (e de novo em 1997, pois neste país tiveram lugar duas vagas de prospecção e dois picos distintos de descobertas), no Egipto em 1994, no Reino Unido em 1999, na Noruega em 2001, na Rússia em 1988 (prevendo-se um pico secundário em 2009, neste caso porque o “normal” curso da curva de produção foi distorcido por factores político-económicos), na China prevê-se que ocorra já em 2009. O lote de países que seguramente ainda não atingiram o pico da respectiva curva de produção é um pelotão já reduzido a apenas oito: Arábia Saudita, Iraque, Abu-Dhabi, Cazaquistão, Azerbeijão, Uzbequistão, Líbia e Bolívia. E se constataremos que o pico de descobertas, no plano mundial, se centrou na década de 1960, poderemos antecipar que o correspondente pico da produção poderá provavelmente ocorrer na primeira década do novo século.

Outro sinal de alarme tem a ver com o desempenho dos maiores campos petrolíferos. Quase metade da produção mundial é assegurada pelos 120 maiores campos petrolíferos. Destes, os catorze maiores (super-gigantes, com capacidade superior a 500 000 barris/dia) asseguram, só por si, 20% da produção mundial. Ora a descoberta de campos gigantes vem diminuindo em número e dimensão desde a remota década de 1950; o último super-gigante foi descoberto nos anos 1980. A larga maioria está envelhecida e muitos deles entraram já em franco declínio de produção; os maiores dos maiores, Gawar na Arábia Saudita, Burgan no Kuwait e Cantarel no México, depois de largas dezenas de anos de elevada produtividade, entraram em declínio, não obstante os esforços de produção assistida. Uma consequência desse envelhecimento e diminuição é a necessidade de incrementar a produção, requerida pelo crescimento da procura, por recurso à exploração de uma multidão cada vez mais numerosa de milhares de depósitos menores e cada vez mais pequenos, com acrescidos custos económicos e energéticos.

Outro sinal de alarme reside indiscutivelmente no facto de a taxa de extracção de petróleo manter ainda tendência ascendente, mas a taxa de descoberta de novas reservas exibir tendência descendente, com saldo consistentemente negativo desde 1980. Estamos a consumi-lo ao ritmo de 25 biliões de barris/ano (25 Gb/ano), enquanto o ritmo de descoberta se reduziu já a apenas 5 Gb/ano. Entrámos decisivamente num período em que exaurimos um *stock* definitivamente limitado (Fig. 1).

Finalmente falemos de reservas estimadas. As estimativas das últimas reservas recuperáveis (URR) a nível mundial são variáveis consoante os autores, mas o intervalo em que se situam mantém-se estável ao longo das últimas dezenas de anos; segundo a ASPO, esse montante estará próximo de 2000 biliões de barris (2000 Gb). Já não são de esperar surpresas, não obstante, ou justamente, por causa dos notáveis progressos realizados, quer na prospecção quer na

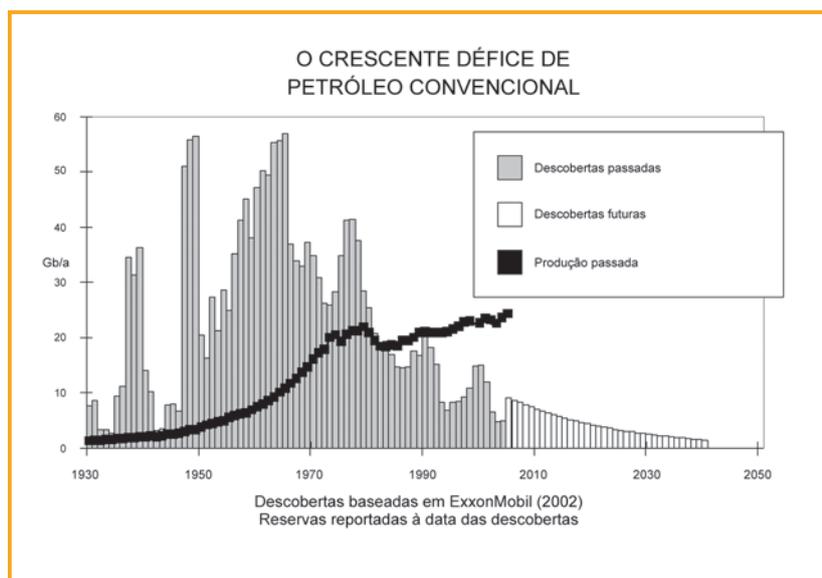


Fig. 1 - Descobertas e produção: o crescente déficit de petróleo convencional.

exploração. E é por isso que se pode afirmar com segurança que estaremos (a nível mundial) próximo do ponto em que a quantidade de petróleo convencional já extraído e queimado (cerca de 945 Gb) é aproximadamente igual à quantidade de petróleo recuperável ainda preservado nas reservas remanescentes. A dúvida sobre se tal ocorrerá alguns anos mais cedo ou mais tarde é irrelevante e até não concretamente observável; o fundamental é a mudança da tendência que se avizinha, se não é que estamos a atravessá-la justamente agora.

### SUBSTITUIÇÃO DE FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA

As repercussões económicas dessa transição poderão revelar-se (ou estarão a revelar-se já) determinantes no funcionamento da esfera sócio-económica. Sendo a energia um factor de produção cuja real produtividade é muito superior à respectiva contribuição na estrutura de preços dos factores, a disponibilidade de energia, independentemente do seu custo monetário, será determinante para a possibilidade de crescimento económico (numa métrica física).

Então, a escassez de uma determinada fonte de energia primária requer a sua substituição por outras fontes, de forma que a disponibilidade de energia não se torne em factor limitativo da produção. Cerca de 1880, as duas fontes de energia primária dominantes no plano mundial eram a biomassa (lenha) e o carvão mineral, em iguais proporções, a primeira em tendência descendente e o segundo ascendente; a energia solar, eólica e hídrica mantinham a sua histórica importância, que porém se tornara relativamente menor; o acelerado crescimento da produção suportava-se no consumo do carvão mineral, parte intrínseca da revolução industrial. Também, por essa época, o petróleo iniciava, nos EUA, o seu ciclo de vida como combustível de

futuro. Mais de um século volvido, no final do século XX, cinco fontes primárias asseguravam contribuições importantes e em boa medida especializadas no aprovisionamento mundial de energia: o petróleo com 40%, o gás natural e o carvão com cerca de 25% cada (mas com tendências contrárias, ascendente o primeiro, descendente o segundo), a fracção restante sendo assegurada pelas energias nuclear e hídrica (ambas na produção eléctrica).

Porém, as diversas fontes de energia não são equivalentes e, portanto, as respectivas substituições não são física e economicamente indiferentes. O petróleo substituiu o carvão não por exaustão do carvão; o gás natural, que em regra acompanha geologicamente o petróleo, começou por ser negligenciado, até passar a ser recuperado nas regiões onde escasseou o petróleo. O petróleo é, como líquido, facilmente armazenável, transportável e destilável, uma matéria-prima energética e química incomparável. Poderá ser substituído do ponto de vista de poder calorífico mas não o será no conjunto das suas propriedades superiores. Em particular, o petróleo é a mais eficaz fonte de combustíveis líquidos, universalmente utilizados em motores de combustão interna, quer em aplicações fixas quer sobretudo em aplicações móveis, com destacada predominância nos sectores de transportes aéreo, marítimo e terrestre. Por esta via o petróleo está omnipresente e tem uma importância imediata e determinante no comércio a todos os seus níveis de integração económica.

Daí que seja necessário e se assista a um esforço no sentido de diversificar as origens de hidrocarbonetos líquidos, para além do petróleo “convencional” que goza de baixa viscosidade e se encontra acumulado em rochas relativamente porosas e permeáveis. Segundo as avaliações da ASPO regularmente actualizadas, estamos a atravessar o pico mundial da capacidade de extracção de petróleo convencio-

nal. A pressão da procura exige investimento na extracção de outros hidrocarbonetos líquidos, menos acessíveis ou de menor qualidade. De entre estas contribuições não convencionais, a mais apreciável vem, e prevê-se que continue a vir, sobretudo dos líquidos que acompanham o gás natural e condensam aquando da sua extracção. Outras “fronteiras” de extracção de petróleo não convencional são o “petróleo polar” (depósitos a latitude superior ao círculo polar ártico), o “petróleo de águas profundas” (depósitos no *offshore* em fundos marinhos a profundidade superior a 500 metros, Fig. 2), o “petróleo pesado” (de elevadas densidade e viscosidade) e os “asfaltos” e “betumes” (correspondentes a fases geologicamente anteriores ou posteriores à formação de petróleo).

Os petróleos polar e de águas profundas exigem soluções técnicas sofisticadas e implicam pesados investimentos e custos de exploração; por isso, só depósitos de média ou grande dimensão justificam ser explorados. O aproveitamento de depósitos de petróleo pesado, de areias betuminosas ou de xistos asfálticos requer igualmente soluções técnicas complicadas e pesados investimentos; são tipicamente casos de baixo retorno de energia por energia investida na extracção; existem alguns grandes depósitos (Orinoco, na Venezuela, Athabasca, no Canadá e Green River, nos EUA), cuja taxa de recuperação é reconhecidamente baixa e que comportam impactos ambientais importantes.

## ENERGIA E CRESCIMENTO ECONÓMICO

A econosfera, o conjunto das instituições e processos sociais de elaboração material, é um sistema aberto no seio da geosfera natural. Toda a actividade económica implica transformação material e decorre no seio da natureza,

sujeita às suas leis naturais. A civilização pré-industrial e o arranque da revolução industrial apoiaram-se inteiramente em fluxos directos de energia solar (ou indirectos, que suportam *stocks* renováveis como florestas e pesqueiros). O valor histórico da terra (solo) é atribuível à sua capacidade para captar e converter os fluxos naturais de energia e massa (mormente os ciclos do carbono e da água) accionados pelo fluxo primário de radiação solar.

Obter energia implica trabalho, ou seja dispêndio de energia. A relação entre energia obtida e energia dispendida, tem um significado primordial na base material de todas as sociedades e dita a sua sustentabilidade e a habilidade para o seu crescimento. Nas sociedades pré-industriais o trabalho somático do homem (e dos animais de trabalho domesticados), aplicado ao solo (e dadas as disponibilidades dos factores sol e água), deveria produzir alimentos suficientes para sustentar esse ciclo de realimentação, sem o que a fome poria em risco a sobrevivência da população e a estabilidade da sua estrutura. Nas sociedades industriais avançadas a intensidade de utilização de energia externa é dezenas de vezes a capacidade de realização de trabalho somático, até mesmo na agricultura, mas sobretudo nos transportes. As fontes de energia externa que suportaram o desenvolvimento industrial no passado foram os combustíveis fósseis, particularmente o petróleo, que ganhou predominância quantitativa e qualitativa ao longo de quase todo o século XX. Todavia os depósitos de combustíveis fósseis são finitos e apenas uma parte deles são ou poderão vir a ser tomados como “reservas”, isto é, passíveis de ser utilmente explorados, ponderados os factores tecnológicos e económicos. Lamentavelmente, as expectativas colocadas nas potencialidades de desenvolvimento tecnológico têm sido erradamente supostas ilimitadas pelo pensamento económico neoclássico dominante.

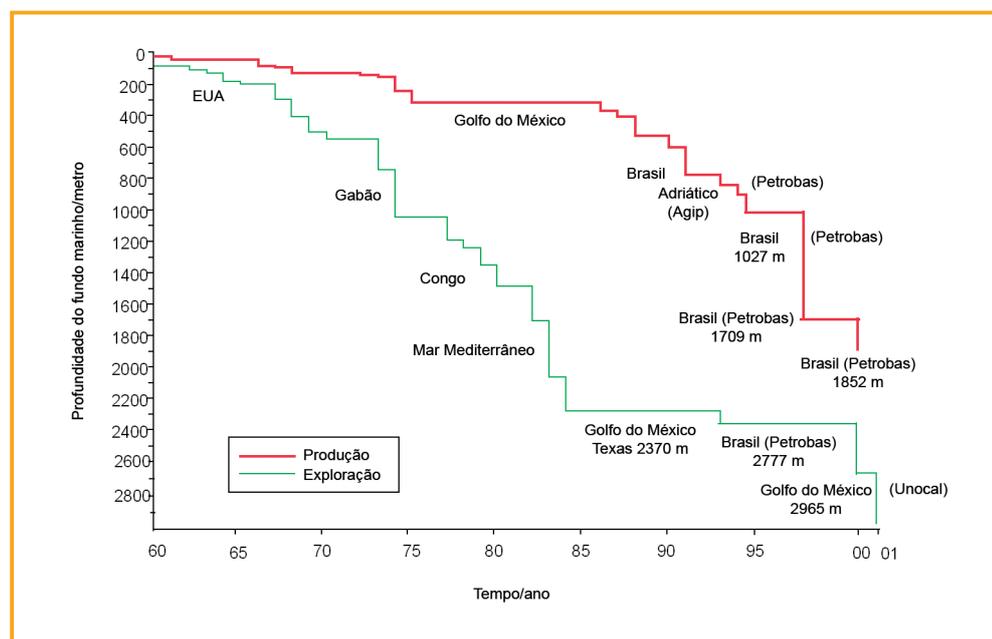


Fig. 2 - Novas Fronteiras da Prospecção e Exploração: O crescimento de reservas e de produção tem sido também assegurado pelo *offshore* a profundidades progressivamente maiores. (Fonte: ENSPM, Institut Français du Pétrole, 2002)

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA

Quando nos ocupamos de extracção de matérias-primas energéticas (fósseis ou nucleares) é apropriado tomar a razão entre energia (bruta ou líquida) obtida e energia dispendida, *energy return on energy invested*, EROEI ou *energy profit ratio*, EPR como medida da eficiência energética de extracção da fonte de energia primária. Este indicador é, em regra, de aferição incerta porque a indústria e as entidades responsáveis pela recolha de informação não estão sensibilizados para ele. Consumos internos à indústria energética não são relatados ou sequer aferidos; há gás natural recuperado à saída dos poços que é re-injectado nos campos petrolíferos (para incrementar a taxa de recuperação do petróleo) e *stranded gas* consumido localmente pela própria indústria sem que sejam registados; o gás natural consumido na extracção de “petróleo sintético” a partir de areias betuminosas ou na beneficiação de “petróleo pesado” também não é registado; os “ganhos de refinaria” são acertos que confirmam a inconsistência de critérios e procedimentos.

Os hidrocarbonetos convencionais, petróleo e gás natural, são fluidos resultantes da lenta transformação de matéria orgânica incorporada em rochas sedimentares em afundamento e submetidas a temperaturas e pressões progressivamente elevadas (rocha mãe), que ficam retidos e armazenados em rochas porosas e permeáveis e naturalmente pressurizadas (rocha reservatório), pelo que, uma vez perfurada a rocha cobertura, a sua ejeção é espontânea. Com o avanço da extracção, a pressão baixa e, numa segunda etapa, o prosseguimento da extracção requer pressurização, mediante injeção ou de água sob o lençol de

hidrocarboneto ou de um gás (azoto, dióxido de carbono, ou mesmo gás natural) sobre o lençol de petróleo. Etapas mais avançadas exigem a extracção através de furos horizontais, a injeção de substâncias tensoactivas, a fragmentação da rocha com explosivos, a instalação de bombeamento subterrâneo, etc. Qualquer modalidade de extracção assistida (*enhanced oil recovery*, EOR) é não só exigente em recursos adicionais, particularmente em energia, como também é contrariada e limitada no seu alcance pelo facto de o escoamento se dar em mistura de fases, de que resulta a fragmentação do hidrocarboneto em bolsas isoladas cuja acessibilidade se torna progressivamente mais difícil; por estas razões, a taxa de recuperação frequentemente não excede 45% para o petróleo e 70% para o gás. A aceleração da extracção e a exploração gananciosa para satisfação de necessidades imediatas agravam as irreversibilidades, traduzindo-se, tanto na antecipação do pico da produção, como em mais rápido declínio da ulterior taxa de extracção e redução da taxa de recuperação final alcançada.

O incremento da taxa de recuperação do hidrocarboneto pré-existente exige, em particular, a intensificação do consumo de energia na extracção, isto é, a eficiência energética de extracção, EROEI ou EPR, degrada-se progressivamente ao longo do ciclo de vida de um campo petrolífero, pelo que o hidrocarboneto *in situ* nunca é totalmente extraído. Os limites económicos e técnicos da extracção do recurso não podem ser deixados deslizar indefinidamente, como é crença corrente, porque admitindo que o fossem, a extracção tornar-se-ia, a partir de certo momento, um sumidouro e não uma fonte de energia.

Os recursos de hidrocarbonetos não convencionais caracterizam-se por exibirem *ab initio* baixa eficiência energética de extracção, EROEI ou EPR. Mesmo que os recursos sejam muito vastos, os fluxos de massa e energia exigidos para obter uma unidade de energia líquida, a ser exportada e consumida fora da própria indústria energética, são substancialmente superiores aos exigidos para obter uma unidade de energia líquida partindo de recursos convencionais. Isso significa que os investimentos em meios de equipamento serão proporcionalmente maiores e os impactos ambientais também.

A escassez já patente em reservas de hidrocarbonetos convencionais faz com que se recorra, cada vez mais, a reservas não convencionais, nomeadamente petróleo pesado e ultra-pesado, areias betuminosas, jazidas no *offshore* profundo, jazidas na zona polar, líquidos de gás natural (NGL) e líquidos do carvão (CL), líquidos sintéticos derivados do gás à saída do poço (GTL) ou do carvão ou à boca da mina (CTL), *Coal Bed Methane* e *Tight Gas Sands*. Xistos asfálticos (rochas-mãe imaturas portadoras de querogénio ainda não convertido em hidrocarbonetos) e sedimentos marinhos (portadores de hidratos de metano)

FONTE DE ENERGIA PRIMÁRIA	Eficiência energética de extracção EROEI ou EPR
<b>PETRÓLEO E GÁS NATURAL (À SAÍDA DO POÇO)</b>	
1940 - 9	Descobertas >100
1970 - 9	Descobertas 8, Extracção 23
2000 - 5	Extracção 10
<b>CARVÃO (À BOCA DA MINA)</b>	
1950	80
1970	30
2000	8
<b>OFFSHORE PROFUNDO</b>	5
<b>XISTOS ASFÁLTICOS</b>	1 a 4
<b>AREIAS BETUMINOSAS</b>	2 a 4
<b>LIQUEFAÇÃO DO CARVÃO</b>	0,5 a 8

Tabela I - Eficiência energética de extracção de energia primária.

ocorrem em algumas vastas jazidas, mas o EROEI ou EPR da sua extracção é presumivelmente proibitivo (Tabela 1).

Assim, o pico de produção de hidrocarbonetos convencionais e a transição para hidrocarbonetos “não convencionais” significa, essencialmente, uma degradação progressiva da eficiência energética de extracção de energia primária, do nível muito elevado alcançado em meados do século XX, para níveis que foram os alcançados em fases anteriores da revolução industrial. É certo que as eficiências energéticas de conversão de energia primária em secundária (centrais termoeléctricas e refinarias, por exemplo) e de utilização final (motores térmicos, células de combustível, sistemas de energia total, por exemplo) podem ainda progredir, mas é já estreita a margem de progresso aí realizável. Ora uma economia industrial baseada em baixa eficiência energética de extracção de energia primária, verá a sua capacidade de acumulação de bens materiais (e capital) estrangida. O século XXI será tecnicamente muito mais avançado mas poderá ter capacidade de crescimento comparável à do século XIX.

#### BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/>
2. <http://www.peakoil.net>
3. [http://www.kva.se/KVA\\_Root/files/newspics/DOC\\_20051019115734\\_6666431682\\_energy\\_statement1\\_05.pdf](http://www.kva.se/KVA_Root/files/newspics/DOC_20051019115734_6666431682_energy_statement1_05.pdf)
4. <http://www.aspo-usa.com/>
5. [http://www.intnet.mu/iels/Fossil\\_Fuels.htm](http://www.intnet.mu/iels/Fossil_Fuels.htm)
6. <http://www.istp.murdoch.edu.au/publications/projects/oilfley/climaxingoil.html#2.2>
7. <http://www.ker.co.nz/pdf/Net%20Energy%20U.S.%20Oil%20and%20Gas.pdf>
8. <http://planetforlife.com/oilcrisis/oilreserves.html>

## JÁ PAGOU AS QUOTAS DE 2006?

Caro Sócio da SPF: neste momento já deverá ter recebido uma carta solicitando o pagamento da sua quota.

A Sociedade Portuguesa de Física pede a todos uma resposta rápida. Ela é indispensável para a continuidade da SPF.

Apresenta-se uma breve descrição do sistema climático terrestre e uma análise das causas da variabilidade climática natural, especialmente da alternância entre períodos glaciares e interglaciares nos últimos 600 000 anos. Desde o início da revolução industrial e sobretudo mais recentemente, as actividades humanas têm provocado uma interferência sobre o sistema climático por meio das emissões crescentes de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Esta interferência provoca alterações climáticas, cujos primeiros sinais são já observáveis, que terão impactos negativos sobre vários sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos. Há dois tipos de resposta a estas alterações climáticas: a mitigação e a adaptação. Depois de discutir uma metodologia para definir quantitativamente o que se deve entender por interferência antropogénica perigosa sobre o sistema climático faz-se uma breve introdução à problemática da mitigação, que consiste em estabilizar a concentração atmosférica dos gases com efeito de estufa, especialmente o  $\text{CO}_2$  proveniente da combustão dos combustíveis fósseis e das alterações no uso dos solos.

FILIPE DUARTE SANTOS

Laboratório Associado - Instituto D. Luiz,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,  
Observatório Astronómico de Lisboa  
Edifício Leste, Tapada da Ajuda  
1349-018 Lisboa

fdsantos@oal.ul.pt

# ENERGIA E CLIMA DESAFIO AMBIENTAL SÉCULO XXI

Um dos maiores impactes ambientais do actual período de intenso desenvolvimento sócio-económico, que teve o seu início com a revolução industrial, em meados do século XVIII, é o aumento da concentração atmosférica de alguns gases com efeito de estufa (GEE) (ou seja, com a propriedade de absorver a radiação infravermelha), especialmente o  $\text{CO}_2$ . A concentração deste gás na atmosfera aumentou em cerca de 35% desde o valor pré-industrial de 280 ppmv (partes por milhão em volume) até ao valor de 379 ppmv em 2004. Este aumento continua e resulta, sobretudo, da queima de combustíveis fósseis, carvão, petróleo e gás natural, e também das alterações no uso dos solos, em especial a desflorestação. Nos últimos 20 anos a combustão dos combustíveis fósseis contribuiu em média, com 75% das emissões globais de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera. Há outros GEE cujas concentrações atmosféricas estão também a aumentar devido a emissões antropogénicas tais como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFCs e HCHCs.

As emissões antropogénicas de  $\text{CO}_2$  são especialmente importantes porque o  $\text{CO}_2$  é um poderoso regulador do clima. Estudos paleoclimáticos revelam que existe uma forte correlação entre a concentração atmosférica do  $\text{CO}_2$  e a temperatura média global da atmosfera. Os resultados apresentados na Fig. 1, obtidos a partir da medição da

# MA: NTAL DO

concentração do CO<sub>2</sub> em pequenas bolhas de ar retidas nas sucessivas camadas de gelo depositadas na Antártica, revelam que a concentração actual de CO<sub>2</sub> excede em cerca de 70 ppmv o máximo da concentração nos últimos 420 000 anos, durante os quais houve 4 ciclos glaciares, com uma

duração aproximada de 100 000 anos, caracterizados por um período glacial relativamente longo com 80 000 a 90 000 anos, seguido de um período interglacial relativamente mais quente e curto. O aumento da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico, nos últimos 250 anos constitui uma preocupante interferência antropogénica sobre o sistema climático que, se não for controlada, se tornará perigosa.

Os ciclos climáticos evidenciados na Fig. 1 têm causas naturais e resultam de forçamentos de natureza astronómica relacionados com variações periódicas nos parâmetros orbitais da Terra - variação da excentricidade da órbita em torno do Sol, variação da inclinação do eixo de rotação relativamente à elíptica e movimento de precessão do eixo da rotação. Note-se porém que estes forçamentos são insuficientes para explicar cabalmente a grande amplitude das oscilações da temperatura média global entre os períodos glaciares e interglaciares: provavelmente eles são amplificados através de processos não-lineares de realimentação interna no sistema climático, envolvendo a interacção entre dois dos seus principais sub-sistemas – a atmosfera e a hidrosfera. Quanto à forte correlação entre a concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> e a temperatura média global da baixa atmosfera, provavelmente ela resulta também da interacção entre a atmosfera e os oceanos e está associada ao facto de os oceanos constituírem o principal sumidouro de CO<sub>2</sub> e este ser menos dissolúvel quando a temperatura superficial dos oceanos sobe. Resultados recentes [3] obtidos na Antártica permitem recuar até há 650 000 anos atrás e revelam que desde então houve 6 ciclos glaciares nos quais se manteve a correlação entre a concentração de CO<sub>2</sub> e a temperatura média global da atmosfera. Se recuarmos ainda mais no tempo encontramos longos períodos em que a temperatura média da atmosfera era bastante mais elevada do que a actual e não existiam calotes polares. É o

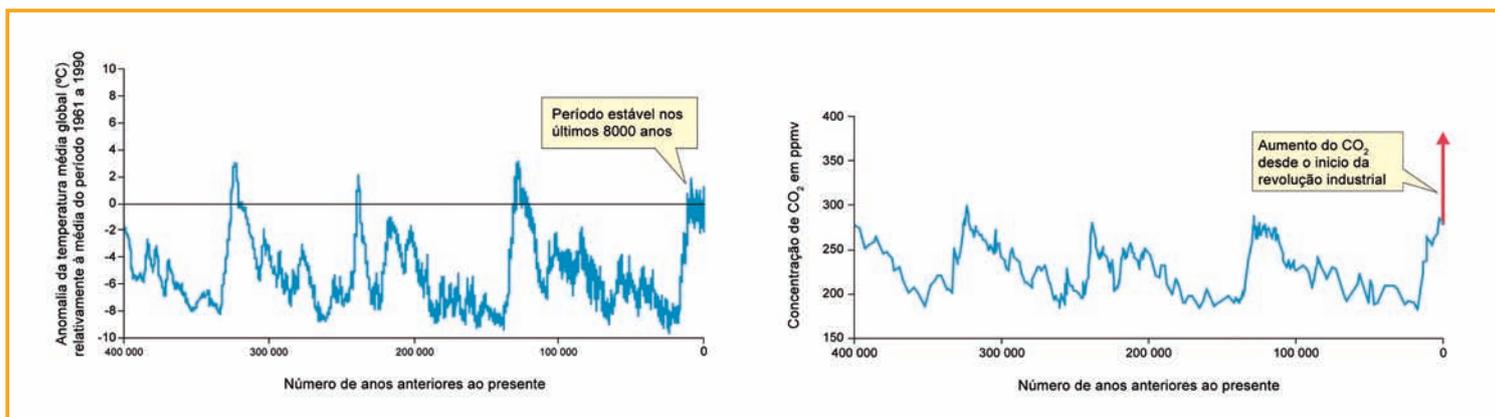


Fig. 1 - Reconstituição da evolução da temperatura média global da baixa atmosfera, representada por meio da anomalia relativamente à média do período de 1961 a 1990, e da concentração atmosférica do CO<sub>2</sub> nos últimos 400 000 anos [1]. Figura adaptada de [2]. Repare-se na correlação que se observa entre os dois registos. O aumento da concentração do CO<sub>2</sub> a partir da revolução industrial e até ao presente está indicado por um vector aproximadamente vertical devido à escala de tempo utilizada na figura.

caso, por exemplo do Cretácico. A alternância entre épocas de glaciação nas regiões polares e períodos relativamente quentes sem gelos polares é provavelmente causada pelos movimentos tectónicos e pelas alterações que provocam na circulação oceânica.

Durante as duas últimas décadas do século XX a taxa média anual do aumento da concentração do CO<sub>2</sub> foi de 1,5 ppmv, valor que é mais de cem vezes superior àquele que se registou nas últimas 6 transições dos períodos glaciares para os interglaciares. Estamos a modificar ligeiramente a composição da atmosfera ao aumentar a concentração de GEE e sabemos que o sistema climático tem uma resposta determinista a este forçamento, cuja principal característica é o aumento da temperatura média global da troposfera.

No conjunto das emissões antropogénicas de GEE as de CO<sub>2</sub> são as que mais contribuem para aumentar o efeito de estufa. Actualmente as emissões de CO<sub>2</sub> produzem um forçamento radiativo médio de 1,5 Wm<sup>-2</sup> correspondente a cerca de 60% do forçamento radiativo médio global das emissões antropogénicas de GEE. Com estas emissões estamos a perturbar o ciclo natural do carbono no qual os principais reservatórios são os oceanos com 40 000 GtC (gigatoneladas de carbono), o reservatório terrestre com uma quantidade menor, da ordem de 2050 GtC, e a atmosfera com cerca de 775 GtC, actualmente. Surpreendente é que, antes da revolução industrial a atmosfera continha apenas cerca de 600 GtC. O acréscimo de 175 GtC, num período da ordem de 250 anos resultou da acumulação de CO<sub>2</sub> na atmosfera provocada pelas emissões antropogénicas. No ciclo do carbono os principais sumidouros são os oceanos e as plantas, por meio da fotossíntese, enquanto que as principais fontes são a respiração das plantas, a decomposição da matéria viva, a combustão dos combustíveis fósseis e em muito menor escala a produção de cimento, as queimadas e os fogos florestais. A Tabela 1 indica os fluxos globais anuais de carbono sob a forma de CO<sub>2</sub> em Gt nas décadas de 1980 e 1990 apresentadas no 3º relatório do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) [4]. Valores positivos correspondem a fluxos para a atmosfera e negativos correspondem a retirar CO<sub>2</sub> da atmosfera. A soma algébrica dos valores médios dos três fluxos nas duas colunas da Tabela 1 iguala o valor médio do aumento anual da quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Repare-se na incerteza relativa-

mente elevada do valor do fluxo da atmosfera para a terra firme resultante da dificuldade em contabilizar todos os processos que envolvem trocas de CO<sub>2</sub> com a globalidade dos seres vivos e em decomposição.

## SINAIS DE UMA MUDANÇA CLIMÁTICA RECENTE

Para quantificar a mudança climática que resulta do aumento da concentração atmosférica de GEE e caracterizá-la em termos das outras variáveis meteorológicas é necessário recorrer a modelos de circulação geral da atmosfera que simulam o comportamento do sistema climático. Um dos principais métodos de validação destes modelos consiste em procurar reproduzir a evolução da temperatura média global observada desde que há medições com termómetros, ou seja, aproximadamente, desde finais do século XIX. Conclui-se que as observações são bem reproduzidas pelos modelos e ainda que o aumento da temperatura média global observado durante o século XX e especialmente depois da década de 1970 resulta, em grande parte, do aumento da concentração dos gases com efeito de estufa na atmosfera.

Há vários sinais de uma mudança climática que se têm acentuado nas últimas três décadas. Desde o início do século XX a temperatura média global da atmosfera à superfície aumentou de 0,6±0,2 °C [4]. Em algumas regiões continentais o aumento foi maior, como, por exemplo, na Europa onde o valor médio foi 0,95 °C. Nas últimas três décadas o aumento da temperatura média global é de 0,17±0,5 °C por década. Em Portugal Continental, durante o mesmo período, esse aumento foi maior: 0,47 °C por década na temperatura máxima e 0,48 °C por década na temperatura mínima [5].

Nas últimas décadas observou-se também uma maior frequência de fenómenos climáticos extremos. Maior frequência de episódios de precipitação intensa nas latitudes médias e altas e de secas em várias regiões de África, Ásia e Europa. No século XX e especialmente nos últimos 50 anos observou-se um recuo da grande maioria dos glaciares de montanha e uma redução da massa de gelo nas grandes altitudes que é compatível com as observações do aumento da temperatura média global da atmosfera durante o mesmo intervalo de tempo. Nas calotes polares a situação é também preocupante embora mais fácil de interpretar no

	1980 a 1989	1990 a 1999
<b>AUMENTO DO CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO</b>	3,3 ± 0,1	3,2 ± 0,1
<b>EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> PARA A ATMOSFERA</b> (queima de combustíveis fósseis e produção de cimento)	5,4 ± 0,3	6,3 ± 0,4
<b>FLUXO ATMOSFERA - OCEANO</b>	- 1,9 ± 0,6	- 1,7 ± 0,5
<b>FLUXO ATMOSFERA - TERRA FIRME</b>	- 0,2 ± 0,7	- 1,4 ± 0,7

Tabela 1 - Fluxos globais anuais de CO<sub>2</sub> em GtC (IPCC, 2001).

Ártico do que na Antártica. A área de gelos marítimos estivais no Ártico reduziu-se de 16 a 20% nos últimos 30 anos e na Gronelândia a área da camada de gelo, anualmente sujeita a fusão durante o verão, aumentou de 16% de 1979 a 2002 [6]. O aumento do nível médio do mar, observado na rede mundial de marégrafos durante o século XX, situou-se entre 1,0 e 2,0 mm/ano, valor que é cerca de 10 vezes superior ao valor médio estimado por meio de observações indirectas para os últimos 3 000 anos [4]. Este aumento é, na sua maior parte, provocado pela dilatação térmica da camada superficial dos oceanos, provocada pelo aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície e ao degelo dos glaciares das montanhas.

De acordo com os modelos climáticos todas estas tendências tendem a agravar-se no futuro. Contudo a severidade das alterações climáticas durante o século XXI e para além do século XXI depende de sermos ou não capazes de controlar a interferência antropogénica sobre o sistema climático estabilizando as emissões globais de GEE para a atmosfera para depois as diminuir até valores inferiores aos actuais. Este objectivo é extremamente difícil de atingir devido à enorme dependência do sector energético, a nível global, dos combustíveis fósseis e às profundas alterações no uso dos solos, especialmente a desflorestação nas regiões tropicais. Cerca de 80% das fontes primárias de energia a nível mundial são combustíveis fósseis e o consumo global de energia está a crescer a uma taxa de aproximadamente 2% por ano. Segundo as previsões da Agência Internacional de Energia [2], as emissões globais anuais de CO<sub>2</sub> vão aumentar 60% até 2030 relativamente a 2004 se não houver mudanças significativas nas políticas energéticas. Mais de dois terços do aumento das emissões provêm dos países em desenvolvimento que, provavelmente, continuarão a utilizar o carvão de forma intensiva.

## MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS ANTROPOGÉNICAS

Estamos perante um desafio de enorme grandeza frente ao qual é necessário e urgente identificar as respostas mais adequadas e pô-las em prática à escala nacional, regional e mundial. As alterações climáticas antropogénicas são já inevitáveis no século XXI e terão impactos na maior parte negativos sobre vários sistemas naturais e sociais. Há essencialmente dois tipos de respostas: a mitigação e a adaptação. A primeira consiste em combater as causas das alterações climáticas antropogénicas e traduz-se em acções que visam estabilizar a concentração atmosférica dos GEE por meio da redução das emissões globais e do desenvolvimento de sumidouros desses gases. A adaptação é um processo de resposta em que se procuram minimizar os impactos negativos das alterações climáticas nos diversos sistemas naturais e sociais. Os dois tipos de respostas são

complementares: poder-se-á dar mais ênfase a uma ou a outra, conforme a política climática, nos diversos níveis, nacional, regional ou internacional. Porém deve insistir-se sobretudo na mitigação com incidência global porque a partir de determinados limiares de concentração dos GEE os impactos das alterações climáticas tornam-se profundamente adversos, perigosos e alguns com consequências irreversíveis. Estamos perante um problema de poluição global para o qual todos os países contribuem embora de forma quantitativamente muito distinta. Os E. U. A., por exemplo, contribuem com cerca de 25% das emissões globais de CO<sub>2</sub> com apenas 4,3% da população mundial o que corresponde a uma emissão anual *per capita* de mais de 20 toneladas de CO<sub>2</sub>. Em contrapartida, a maior parte dos países em desenvolvimento têm taxas de emissão anuais *per capita* de apenas 2 toneladas de CO<sub>2</sub>. Na União Europeia (UE) a média das taxas de emissão anuais *per capita* é cerca de 9 toneladas e Portugal atingiu já, em 2001, o valor de 8,1 toneladas, deixando para a Suécia o valor mais baixo (7,9 toneladas) do conjunto dos 15 países que integravam a UE antes do recente alargamento.

Não existe qualquer relação entre a quantidade de emissões de um dado país e a sua vulnerabilidade aos impactos das alterações climáticas provocadas pelo conjunto global de emissões. Em geral os países em desenvolvimento são mais vulneráveis e simultaneamente os menos responsáveis pelo problema do aquecimento global. Estas considerações justificam que o principal princípio que deve fundamentar o regime climático futuro, especialmente no que respeita à mitigação, é a equidade entre países. Equidade no que respeita a compromissos de redução de emissões correlacionados com as emissões históricas e proporcionais ao esforço global de mitigação, a direitos iguais de acesso a uma atmosfera livre de uma interferência antropogénica perigosa sobre o clima, à capacidade de planear e pôr em prática medidas de adaptação às alterações climáticas eficazes e finalmente ao acesso a um desenvolvimento sócio-económico que no presente e num futuro próximo continuará inevitavelmente dependente da utilização dos combustíveis fósseis.

## COMO DEFINIR UMA INTERFERÊNCIA ANTROPOGÉNICA PERIGOSA SOBRE O SISTEMA CLIMÁTICO?

A questão está em saber até que ponto é tolerável interferir no sistema climático. Esta é a problemática visada na Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas cujo objectivo final, enunciado no seu Artigo 2º, refere “é o de conseguir... estabilizar a concentração na atmosfera de GEE, a um nível que evite uma interferência antropogénica perigosa com o sistema climático”. O problema está pois em definir o que se deverá entender por interferência perigosa sobre o sistema climático. Para estudar esta questão e encontrar respostas é necessário avaliar a

grandeza e as consequências dos impactos das alterações climáticas sobre os vários sistemas naturais e sociais com base em indicadores dessas alterações. Os indicadores mais importantes são o aumento da temperatura média global da troposfera, o aumento da frequência de fenómenos climáticos extremos, especialmente secas, períodos de precipitação muito intensa e ciclones tropicais, variações regionais dos regimes de precipitação, aumento da temperatura superficial dos oceanos, subida do nível médio do mar, degelo dos glaciares e campos de gelo das montanhas e dos gelos das calotes polares. De todos estes indicadores, o mais importante para caracterizar a mudança climática provocada pelo aumento da concentração de GEE é a temperatura média global da baixa atmosfera. Os outros têm correlações mais ou menos significativas com a temperatura média que porém estão ainda insuficientemente estudadas e conhecidas.

Desde a publicação do 3º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas [4] foram publicados muitos resultados novos sobre os riscos dos impactos num conjunto muito variado de sistemas naturais e sociais. No caso dos ecossistemas conclui-se que alguns deles tais como os recifes de coral [7] e algumas florestas tropicais [8] são gravemente afectados com aumentos da temperatura média global de apenas 1 °C. Entre 2 °C e 3 °C o número de ecossistemas que se tornam vulneráveis aumenta muito e a partir de 3 °C os impactos negativos são generalizados. Cerca de metade das reservas naturais mundiais são incapazes de se adaptar a uma mudança climática com um aumento de temperatura superior a 3 °C [9] o que implica impactos profundamente negativos na biodiversidade. Um estudo recente [10] indica que, em média, 10% das espécies de vários países europeus desaparecem para aumento de temperatura superior a 3 °C. Em geral os ecossistemas mais vulneráveis são as zonas húmidas, as regiões montanhosas e as regiões das grandes latitudes, especialmente no Ártico.

Aumentos de temperatura entre 3 °C a 4 °C terão impactos muito adversos na produção agrícola mundial e de acordo com [11] introduzem um risco adicional de insuficiência alimentar grave para 80 a 125 milhões de pessoas. O aumento da temperatura média global será acompanhado, muito provavelmente, por uma maior frequência de fenómenos climáticos extremos cujo impacto negativo é especialmente relevante nos recursos hídricos, agricultura, florestas, zonas costeiras e na saúde humana.

O tempo de resposta dos oceanos ao forçamento provocado pelo aumento da concentração atmosférica dos GEE é muito maior do que o da atmosfera, (Fig. 2). Se fosse possível interromper totalmente e imediatamente as emissões antropogénicas de GEE o nível médio do mar continuaria a subir durante pelo menos 500 anos devido à dilatação térmica das camadas mais profundas do oceano resultante

da lenta propagação do calor. Para além do aquecimento, os oceanos estão também a sofrer uma acidificação devida ao aumento da concentração do CO<sub>2</sub> dissolvido. Nos últimos 200 anos os oceanos absorveram cerca de metade do CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera em consequência das actividades humanas. Medições recentes permitem concluir que aquela absorção diminuiu o pH das águas oceânicas superficiais de 0,1 e que o decréscimo poderá atingir 0,5 até ao final deste século [12]. A taxa de redução do pH das águas oceânicas superficiais é provavelmente cerca de 100 vezes superior à que ocorreu durante alguns períodos nos últimos 650 000 anos e terá consequências gravosas na vida marinha, nas cadeias tróficas e especialmente nos processos de formação de conchas e corais.

O tempo de resposta dos gelos das calotes polares é ainda maior do que o dos oceanos (Fig. 2). Estudos recentes [14,15] indicam que um aumento da temperatura média na região do Ártico próximo de 3 °C inicia um processo irreversível de fusão da camada de gelo da Gronelândia durante um período de pelo menos 1000 anos. Estes resultados são preocupantes porque quando a temperatura média global aumenta de um determinado valor o acréscimo da temperatura média nas latitudes elevadas é maior. Um aumento da temperatura média global de 2 °C corresponde a um aumento de 4 °C a 8 °C no Ártico. A amplificação do aquecimento global nas regiões polares introduz um risco acrescido de início de um processo irreversível, na escala de vários milhares de anos, de fusão dos gelos. Note-se que a camada de gelo da Gronelândia contém cerca de 3x10<sup>6</sup> km<sup>3</sup> de gelo que ao fundirem completamente elevariam o nível médio do mar cerca de 7 m.

A análise, aqui apresentada de forma muito breve, dos impactos sobre os sistemas naturais e sociais e dos respectivos riscos sugeriu que seja considerada como interferência perigosa sobre o sistema climático aquela em que a temperatura média global aumenta de um valor superior a 2 °C, relativamente à média pré-industrial. Este limiar foi adoptado pela UE em 1996 e confirmado pelo Conselho Europeu em 2004.

## MEDIDAS DE MITIGAÇÃO PARA O PÓS-QUIOTO

Estabelecido o limiar de interferência perigosa em termos de um acréscimo da temperatura média, é necessário determinar qual o valor de estabilização da concentração dos GEE que lhe corresponde e quais as opções de calendarização do esforço de redução de emissões globais que permitem conduzir àquela estabilização. Esta relação é determinada pela sensibilidade do sistema climático definida como o aumento da temperatura média global que resultaria de uma duplicação da concentração atmosférica dos GEE, expressa em CO<sub>2</sub> equivalente, relativamente

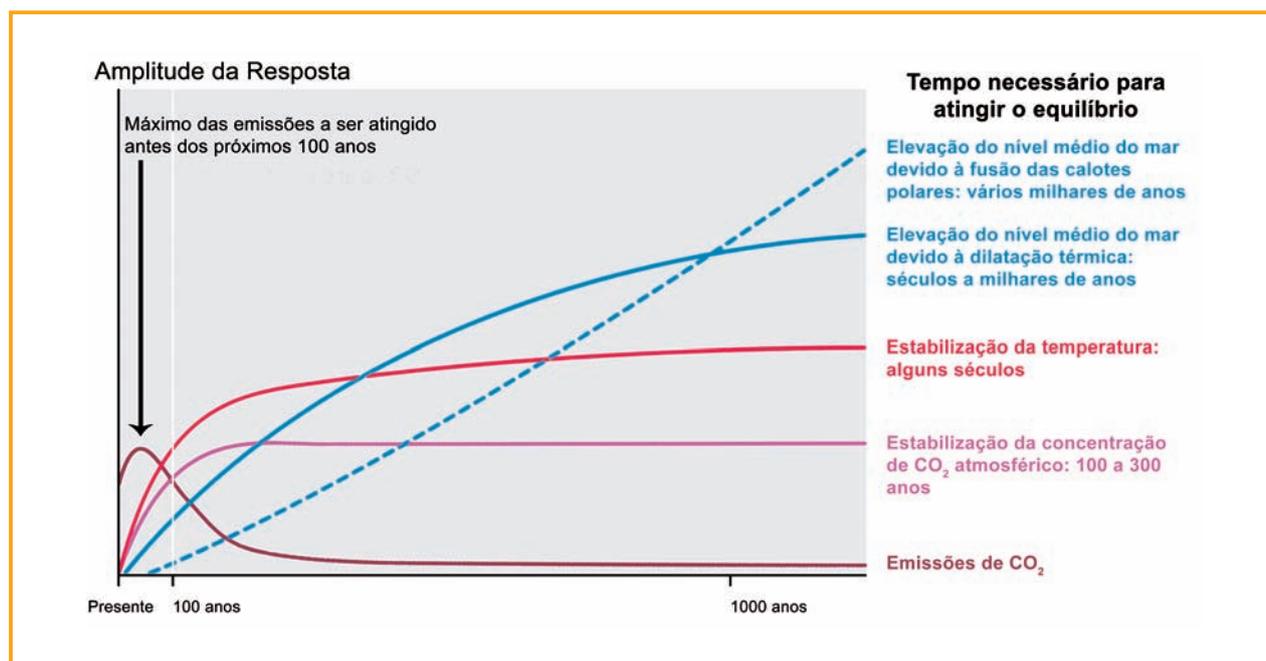


Fig. 2 - Evolução da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico, da temperatura média global da baixa atmosfera e do nível médio do mar induzida por uma evolução das emissões antropogênicas de CO<sub>2</sub> que atingem um máximo nos próximos 100 anos. Neste cenário a estabilização da concentração do CO<sub>2</sub> dá-se passados 100 a 300 anos e a estabilização da temperatura média global passados alguns séculos. No que respeita ao nível médio do mar a estabilização do seu aumento, provocado pela dilatação térmica e pelo degelo das calotes polares, dá-se passadas várias centenas de anos a mais de um milhar e passados vários milhares de anos, respectivamente. Figura adaptada de [13].

ao seu valor pré-industrial, ou seja, aproximadamente 550 ppmv. A sensibilidade climática é obtida por meio da simulação do sistema climático com modelos e há ainda alguma incerteza sobre o seu valor. O IPCC, no seu relatório de 2001 (IPCC, 2001), considera que há uma grande probabilidade de se situar no intervalo de 1,5 °C a 4,5 °C sendo 2,5 °C o valor mais provável. Estudos mais recentes [16] concluem que há uma probabilidade de 90% da sensibilidade climática se situar entre 2 °C e 4 °C. Para que o limiar de 2 °C seja atingido com uma probabilidade superior a 50% é necessário estabilizar as concentrações de GEE num valor inferior a 450 ppmv de CO<sub>2</sub> equivalente [17]. A realização deste objectivo requer que as emissões globais tenham um máximo antes de 2020 e que até 2050 tenham reduções da ordem de 30 a 50% relativamente às emissões globais de 1990.

É evidente que conseguir estes objectivos de redução das emissões globais de GEE é extremamente difícil e depende de uma concertação internacional envolvendo tanto os países desenvolvidos como os países em desenvolvimento, especialmente as economias em transição como é o caso da China, Índia, Brasil e Indonésia. No que respeita ao CO<sub>2</sub>, que é claramente o mais importante GEE no que respeita ao forçamento radiativo, a mitigação consiste essencialmente em diminuir a interferência antropogénica sobre o ciclo do carbono, tanto a nível das fontes como

dos sumidouros. O grande desafio que enfrentamos neste início do século XXI é pois o de diminuir o consumo mundial de combustíveis fósseis por meio da poupança de energia, utilização mais eficiente da energia primária, desenvolvimento das energias renováveis – solar, térmica e fotovoltaica, eólica, biomassa, geotérmica, ondas, marés – da energia nuclear, em especial a fusão nuclear, de novas tecnologias de produção de energia e da inovação científica e tecnológica no domínio da produção e utilização mais eficiente da energia.

Aliás importa salientar que o esforço de reduzir a dependência nos combustíveis fósseis é vital num futuro mais ou menos próximo devido ao esgotamento progressivo das reservas, especialmente de petróleo e gás natural. A nível global e a médio prazo a contribuição da energia nuclear de cisão para o total das fontes primárias de energia tenderá a diminuir, excepto, se as condições de preço e segurança do abastecimento do petróleo e gás natural se agravarem significativamente e/ou surgirem novas tecnologias competitivas de tratamento dos resíduos das centrais nucleares. Quanto à energia nuclear de fusão ela só será comercializável daqui a mais de 50 anos, numa perspectiva moderadamente optimista. Todos estes condicionalismos e incertezas indicam que só será possível controlar a interferência antropogénica sobre o sistema climático por meio da sequestração de CO<sub>2</sub>. A sequestração biológica através

da florestação, da reflorestação e de práticas agrícolas que favorecem a fixação do carbono nos solos é insuficiente para resolver o problema. Será necessário recorrer também à sequestração do CO<sub>2</sub> produzido na combustão de combustíveis fósseis em centrais térmicas ou em processos de separação do hidrogénio dos combustíveis fósseis, em depósitos subterrâneos, estanques a longo prazo, tais como reservatórios de petróleo e gás natural já explorados, antigas minas de carvão e aquíferos salinos [4].

Existe uma vasta bibliografia sobre os custos económicos de medidas de mitigação suficientemente eficazes para evitar uma interferência perigosa sobre o clima. Estimativas recentes indicam que uma redução de 50% das emissões globais de GEE relativamente a 1990 reduz o Produto Mundial Bruto (PMB) de 1 a 3% [18]. Esta é uma redução relativamente pequena tendo em atenção que se prevê um aumento anual do PMB entre 0,8 e 2,8% até ao final do século. O principal problema está em que o estabelecimento de um regime climático acordado a nível global é extremamente difícil sem primeiro assegurar a equidade entre países no acesso a padrões de qualidade de vida comparáveis. Por outras palavras sem primeiro anular a enorme e crescente disparidade no acesso à riqueza entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

- [1] Petit J.R. *et al.*, “Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica”, *Nature* **399**, 1999, 429-436.
- [2] IEA, International Energy Agency, World Energy Outlook, 2004.
- [3] Siegenthaler U. *et al.*, “Stable carbon cycle - climate relationship during the late Pleistocene”, *Science* **310**, 2005, 1313-1317.
- [4] IPCC, *Third Assessment Report of the Working Groups I, II and III*, 2001, Cambridge University Press.
- [5] SIAM, *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures* – SIAM Project, 2002, F.D. Santos, K. Forbes and R. Moita (eds.), Gradiva, Lisboa ([www.siam.fc.ul.pt](http://www.siam.fc.ul.pt)).
- [6] ACIA, *Impacts of a Warming Arctic, Arctic Climate Impact Assessment*, 2004, Cambridge University Press. ([www.acia.uaf.edu](http://www.acia.uaf.edu)).
- [7] Sheppard, C.R.C., “Predicted recurrences of mass coral mortality in the Indian ocean”, *Nature* **425**, 2003, 294-297.
- [8] Williams, S.E. *et al.*, “Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe”, *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, **270**, 2003, 1887-1892.
- [9] Leemans, R. and B. Eickhout, “Another reason for concern: regional and global impacts of ecosystems for different levels of climate change”, *Global Environment Change* **14**, 2004, 219-228.
- [10] M. Bakkenes *et al.*, “Ecosystem impacts of different climate stabilization scenarios”, *Global Environmental Change*, 2005, in press.
- [11] Parry, M. *et al.*, “Millions at risk: defining critical climate change threats and targets”, *Global Environmental Change* **11**, 2001, 181-183.
- [12] The Royal Society, “Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide”, *Policy Document*. **12/05**, June 2005.
- [13] IPCC, *Synthesis of the Third Assessment Report of Working Groups I, II and III*, R. T. Watson (eds.), IPCC, 2003.
- [14] Gregory, J.M. *et al.*, “Threatened loss of the Greenland ice sheet”, *Nature* **428**, 2004, 616.
- [15] Lowe, J. *et al.*, “The role of sea level rise and the Greenland ice sheet in dangerous climate change and issues of climate stabilization”, *Abstracts of the International Symposium on Stabilization of Greenhouse Gases: Avoiding Dangerous Climate Change*, 1-3 February 2005, Met. Office, Exeter, United Kingdom.
- [16] Murphy, J.M. *et al.*, “Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations”, *Nature* **430**, 2004, 768-772.
- [17] Hare, B. and N. Meinshausen, “How much warming are we committed to and how much can be avoided?” *PIK Report*, **93**, 2004, Potsdam.
- [18] Azar, C. and S.H. Schneider, “Are economic costs of stabilizing the atmosphere prohibitive?”, *Ecological Economics* **42**, 2002, 73-80.



# PORTAL DE ENSINO DAS CIÊNCIAS E DE CULTURA CIENTÍFICA

www.mocho.pt

Portal de Ensino das Ciências e de Cultura Científica

**CIÊNCIAS**

- FÍSICA**  
Autonomia, Ciências, Simulações, mais...
- MATEMÁTICA**  
Algebra Matemática, História da Matemática, Ensino da Matemática, Matemática Elementar, mais...
- ENSINO**
- BIBLIOTECAS - LIVROS - REVISTAS**  
Física, Química, Matemática, Outras, mais...
- RECURSOS**  
Programas, Congressos, Físico, Química, Matemática, Outros, mais...
- HUMANIDADES**
- LITERATURA**  
Revistas, Notícias, mais...
- QUÍMICA**  
Além de Moleculas, Laboratório de Química, Experimentos, Simulações, mais...
- OUTRAS CIÊNCIAS**  
Geologia, Biologia, Antropologia, Geografia Ambiental, mais...
- INSTITUIÇÕES**  
Escolas, Museus, Sociedades, mais...
- MUSEUS, ZOO E AQUÁRIOS**  
Portugal, Pesquisa, mais...

**Caça Notícias**

- Investigadores do IPO descobrem novo gene
- Mecanismo celular chave no cancro e infeções virais
- Gases com efeito de estufa continuam a aumentar
- Operação inédita em Portugal permite a paciente voltar a abrir boca
- Outras Notícias
- Jornais

**Banda Larga**

- Projecto Banda Larga
- Divulgação científica
- Videos com demonstrações

**Destaque**

- Tabela Periódica
- Roteiro de Ciência
- Astronot
- Magia dos Números
- Molecularium
- Nonus
- Gazeta de Física
- Jogo das Coisas
- Ozono
- Jogos TP
- Roleta Matemática
- Roleta Química
- Soc. Port. Química
- Soc. Port. Física
- Soc. Port. Mat.
- Clipart Química
- Concep
- Alternativas
- S. Conhecimento

Portal de Ensino das Ciências e de Cultura Científica

LOCAL > SOFTWARE > FÍSICA > GALILEU

**GALILEU**

Este programa apresenta uma simulação da viagem da sonda "Galileo" ao planeta Júpiter. O programa representa a trajetória desde sendo a Terra até Júpiter e, no fim, mostra, em animação, a descida de uma sonda atmosférica nesse planeta. A simulação pode incluir a representação dos vectores força ou velocidade da sonda em cada instante.

**SPONSORIZADO POR**

- CEITEC - Física
- CEITEC - Química
- COLABORAÇÕES
- Cinet

Portal de Ensino das Ciências e de Cultura Científica

**MAPA**

**O MOCHO :: O MOCHO RESPONDE**

**O Mocho Responde**

O Mocho Responde pretende ser um meio de discussão sobre matérias científicas onde professores, cientistas e público em geral podem expor dúvidas, opiniões, factos e explicações.

Podem colocar questões e responder a questões levantadas por outros. Para colocar uma questão abra a pasta que condiz com o assunto que pretende abordar, clique sobre levantar questão e preencha o formulário.

Para ler uma questão ou resposta clique sobre o título, o que abrirá uma nova página. Se desejar responder, clique em responder e preencha o formulário.

O ícone antes da questão/resposta indica que a mesma foi colocada por um cientista ou professor. O identifica o público em geral.

**Ver ainda**

- ANTROPOLOGIA
- ASTRONOMIA

APOIOS:



É feita uma breve descrição das principais tecnologias para aproveitamento da energia solar por via térmica, disponíveis hoje em Portugal.

São referidas as oportunidades que resultam da exploração das tecnologias solares ditas passivas (o aproveitamento directo da energia solar na própria concepção/configuração e estrutura dos edifícios) e das tecnologias activas, com vários tipos de colectores solares e respectivas aplicações principais.

É referido o potencial em Portugal - do ponto de vista de energia final e energia primária - resultante da exploração da energia solar quer na área dos edifícios, quer na sua aplicação do tipo activo mais comum, a do aquecimento de água.

São apresentadas estimativas do impacte que estas tecnologias poderão ter para o cumprimento do Protocolo de Quioto, através do cálculo da redução de emissões de gases de efeito de estufa que resultará da sua adopção.

MANUEL COLLARES PEREIRA

Departamento de Energias Renováveis do INETI  
Estrada do Paço do Lumiar  
1649-038 Lisboa

Departamento de Física do IST  
Av. Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa

collares.pereira@ineti.pt

# A ENERGIA SOLAR APLICAÇÕES TÉRMICAS

Portugal é um país sem recursos energéticos de origem fóssil, mas rico em recursos renováveis [1,5]. Recentemente tem aumentado entre nós a sensibilidade para o potencial que representam, sobretudo para a produção de electricidade, em particular através de uma importante estratégia de desenvolvimento da energia eólica. Contudo, a contribuição das energias renováveis vai muito para lá da questão da electricidade. Esta representa, afinal, apenas pouco mais de 20% da energia final total no nosso país.

Um exemplo concreto é o da energia solar, aliada ao clima suave de que beneficiamos. As aplicações desta forma de energia, exclusivamente no plano térmico, podem representar uma contribuição em termos de energia final superior à que resultará da energia eólica, mesmo quando estiverem instalados os 5000 MW que constituem o (notável) objectivo actual da nossa política energética nesta área.

Contudo, e apesar da abundância deste recurso solar (talvez o melhor da Europa), não temos ainda objectivos de política energética claros nesta matéria e uma abordagem que permita explorá-lo a fundo.

A curto prazo, as principais contribuições potenciais da energia solar na área da térmica são seguramente ao nível do aquecimento de água (sanitária, de processo industrial, etc.) e do aquecimento/arrefecimento ambiente.

Estas concretizam-se por duas grandes vias: as tecnologias solares passivas e as tecnologias solares activas, brevemente caracterizadas em seguida.

## TECNOLOGIAS SOLARES PASSIVAS

Estas tecnologias exploram o facto de qualquer edifício (que necessita de energia para aquecimento e arrefecimento) poder ser pensado, orientado, exposto à radiação solar (e também protegido dela), dotado de inércia térmica apropriada, bem isolado e naturalmente ventilado,

# AR: TÉRMICAS

integrado na sua envolvente urbana ou outra, por forma a reduzir de forma substancial a energia necessária para a sua climatização, ventilação e iluminação. Atendendo a que só o sector residencial e de serviços é responsável por um consumo em energia final de cerca de 23% (e onde se verifica uma das maiores taxas de aumento de consumo de energia em Portugal) percebe-se o enorme potencial que existe nesta utilização directa da energia solar, quer em novas construções quer na recuperação das construções existentes. Contudo esta contribuição não aparecerá directamente nas estatísticas da energia! Trata-se de evitar um consumo e ninguém pode depois medir esta contribuição de forma directa. Mas, se não implementarmos estas tecnologias, o sector residencial e de serviços poderá muito facilmente atingir os 30% de energia final em menos de 10 anos! Evitar este aumento de uso de energia final de 7% corresponderia a uma contribuição superior à contribuição potencial da energia eólica no mesmo período.

A implementação deste imenso potencial faz-se perfeitamente no âmbito das capacidades das actuais indústrias de construção e de materiais em Portugal, das capacidades de projecto e engenharia existentes e a um custo realmente baixo, que não depende de qualquer tipo de subsídio, ou ajuda de qualquer espécie, para se realizar. É apenas uma questão de tornar prática comum o que ainda o não é, uma questão de mudança cultural, quer dos consumidores (cidadãos que desconhecem este potencial, logo não o exigem) e prestadores de serviços habituados a proceder de uma forma diferente para um mercado que não os condiciona a uma prestação distinta.

Precisamente por isso está prestes a sair (mas sairá realmente quando?) uma nova regulamentação na área dos edifícios [2] que permite tornar a dificuldade inerente ao tempo que levam os processos puramente culturais a fazer o seu caminho, um tempo demasiado longo e que não podemos desperdiçar na situação em que estamos de sermos importadores de combustíveis fósseis para cerca de 90% da energia que usamos!

## TECNOLOGIAS SOLARES ACTIVAS

O segundo grupo de tecnologias utiliza os chamados colectores solares, equipamentos específicos destinados à captação da energia solar e sua posterior entrega a um sistema concreto de transformação/utilização.

Os mais comuns são os chamados colectores planos [3], placas negras, sensivelmente planas, colocadas dentro de caixas isoladas, com uma tampa de vidro transparente por cobertura. Água ou ar circula numa rede de tubos ou canais a elas associados, sendo assim aquecida. A aplicação poderá ser água quente sanitária, água quente de processo, calor ambiente, água de piscina aquecida, etc.

Contudo se a aplicação exigir uma temperatura mais elevada é necessário recorrer a formas de reduzir as perdas térmicas dos colectores solares, com utilização de materiais cujas propriedades ópticas sejam favoráveis à redução das perdas por radiação (recobrimentos ditos selectivos [3]), com recurso ao vácuo para redução/eliminação das perdas por convecção e condução e ainda pelo recurso a ópticas capazes de concentrar a radiação solar sobre um absorvedor progressivamente mais pequeno, para temperaturas progressivamente mais altas [4,5].

Em Portugal existe uma competência particular nesta área, com os colectores do tipo CPC (Fig. 1), aplicação de uma óptica dita “não produtora de imagem” (*non-imaging*), e que permitem combinar atributos dos colectores planos e dos concentradores convencionais (focalizantes ou *imaging*) [4,5].

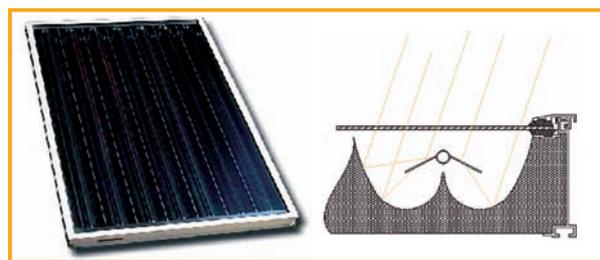


Fig. 1 - Colector solar do tipo CPC; fotografia do colector e pormenor em corte transversal.

Muitas aplicações tornam-se assim possíveis a temperaturas mais altas que as tipicamente fornecidas pelos colectores planos.

Em primeiro lugar merece destaque a possibilidade de se fazer frio com energia solar térmica, quer para refrigeração quer, e sobretudo, para condicionamento de ar. Outra possibilidade interessante é a do calor de processo a temperaturas em torno dos 100 °C e mesmo a produção de

vapor para fins industriais tem hoje já tecnologias disponíveis à espera de oportunidades reais de demonstração.

A produção de vapor (ou ar) a temperaturas mais altas é também possível e isso abre à energia solar térmica a possibilidade de contribuir para a produção de electricidade em centrais em tudo idênticas às centrais fósseis térmicas convencionais e a custos substancialmente inferiores aos da via da conversão solar directa, actualmente constituída pelo fotovoltaico, na vertente da produção centralizada.

Perspectivam-se já alguns projectos desta natureza para Portugal, ainda ao nível da demonstração [6].

No futuro teremos ainda outras aplicações resultantes da energia solar concentrada e fornecida a alta temperatura. Por exemplo: na produção de combustíveis a partir da pirólise da biomassa, nas tecnologias limpas do carvão, no processamento de materiais, na produção de hidrogénio (termólise da água), etc. Contudo, não há qualquer plano para se investir em Portugal neste sector ao nível da investigação e desenvolvimento, situação que urge corrigir já que temos condições para uma excelente contribuição, com grande interesse potencial.

Entretanto emergem como imediatamente disponíveis, outras aplicações muito interessantes como sejam: (i) a possibilidade de cozinhar usando energia solar [7] (Fig. 2); (ii) a de dessalinizar a água do mar [8]; (iii) a de descontaminar efluentes líquidos, quimicamente contaminados [9]; e (iv) a produção de água potável a partir de águas de superfície, biológica e organicamente contaminadas [10].



Fig. 2 - Forno solar do tipo caixa com óptica CPC<sup>1</sup> incorporada.

Nestes dois últimos casos não é tanto a térmica solar que está em jogo mas sim o recurso ao espectro solar ultravioleta na presença de catalisadores. Existe muita investigação e desenvolvimento neste tópico em Portugal, ao nível institucional e empresarial, em colaboração com inúmeras empresas e instituições europeias, da América Latina e africanas.

Nesta breve abordagem à energia solar térmica activa, importa dar uma ideia do modo como é utilizada em Portugal, comparando com outros países da União Europeia (UE), indicando qual é a sua contribuição potencial e

referindo ainda as principais vantagens para o país de uma política que conduza à exploração desse potencial.

Em termos comparativos pode-se observar (Tabela 1) que o recurso à energia solar térmica activa em Portugal é muito inferior ao de outros países da UE, o que é um facto surpreendente, dado sermos o país com melhor recurso solar da UE e de termos tecnologia e engenharia de qualidade, nesta área. A Tabela 1 resume a situação para os países da UE (a quinze) (dados até 2002 e estimados para 2003 e 2005).

Na realidade presume-se que o nosso mercado em 2003 tenha sido da ordem de 9000 m<sup>2</sup>/ano [14]. Pode apreciar-se este valor em comparação com o da Alemanha (acima de um milhão de metros quadrados por ano) ou com os da Áustria e Grécia, na ordem de 24 vezes superiores ao nosso em termos anuais. E já com mais de três milhões de metros quadrados instalados no caso da Grécia, que é, aliás, o maior exportador europeu de colectores solares (mais de metade da sua produção anual).

Em metros quadrados de colectores solares instalados *per capita*, a situação em 2003 era a seguinte: Alemanha - 0,07; Áustria - 0,27; Grécia - 0,32; Portugal - 0,02. A nossa situação é muito inferior à da Alemanha e Áustria (que têm um recurso solar, em particular a Alemanha, bastante inferior ao nosso) e à da Grécia, país a muitos títulos comparável com Portugal, e que, neste particular, nos leva uma imensa vantagem.

Num estudo feito em 2001 [1], estimou-se que o número de metros quadrados a instalar para aquecer toda a água quente utilizada em Portugal, em todos os sectores, seria de 14,7 milhões de metros quadrados.

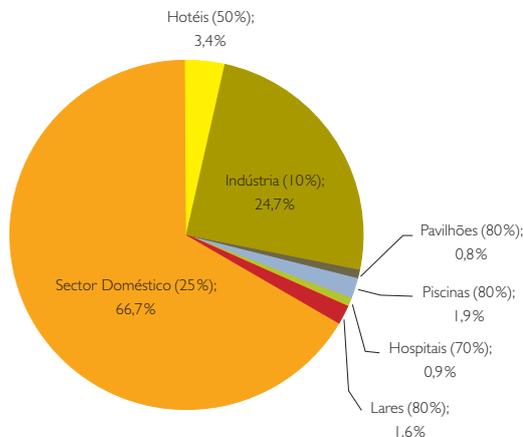


Fig. 3 - Distribuição do potencial de instalação de equipamento solar térmico por sector de actividade (adaptado de [1]).

PAÍS	Área acumulada de colectores solares (1975-2001) [m <sup>2</sup> ]	% mercado na UE 15	DESENVOLVIMENTO DO MERCADO					
			Área instalada em 2000 [m <sup>2</sup> ]	Área instalada em 2001 [m <sup>2</sup> ]	Crescimento do mercado [%]	Área instalada em 2002 [m <sup>2</sup> ]	Previsão de área instalada em 2003 [m <sup>2</sup> ]	Previsão de área instalada em 2005 [m <sup>2</sup> ]
ÁUSTRIA	1 791 000	17%	150 000	165 000	10%	180 000	200 000	220 000
BÉLGICA	26 900	0%	3 400	4 000	18%	5 500	8 000	15 000
DINAMARCA	332 000	3%	25 000	26 000	4%	10 000	6 000	6 000
FINLÂNDIA	26 000	0%	7 000	7 000	0%	9 000	12 000	20 000
FRANÇA (UE)	329 700	3%	15 000	18 700	25%	36 000	80 000	220 000
ALEMANHA	3 805 000	35%	615 000	1 000 000	63%	900 000	1 000 000	2 000 000
GRÉCIA	2 995 000	28%	170 000	180 000	6%	200 000	220 000	250 000
IRLANDA	2 100	0%	400	500	25%	1 000	1 500	3 000
ITÁLIA	307 000	3%	28 000	35 000	25%	42 000	50 000	80 000
HOLANDA	204 000	2%	27 500	30 500	11%	37 000	45 000	75 000
NORUEGA	9 500	0%	2 000	2 500	25%	2 500	2 500	2 500
PORTUGAL	231 000	2%	5 500	6 000	9%	8 000	10 000	13 000
ESPANHA	409 000	4%	41 000	55 000	34%	80 000	130 000	220 000
SUÉCIA	195 200	2%	18 200	20 000	10%	20 000	25 000	30 000
SUIÇA	295 000	3%	27 000	27 000	0%	30 000	33 000	40 000
REINO UNIDO	168 500	2%	10 000	17 500	75%	20 000	25 000	50 000
TOTAL (UE 15)	10 831 900	100%	1 118 000	1 567 700	40%	1 551 000	1 815 000	3 204 500

Tabela 1 - Desenvolvimento do mercado do solar térmico na UE dos 15 (adaptado de [13]).

Realisticamente considerou-se que seria possível, em 10 anos, instalar 2,8 milhões de metros quadrados (a Grécia tinha feito mais ou menos isso nos últimos 10 anos!), de acordo com a Fig. 3, a que se acrescenta uma indicação da percentagem de conversão, consumo a consumo, em relação ao universo total, que essa quantidade implicava.

Subsequentemente o Programa E4 [11] veio estabelecer como meta para 2010, um milhão de metros quadrados de colectores solares. Estabeleceu também ser fundamental garantir a qualidade dos equipamentos, dos projectistas e dos instaladores. Para se chegar a esta meta não se deram ainda os passos necessários. Apesar de tudo, iniciativas importantes aconteceram na área da garantia de qualidade, com a certificação de colectores e de sistemas domésticos integrados [12] e com a formação de projectistas e instaladores em instituições como o Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI), o Instituto Português da Qualidade (IPQ), o Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), etc.

Para se ter uma ideia da importância de se alcançar estes objectivos, faz-se em seguida uma breve análise das suas principais consequências e uma comparação com os objectivos da energia eólica.

Como se referiu de início, o actual Governo elegeu como meta para a energia eólica 5000 MW instalados até 2010. Actualmente já estão instalados cerca de 1000 MW [17].

Um colector solar plano para aquecimento de água em Por-

tugal pode considerar-se que produz, em média, 750 kWh/m<sup>2</sup>/ano de energia útil, sob a forma de água quente [8].

Assim, se instalássemos um milhão de metros quadrados teríamos 750 GWh de energia útil por ano e, naturalmente com 2,8 milhões de metros quadrados atingir-se-iam os 2100 GWh.

Dado que 1000 MW de origem eólica produzirão, em média, [17] 2200 GWh de electricidade (energia final) por ano, pode concluir-se que aquele potencial de energia solar térmica é equivalente ao que está a ser realizado pela energia eólica, actualmente!

Se realizássemos todo o potencial associado ao aquecimento de água, 14,7 milhões de metros quadrados, teríamos uma contribuição idêntica (11 TWh por ano) à que resultará da contribuição da energia eólica em igual período, uma vez atingida a meta dos 5000 MW.

Em termos de energia final (EF) e de energia primária (EP), 1 milhão de metros quadrados e 2,8 milhões de metros quadrados de colectores solares representam (admitindo que substituem sobretudo o gás e a electricidade - com o *mix* verificado em 2002 [15] de combustíveis fósseis na sua produção - no sector doméstico) os valores referidos na Tabela 2, onde também se indicam, em percentagem, o que isso representa em relação aos valores globais de 2002.

Utilizando esta informação e os valores actuais da unidade de energia importada, é possível calcular o que representa a contribuição solar da Tabela 2, em cada um dos casos.

Área de colectores solares (milhão de m <sup>2</sup> )	EF (Ktep)	EP (Ktep)	% EF (2002)	% EP (2002)
1	106,3	124,6	0,6%	0,5%
2,8	297,5	348,8	1,6%	1,3%

Tabela 2 - Energia produzida em função da área de colectores instalada.

Com o petróleo a U.S.\$65,00/barril a ordem de grandeza da poupança com a redução da quantidade de combustíveis importados é da ordem de 15,5 milhões de euros/ano, no caso de 1 milhão de metros quadrados e de 46,4 milhões de euros/ano, no caso de 2,8 milhões de metros quadrados de colectores.

No que respeita à redução de emissões de gases equivalentes de efeito de estufa (GEE), quanto se pode esperar de uma contribuição desta ordem de grandeza?

Um equipamento solar com 4 metros quadrados, instalado em nossa casa para aquecer água, evita tantas emissões de GEE quanto as que um carro emite em média a viajar 10 000 km/ano, com um consumo de 8 litros aos 100 km.

Em termos globais, a instalação de 1 milhão de metros quadrados e de 2,8 milhões de metros quadrados de colectores solares correspondem [15] aos valores referidos na Tabela 3, em Mt de dióxido de carbono equivalente, num cenário de consumos energéticos em 2010.

Área de colectores solares (milhão m <sup>2</sup> )	Emissões evitadas (Mt CO <sub>2</sub> equiv.)		
	GN, GPL, Elec (Mix)	GN, GPL, Elec (GN CC)	GN, GPL, Elec (Carvão)
1	0,312	0,251	0,369
2,8	0,873	0,704	1,034

Tabela 3 - Emissões de GEE evitadas em função da área de colectores instalada (2010) (GN-Gas Natural, GN CC, Gás Natural Ciclo Combinado).

No cenário de 2002, aquelas emissões correspondem aos valores referidos na Tabela 4.

Os diferentes valores são obtidos quando se considera que a electricidade que se evita consumir é produzida: (i) pelo *mix* actual de todos os combustíveis que contribuem para a sua produção; (ii) apenas por gás em ciclo combinado; ou (iii) apenas por carvão. Deveria ser este último valor o considerado para este efeito de emissões evitadas em cálculos oficiais, pois o solar, combinado com electricidade em tarifário bi-horário (a melhor combinação solar/convenção quando a electricidade constitui o *back-up* ao solar), reduz mesmo o consumo de electricidade na base do diagrama e não nas horas de ponta. Aliás em 50% do ano

Área de colectores solares (milhão m <sup>2</sup> )	Emissões evitadas (Mt CO <sub>2</sub> equiv.)		
	GN, GPL, Elec (Mix)	GN, GPL, Elec (GN CC)	GN, GPL, Elec (Carvão)
1	0,404	0,329	0,438
2,8	1,130	0,922	1,227

Tabela 4 - Emissões de GEE evitadas em função da área de colectores instalada (2002).

a contribuição solar não exige praticamente *back-up*.

Nesta perspectiva e sabendo que o *deficit* para o cumprimento do Protocolo de Quioto se situa [16] em torno das 18 Mt, esta contribuição corresponde a uns respeitáveis 2% a 6%, consoante os valores tomados como referência, uma contribuição importante para a redução das multas que resultarão do incumprimento de Quioto. A actual legislação [16] já prevê multas de 40 euros/t, até um determinado valor máximo, mas é muito provável que subam pelo menos para 100 euros/t em 2010, sem restrições.

Mas há outras consequências muito importantes de uma opção explícita e forte pelo recurso à energia solar térmica activa no aquecimento de água. Destacam-se:

- O desenvolvimento de uma nova actividade económica, com a criação de milhares de novos empregos, na indústria, no comércio, na engenharia, nas instalações técnicas;
- O desenvolvimento de uma nova capacidade para exportação;
- A poupança para o utilizador;
- Um maior conforto e qualidade de vida;
- Um passo importante - indispensável - no caminho da sustentabilidade.

O terceiro ponto merece um comentário breve. Na realidade a energia solar exige um investimento feito de início, com zero de desembolso (manutenção à parte) durante o tempo de vida do sistema, normalmente superior a 15 anos. Nesse sentido é diferente da forma convencional de gastar dinheiro com a energia para aquecer água: um desembolso constante e permanente. Quer isto dizer que, ao fim de um período curto, (hoje entre 5 e 8 anos no caso do doméstico e frequentemente abaixo de 4 anos no caso da indústria, serviços, etc.) o investimento inicial se recupera e a energia fica gratuita por muitos mais anos. É neste sentido que o solar e as energias renováveis em geral são uma fonte de energia "económica". A forma de gastar o dinheiro é que é diferente!

## CONCLUSÃO

A energia solar pode contribuir de uma forma muito significativa para reduzir a nossa actual dependência dos

combustíveis fósseis e os impactes ambientais a eles associados, no sentido do cumprimento dos compromissos de Quioto. Mostrou-se como apenas com a energia solar passiva e com o aquecimento de água com colectores solares se pode obter uma contribuição somada superior ao resultado esperado da contribuição da energia eólica. Se for adicionada a contribuição do solar activo noutras áreas- climatização, produção de electricidade por via térmica, e muitas outras - percebe-se que o solar tem um potencial enorme num país como o nosso. Que esperamos para adoptar a energia solar térmica nas nossas vidas de todos os dias? Que discurso nos convencerá à mudança de cultura que a sua adopção representa?

Não seria uma excelente ideia aceitar como boa a palavra dos especialistas e tornar o solar obrigatório, pelo menos nos novos edifícios ou em remodelações dos existentes, levando os portugueses a fazer, por imposição hoje, aquilo que farão por cultura amanhã, ganhando desde já conforto e dinheiro? É isso que se propõe para os novos edifícios nos novos regulamentos referidos [2], os quais se espera que sejam aprovados muito em breve.

Entretanto é fundamental apostar na investigação e desenvolvimento para fazer evoluir de forma permanente a tecnologia que já existe (e de qualidade!) em Portugal nesta área da energia solar e para produzir as novas tecnologias e os produtos que correspondem às outras aplicações da energia solar e que ainda estão longe do mercado.

## REFERÊNCIAS

- [1] *Fórum Energias Renováveis* - publicação INETI, 2002.
- [2] *Regulamentos*: RCCTE e RSECE.
- [3] John A. Duffie and William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, 1980.
- [4] Ari Rabl, *Active solar collectors and their applications*, Oxford University Press, 1985.
- [5] Manuel Collares Pereira, *Energias Renováveis: a Opção Inadiável*, SPES, 1998.
- [6] Manuel Collares Pereira, “O solar térmico e a produção de electricidade”, *Energias Renováveis*, SPES, #55, 2005.
- [7] M. Collares Pereira, J. P. Almeida and J. Correia de Oliveira “Description and testing of a novel solar box type cooker incorporating CPC type optics” ISES Solar World Congress, Goteborg, June, 2003.
- [8] Manuel Collares Pereira, João Farinha Mendes and Pedro Horta, - “Advanced solar dryer for salt recovery from brine effluent from Desalination MED plant”, Eurosun, Freiburg, June 2004
- [9] M. Collares Pereira, S. Malato, J. Blanco, M.I. Maldonado, P. Fernández, D. Alarcón, J. Farinha Mendes and J. Correia de Oliveira, “Engineering of Solar Photocatalytic Collectors”, *Solar Energy* 77 (2004) 513-524.
- [10] M. Collares Pereira and Julio Chaves “New CPC solar collector for planar absorbers immersed in dielectrics. Application to the treatment of contaminated water”, aceite em *Journal for Solar Energy Engineering* (2005).
- [11] E4 - Eficiência Energética, Energias Endógenas, Programa do Governo PS (2001) e Informação Energia, #27 2002, DGGE
- [12] LECS Laboratório de Ensaio de Colectores Solares (INETI [www.ineti.pt](http://www.ineti.pt)); CERTIF ([www.certif.pt](http://www.certif.pt))
- [13] ESTIF - European Solar Thermal Industry Federation, Renewable Energy House 26, Rue du Trone B-1000 Bruxelles.
- [14] APISOLAR - Associação Portuguesa dos Industriais da Energia Solar ([www.apisolar.pt](http://www.apisolar.pt))
- [15] M.Collares Pereira, Pedro Horta e Ricardo Aguiar, “As emissões de GEE evitadas pelo recurso às energias renováveis: caso concreto da Energia Solar”, RESB #53,2004
- [16] Pacote Legislativo “Alterações Climáticas - Vencer na Economia do Carbono” Ministério do Ambiente, Janeiro 2003
- [17] Ana Estanqueiro, “Energia Eólica: o desenvolvimento em Portugal, na Europa e no Mundo” - Energias Renováveis, SPES, #55, 2005

## NOTAS

<sup>1</sup> Cortesia da empresa AO SOL, Energias Renováveis, Lda ([www.aosol.pt](http://www.aosol.pt)).

<sup>2</sup> Cortesia da empresa SUN-CO, Companhia de Energia Solar S.A. ([sun-cook.com](http://sun-cook.com), [www.sun-co.pt](http://www.sun-co.pt)).

A energia solar fotovoltaica vai desempenhar um papel cada vez mais relevante na produção de energia eléctrica nas próximas dezenas de anos. A produção actualmente cresce acima de 30%/ano, estimulada por políticas de incentivo, tendo ultrapassado o marco de 1 GW anual de potência instalada. No entanto, a viabilidade da sua penetração em larga escala no mercado da energia depende da evolução das tecnologias no sentido da redução do seu custo. O momento actual é extremamente interessante, porque ainda não se vislumbra sequer quais das numerosas tecnologias em investigação poderão vir a impor-se e nem sequer o material de base está decidido. Portugal tem uma janela de oportunidade para participar activamente nesta corrida e na criação de uma indústria de impacte mundial.

ANTÓNIO VALLÊRA

Centro de Física da Matéria Condensada, Edifício C8,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,  
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

amvallera@fc.ul.pt

# ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Um dos principais argumentos usados para desvalorizar a energia da radiação solar é que nunca será suficiente para satisfazer as necessidades humanas. Façamos alguns cálculos: a radiação que nos chega do Sol tem uma intensidade, ao nível da órbita da Terra,  $S = 1367 \text{ W/m}^2$ , a chamada constante solar. A partir do valor de  $S$  e do raio da órbita de Terra  $R$  é fácil calcular a potência total radiada pelo Sol:

$$P = S \times 4 \pi R^2 = 3,87 \times 10^{26} \text{ W}$$

Para termos a noção da grandeza deste número: a energia radiada pelo Sol num segundo daria para satisfazer as necessidades energéticas mundiais actuais durante um milhão de anos! (Fig. 1).

Mas voltemos à Terra e pensemos no nosso país: que área seria necessária para satisfazer o nosso consumo eléctrico médio actual de cerca de 5 GW? É fácil verificar que, com uma eficiência de conversão de 15% (tecnologia actual), bastaria um quadrado com cerca de 5 km de lado coberto de células solares expostas à radiação de intensidade  $S$ , ou seja, colocado no espaço.



Fig. 1 - A energia da radiação solar incidente sobre a Terra é cerca de 40 000 vezes o consumo actual mundial de energia eléctrica. Com a tecnologia actual, 20 m<sup>2</sup> de painéis fotovoltaicos por pessoa seriam suficientes para satisfazer o consumo *per capita* português actual.

Desçamos à superfície da Terra. Aqui há dia e noite, há atmosfera com nuvens, e os raios solares vão variando a sua inclinação ao longo do dia: cada um destes três efeitos contribui com um factor de cerca de  $\frac{1}{2}$  para a média da radiação solar que incide na superfície terrestre relativamente ao espaço, pelo que a área necessária na Terra será da ordem de 8 vezes a área necessária no espaço, ou seja, cerca de 200 km<sup>2</sup>. Claro que a situação não é a mesma em todas as regiões da Terra: nos trópicos haverá mais radiação que nos pólos. Portugal situa-se numa posição muito favorável: sabemos que Portugal tem muito sol. Mas é menos conhecido o facto de ser o país da Europa continental com maior radiação solar média: temos em média mais luz solar do que a Espanha, a Itália ou a Grécia. A radiação solar média em Portugal é 1500 kWh m<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>.

Tomando este valor e uma eficiência de conversão de 15%, chegamos a uma área necessária de cerca de 200 km<sup>2</sup>. Vejamos o que quer dizer este número:

- aproximadamente 20 m<sup>2</sup> por pessoa;
- da ordem de grandeza da área disponível nas construções urbanas;

- muito menor que a área das estradas.

Por outras palavras, seria até concebível cobrir toda a nossa necessidade de energia eléctrica com painéis solares fotovoltaicos! Poderemos ainda argumentar que a energia fotovoltaica:

- usa um “combustível” universal e gratuito;
- não polui;
- não tem partes móveis, dura mais de 30 anos praticamente sem manutenção;
- é modular, logo facilmente expansível;
- melhora a estética dos edifícios, podendo substituir revestimentos (telhados ou fachadas);
- melhora a rede eléctrica local e descentraliza (democratiza) a produção de energia.

O que nos impede então de aplicar massivamente células solares fotovoltaicas?

Cada watt de potência eléctrica fotovoltaica instalada em Portugal produzirá cerca de 1,5 kWh/ano. Contando com uma vida útil de 30 anos, a energia total produzida por 1W instalado será de 45 kWh. Se atribuirmos ao quilowatt (kWh) produzido junto ao consumidor um valor de dez centimos, o valor total da energia produzida será 4,5 euros. Para uma penetração massiva no mercado da energia (Fig. 2) o preço do watt instalado tem de ser bem inferior a este valor, o que ainda não sucede: este valor é aproximadamente o custo actual da instalação de um watt.

A nível mundial, a energia fotovoltaica conhece desde há aproximadamente 10 anos um crescimento de cerca de

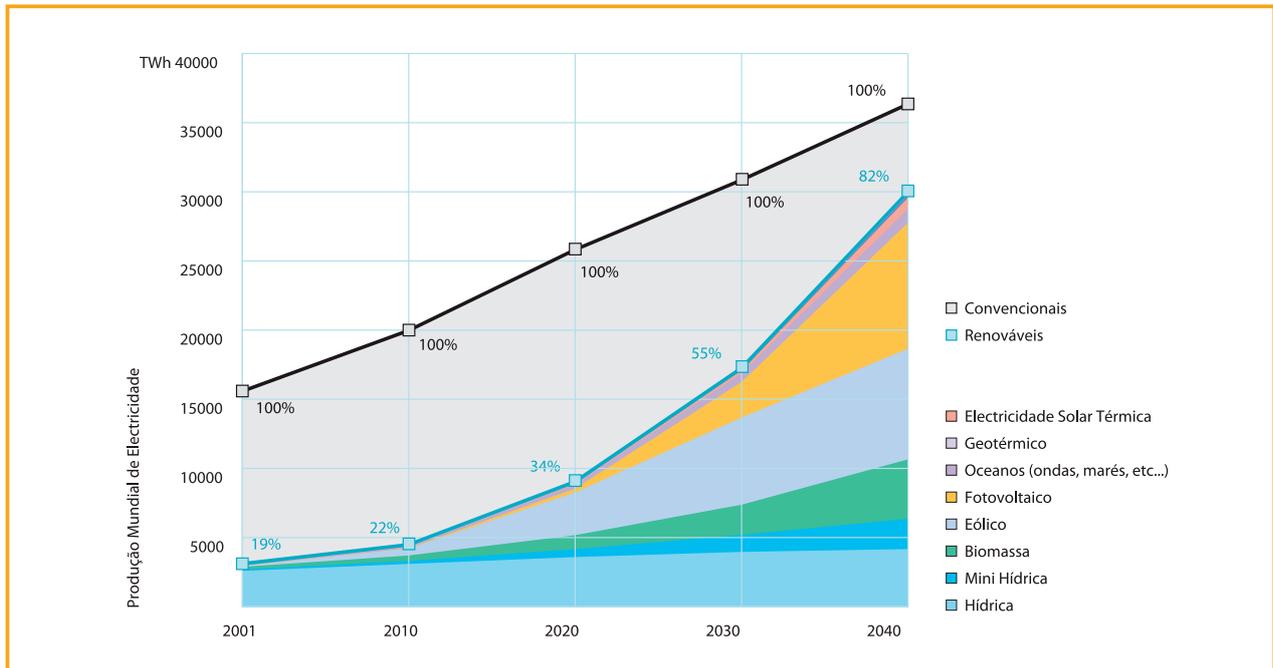


Fig. 2 - Cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040. Notar a previsão da explosão da energia solar fotovoltaica a partir de 2020, tornando-se uma das grandes, com a hídrica, a eólica e a biomassa.

(Fonte: European Renewable Energy Council, EREC-2005; [http://erec-renewables.org/publications/scenario\\_2040.htm](http://erec-renewables.org/publications/scenario_2040.htm))

30%/ano (Fig. 3), estimulada por políticas de incentivo, com destaque para a Alemanha e o Japão, tendo ultrapassado o marco de 1GW anual de potência instalada. Em Portugal, apesar de muito boas condições climáticas, estamos muito atrás dos países líderes: a área de células instalada *per capita* é a de um selo do correio; e o grande mercado dos sistemas ligados à rede, dominante a nível mundial (Fig. 3), é ainda muito menor que os sistemas de aplicação remota, sem ligação à rede. No entanto, as iniciativas recentes, estimuladas pelo atraente tarifário actual, poderão inverter esta situação nos próximos anos. Merece particular destaque a futura central de Moura, junto ao Alqueva, licenciada em finais de 2005, que será, com os seus previstos 62 MW, de longe a maior do mundo (actualmente a maior tem 6 MW).

No entanto, a viabilidade da penetração da energia fotovoltaica em larga escala no mercado da energia depende da evolução das tecnologias e da produção em massa que conduzam à redução do seu preço.

### UM POUCO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

A radiação solar é uma corrente de fotões, ou *quanta* de energia electromagnética  $hf$  (onde  $f$  é a frequência e  $h$  a constante de Planck). Cada um destes fotões tem a capacidade de ceder a sua energia a um electrão, que a usa para

saltar para um estado quântico de energia mais elevada. Num semiconductor, que é o tipo de material mais comum de que as células solares são feitas, um electrão da banda de valência, absorvendo a energia de um fotão, pode saltar para a banda de energia mais elevada, a chamada banda de condução. Tanto o electrão da banda de condução como o buraco deixado na banda de valência são móveis, comportando-se como partículas livres de carga  $-e$  e  $+e$ , respectivamente. Por outras palavras, um fotão solar cria um par electrão-buraco num semiconductor (exactamente como um fotão gama pode criar um par electrão-positrão no vácuo). Se o semiconductor contiver uma assimetria, que ajude a conduzir os electrões para um eléctrodo (negativo) e os buracos para outro (positivo), teremos uma célula solar fotovoltaica, com uma diferença de potencial  $V$  e uma corrente eléctrica  $I$ , e portanto uma potência  $P=VI$  disponível nos seus eléctrodos. Esta assimetria pode ser criada, por exemplo, por uma junção  $p-n$ : os buracos irão espontaneamente para a zona  $p$  e os electrões para a zona  $n$  do semiconductor.

De todos os fotões que incidem no semiconductor, apenas os que têm energia suficiente para criar um par electrão-buraco dão origem a corrente eléctrica: há uma energia limiar, tal como no efeito fotoeléctrico. Para o silício cristalino, o material mais comum de que são feitas as células (mais de 90% do mercado), só fotões com  $hf \geq 1,1$  eV contribuem ( $D=1,1$  eV é a diferença de energia entre a banda de valência e a de condução do silício); todos os fotões do infravermelho

melho abaixo desta energia são desaproveitados. Por outro lado, ainda que o fóton tenha uma energia  $hf \gg D$  (por exemplo, um fóton azul com 3 eV, ou mesmo um ultravioleta com 4 eV), só criará um único par electrão-buraco, e portanto contribuirá, no máximo, com uma carga electrónica para a corrente eléctrica. Entende-se assim facilmente uma razão fundamental para as eficiências relativamente baixas de conversão da energia: muitos fótons são desperdiçados, por terem energia insuficiente; e por cada fóton absorvido, por mais elevada que seja a sua energia, a célula só fornece a energia  $eV$ , onde  $e$  é a carga do electrão e  $V$  a diferença de potencial entre os eléctrodos da célula, sempre menor que  $D/e = 1,1$  V (na prática,  $V \approx 0,5$  V). Conseguem-se eficiências elevadas para luz monocromática com  $hf-D$ , mas não para um espectro largo como o da luz solar.

A procura dos limites da eficiência de conversão foi uma obsessão científica e tecnológica até meados dos anos noventa. Atingiram-se eficiências de 25% para o silício cristalino, e a melhor célula feita até hoje, construída como uma cascata de diferentes semicondutores, ou “tandem”, ultrapassou 34%. Este trabalho foi importante para ajudar a clarificar os limites e a compreender o que a tecnologia deve realizar para conseguir aproximar-se deles. Mas o que é realmente importante não é a eficiência em si, mas o custo da energia produzida, o que é muito diferente. Como o “combustível” é gratuito, a melhor célula não é a mais eficiente, mas a que produz energia a mais baixo custo. Mais ainda, a tendência crescente é conceber também os painéis solares fotovoltaicos como elementos arquitectónicos e o seu valor como revestimento de substituição em fachadas ou telhados não se limita ao preço do kWh. Como caricaturou em tempos uma arquitecta: “*Dêem-me painéis realmente atraentes e substituirei as minhas fachadas de granito pelos vossos painéis com um pequeno custo adicional. E se, ainda por cima, produzirem energia, ótimo!*”

A situação actual continua a ser extremamente interessante do ponto de vista da investigação e desenvolvimento (I&D): está muito longe de se ter decidido sequer o material de base das células do futuro, que romperão a barreira da produção em larga escala, e muito menos a sua tecnologia. De facto, entre o ruído das “primeiras”, “segundas” e “terceiras gerações” (designações de tipos de tecnologias, sem grande significado real) nada está decidido. O velho silício cristalino, depois de muitas vezes “enterrado” por outros materiais emergentes, soube até agora manter-se à frente na corrida da produção industrial. Os filmes finos de silício amorfo e os filmes policristalinos de CdTe (telurieto de cádmio) e de CIS (selenieto de cobre e índio) são concorrentes fortes, com produção industrial realizada; contudo perfilam-se os orgânicos poliméricos, as células electroquímicas, os filmes de compostos III-V (até agora remetidos para o espaço), as recentes “antenas”, ... Mas as próprias tecnologias de um dado material estão em contínua competição: por exemplo, só neste século a tecnologia de Czochralski de produção de bolachas monocristalinas de silício foi ultrapassada em volume pela tecnologia das multicristalinas obtidas por solidificação direccionada, mas entretanto as técnicas de produção do silício em fita ganharam já em 2005 uma quota de 15%, em crescimento rápido. As técnicas de formação de células a partir do material de base são também objecto de investigação e desenvolvimento em fortíssima competição; e até, de um ponto de vista menos fundamental, as questões de radiação concentrada *versus* natural, da instalação em centrais *versus* distribuída, da ligação à rede *versus* desligada são discutidas.

### TRÊS MENSAGENS POLÍTICAS

É possível que uma nova tecnologia faça uma dada fileira energética dar um salto, tornando-a subitamente mais com-

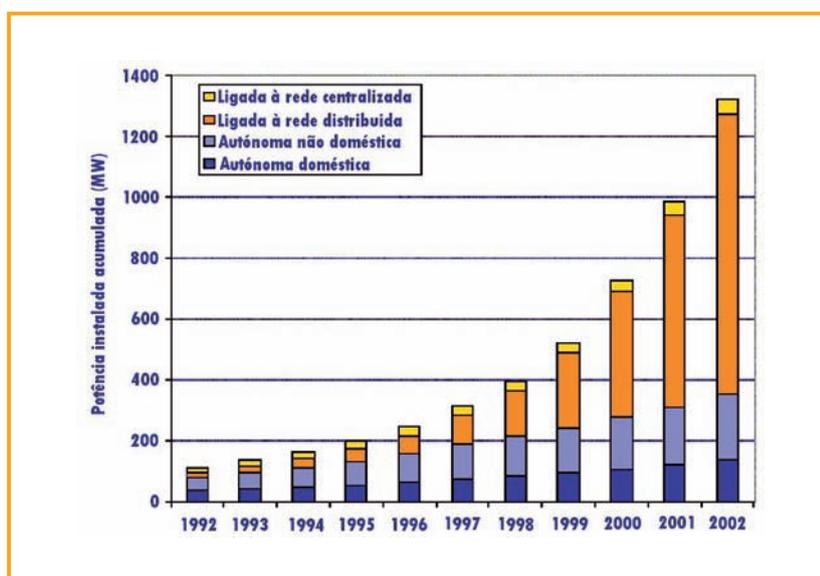


Fig. 3 - O recente crescimento mundial da potência fotovoltaica instalada tem sido alimentado sobretudo pelos sistemas distribuídos ligados à rede, e não pelas grandes centrais nem pelas aplicações remotas (Fonte: Relatório da EIA-Energy International Agency, 2003).

petitiva. Mas há que evitar deslumbramentos, na procura e sempre à espera das últimas modas, das “terceiras gerações”, das energias do futuro. É essencial uma política prudente que tenha em conta as oportunidades e equilibre presente, futuro próximo e longo prazo. Existem oportunidades imediatas, tanto de investigação e desenvolvimento como industriais e de mercado, a par de possibilidades futuras.

A energia nuclear de cisão foi levada até à produção por um enorme investimento público em investigação e desenvolvimento, e o mesmo tem estado a passar-se com a fusão nuclear. Pelo contrário, nas energias renováveis em geral, e na fotovoltaica em particular, não se registou nada de semelhante. Optou-se antes por um investimento público modesto em investigação e desenvolvimento e por um estímulo público ao mercado. A ideia é estimular o florescimento de empresas em toda a fileira, desde a produção dos materiais de base às células e painéis, ao projecto e à instalação, à certificação, etc., e deixar que o mercado decida as soluções tecnológicas, lideradas por empresas. Uma componente teórica do modelo é a da chamada “curva de aprendizagem”: o custo descerá e a qualidade melhorará segundo uma curva monotónica, função (apenas) da produção acumulada (cujo andamento pressupõe uma evolução tecnológica, fruto de investigação e desenvolvimento, não especificada nem prevista). Sem estímulo, o investimento das empresas em investigação e desenvolvimento e em processos tecnológicos mais eficientes seria muito menor: o objectivo dos estímulos é acelerar a “evolução natural”, quebrando barreiras e queimando etapas. Um dos métodos com mais sucesso actual (e adoptado também no nosso país, se bem que ainda em germinação) é o estímulo ao mercado pela via tarifária: a energia produzida por via fotovoltaica é comprada a um preço muito superior ao do mercado livre. Cria-se assim um mercado artificial que pode tornar atraente a instalação de painéis fotovoltaicos.

O problema destas manipulações é acertar na dose correcta do estímulo, e evitar efeitos perversos. De facto, assistimos neste momento a consequências de um sobre-estímulo

tarifário massivo, sobretudo alemão (Fig. 4). A procura aumentou tão rapidamente que há esgotamento e encarecimento da matéria-prima (silício), e o preço de venda dos painéis não está a baixar; a competição entre empresas é muito insuficiente: sobrevivem empresas com más tecnologias, que deveriam ter encerrado para dar lugar às melhores. Claro que a prazo o aumento da procura de matéria-prima estimulou grandes investimentos no silício solar, separada da indústria da microelectrónica, que não ocorreria sem mercado, e a prazo o mercado corrigirá a ineficiência, mas a que custo? Outro problema do crescimento demasiado rápido deste mercado artificial é a falta de tempo para o amadurecimento de novas tecnologias, resultantes de investigação e desenvolvimento: o mercado artificial favorece a investigação e desenvolvimento de curto prazo, as tecnologias já maduras, e dá relativamente pouco espaço a novas ideias.

Em resumo: a ideia deve ser estimular em competição e não deixar de lado a investigação e desenvolvimento de longo prazo. O objectivo é estimular a organização e a produção baixando preços e seleccionando as melhores tecnologias e empresas.

Portugal está em vias de investir no estímulo tarifário à produção de energia fotovoltaica dezenas de milhões de euros por ano. Este estímulo ao mercado terá sempre algumas consequências positivas: estimularemos algumas estruturas industriais, internalizaremos algumas tecnologias, adquiriremos capacidade em qualidade/certificação, e, claro, aumentaremos a quota de produção de energia renovável, embora muito pouco, mas, perante o volume do investimento, não deveríamos tentar ir mais além? Ou seja, iremos ser essencialmente montadores de tecnologia alheia, como tem acontecido na energia eólica (na qual temos um atraso já irremediável)?

Por outras palavras, estamos dispostos a pagar 40 milhões de euros por ano para montar painéis/sistemas, mas não estamos dispostos a investir nem uns poucos por cento

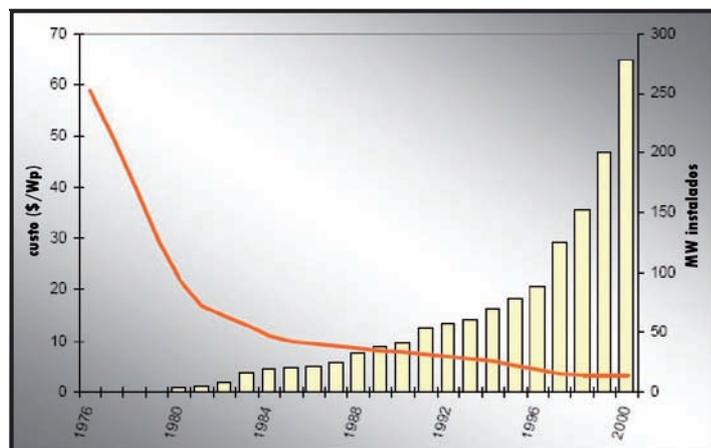


Fig. 4 - O custo de um watt fotovoltaico instalado caiu de um factor de 15 nos últimos 30 anos. No entanto, a explosão do mercado nos últimos anos não tem sido acompanhada da desejada continuada descida nos preços. Haverá sobre-estimulação do mercado? (Fonte: Greenpeace-EPIA)



Fig. 5 - O Hélios, da NASA. Embora as aplicações terrestres, sobretudo em telhados e fachadas de edifícios, sejam as de maior impacto no ambiente, haverá sempre nichos de aplicações que estimulam a imaginação.

deste montante para investigação e desenvolvimento focada na tentativa de criação de uma fileira tecnológica própria, baseada em investigação e desenvolvimento própria, num país que tem o sol como o seu maior recurso energético?

Um dos grandes benefícios potenciais das energias renováveis resulta da criação de toda uma fileira, desde a investigação e desenvolvimento à concepção, produção,

projecto, instalação e exploração. O domínio dessa fileira leva a uma capacidade de intervenção global, com grande parte da produção destinada mesmo à exportação. Foi por esta via, de domínio desde a base tecnológica aos serviços, que foram já criados 300 000 empregos nas energias renováveis na Europa, número que deverá atingir 1 000 000 dentro de poucos anos. Foi o que fizeram os dinamarqueses correctamente, por exemplo na energia eólica. Ora, ao contrário do que se passa na eólica, na fotovoltaica estamos ainda a tempo em Portugal.

O momento actual é extremamente interessante, porque ainda não se vislumbra sequer quais das tecnologias em investigação poderão impor-se - nem sequer o material de base está decidido. Portugal tem uma janela de oportunidade para participar activamente nesta corrida de investigação, desenvolvimento e tecnologia, com a criação de uma indústria de impacto mundial. Quando reconhecerão os políticos que temos uma comunidade de físicos e outros cientistas e engenheiros com capacidade científica e tecnológica, que só necessita de estímulos para avançar? A indústria fotovoltaica não deve ser construída apenas com o telhado, como está a acontecer na eólica...



## Associação EURATOM/IST

Coordenação da Participação da Indústria e Unidades de Investigação Portuguesas no Programa de Fusão da EURATOM e no ITER

### Fusão Nuclear:

uma energia limpa, segura, amiga do ambiente e praticamente inesgotável

Refere-se a evolução dos biocombustíveis no sector dos transportes, apresentando as principais razões que conduziram ao seu aparecimento e implementação. Compara-se a situação de Portugal com a da União Europeia e apontam-se algumas causas para a inicial falta de interesse a nível nacional e os constrangimentos detectados. Apresentam-se os vários cenários a ter em conta para a consolidação de uma fileira de utilização de biocombustíveis num futuro próximo.

MARIA FERNANDA ROSA

INETI - Departamento de Energias Renováveis  
Estrada do Paço do Lumiar, 1649-038 Lisboa

fernanda.rosa@ineti.pt

# SITUAÇÃO ACTUAL BIOCOMBUSTÍVEIS PERSPECTIVAS FUTURE

A produção e utilização de biocombustíveis derivados de fontes renováveis surgiu na década de 1970, na sequência dos dois primeiros choques petrolíferos e associada à tomada de consciência da necessidade de diversificar as fontes energéticas e de diminuir a dependência relativamente ao petróleo. Esse interesse diminuiu na década seguinte, devido à forte diminuição dos preços do petróleo e ao facto do sector energético continuar a ser fortemente baseado em combustíveis de origem fóssil.

Na Europa, a colocação em pousio obrigatório de vastas áreas de terra arável por imposição da Política Agrícola Comum (PAC), associada a motivações de ordem ambiental, conduziram à introdução de uma fileira de produção e utilização de biocombustíveis em diversos países da União Europeia, desde 1992. Porém, Portugal não acompanhou esse movimento, apesar de o país importar quase 85% da energia que consome, com forte pre-

# ACTUAL DOS VEIS E FUTURAS

dominância da componente petrolífera (mais de 60%) e em que cerca de 38% do petróleo importado se destina às necessidades de produção de combustíveis para utilização no sector do transporte rodoviário.

Recentemente, tem-se verificado uma nova escalada dos preços do petróleo, com valores do barril até há pouco tempo inimagináveis que são originados pela conjuntura internacional e pela instabilidade nas principais regiões produtoras e, essencialmente, pelo aumento exponencial

da procura por países anteriormente pouco consumidores, como a China e a Índia.

Por outro lado, Portugal encontra-se vinculado a compromissos internacionais e directivas europeias de que se destacam o Protocolo de Quioto com a imposição de uma redução global de 5,2% das emissões de dióxido de carbono, relativamente às emissões de 1990 até 2010 e a Directiva 2003/30/UE de 8 de Maio, que preconiza a substituição de combustíveis de origem fóssil por combustíveis alternativos, de acordo com a calendarização apresentada na Tabela 1.

Neste contexto, é urgente que Portugal altere rapidamente o perfil das fontes energéticas que utiliza, nomeadamente no sector dos transportes rodoviários, através do uso de combustíveis alternativos, preferencialmente recorrendo a recursos endógenos.

A Directiva aponta para que o processo de substituição se inicie com os biocombustíveis, atendendo a que a sua produção é hoje um processo tecnologicamente conhecido e industrialmente implantado em diversos estados membros, estando portanto ao dispor dos governos para a sua introdução imediata. Acresce que, as proporções que a Directiva preconiza para os biocombustíveis não implicam a criação de infra-estruturas de distribuição, podendo ser utilizada a rede de distribuição dos combustíveis tradicionais.

A calendarização propõe a introdução do gás natural só a partir de 2010 e do hidrogénio apenas a partir de 2015. Este escalonamento teve por base o grau de desenvolvimento tecnológico associado a cada combustível e o nível de investimento em infra-estruturas e em equipamentos necessários. De facto, embora o gás natural já esteja actualmente instalado e em uso em muitos estados membros, a rede de distribuição não está, em geral, uniformemente instalada em toda a região geográfica de cada país. Além disso, necessita de infra-estruturas junto aos locais tradicionais de abastecimento de combustíveis. No que respeita ao hidrogénio, sendo porventura o combustível alternativo mais promissor, está ainda longe de ser economicamente viável, necessitando de maior investimento em investigação e desenvolvimento, para que possa vir a ser uma realidade. Um sistema de transportes com base no hidrogénio consiste numa alteração drástica da situação actual, que só terá sentido numa estratégia a longo prazo e em grande escala.

Ano	Biocombustível %	Gás natural %	Hidrogénio %	Total %
2005	2	-	-	2
2010	5,75	2	-	7,75
2015	7	5	2	14
2020	8	10	5	23

Tabela 1 - Calendarização da substituição de combustíveis de origem fóssil por combustíveis alternativos, de acordo com a Directiva 2003/30/UE.

## BIOCOMBUSTÍVEIS MAIS COMUNS

Os biocombustíveis considerados na Directiva 2003/30/CE incluem uma gama muito variada de produtos, entre os quais, bioetanol, biodiesel, biogás, biometanol, biodimetiléter (DME), bio-ETBE, bioMTBE, biocombustíveis sintéticos, biohidrogénio, óleos vegetais puros e ainda gorduras animais e óleos vegetais reciclados.

Porém, no que se refere a biocombustíveis líquidos para utilização em veículos de transporte rodoviário, os mais comuns são o biodiesel e o bioetanol ou o seu derivado ETBE (éter etil-*ter*-butílico). Estes combustíveis alternativos podem ser comercializados na forma “pura” em veículos adaptados ou sob a forma de “misturas” em proporções que não afectem o rendimento dos motores dos veículos.

### Biodiesel

O biodiesel é uma mistura de ésteres metílicos de ácidos gordos produzidos por transesterificação de óleos vegetais com álcoois de cadeia curta, em geral o metanol, que apresenta características análogas às do gasóleo no que respeita aos parâmetros constantes na norma EN 590/2004. Assim, tecnicamente, o biodiesel é compatível com a utilização em motores diesel convencionais.

Os próprios óleos vegetais brutos ou semi-refinados podem ser usados em motores diesel com pré-câmara, apesar da sua elevada viscosidade colocar alguns problemas ao bom funcionamento dos motores.

O biodiesel é essencialmente produzido a partir de oleaginosas, como a colza, soja, girassol ou palma, sendo a soja

mais comum nos EUA e a colza e o girassol na Europa, a primeira nos países do norte e centro e o segundo nas zonas de clima mediterrânico.

Recentemente, a utilização de óleos usados de frituras e de outros óleos não adequados à alimentação animal para produção de biodiesel tem também recebido grande atenção. As razões prendem-se com o menor custo da matéria prima e, no que respeita aos óleos usados de frituras, proteger o ambiente ao evitar a sua deposição em aterros ou a descarga nos esgotos.

### Bioetanol

O bioetanol é produzido a partir da fracção bio-degradável de resíduos que contenham quantidades apreciáveis de açúcares ou outros materiais que possam ser convertidos em açúcares, como o amido, a inulina ou a celulose. O bioetanol é obtido por fermentação alcoólica dos açúcares, efectuada, em regra, por leveduras e bactérias.

As matérias-primas agrícolas potencialmente mais interessantes para a produção de bioetanol são as plantas de crescimento rápido e de recolha anual, ricas em açúcares simples ou em polímeros glucídicos facilmente hidrolisáveis. São exemplos os cereais (trigo, milho, centeio, etc.), a beterraba, a cana de açúcar, o sorgo sacarino e os tubérculos de tupinambo, planta rústica rica em inulina. Outra fonte importante de matéria prima para produção de bioetanol é constituída pelos resíduos agrícolas de natureza lenhocelulósica (palhas, carolos de milho, etc.) e pelos resíduos florestais, embora, nestes casos, a fermentação alcoólica seja tecnologicamente mais complexa e economicamente menos competitiva.

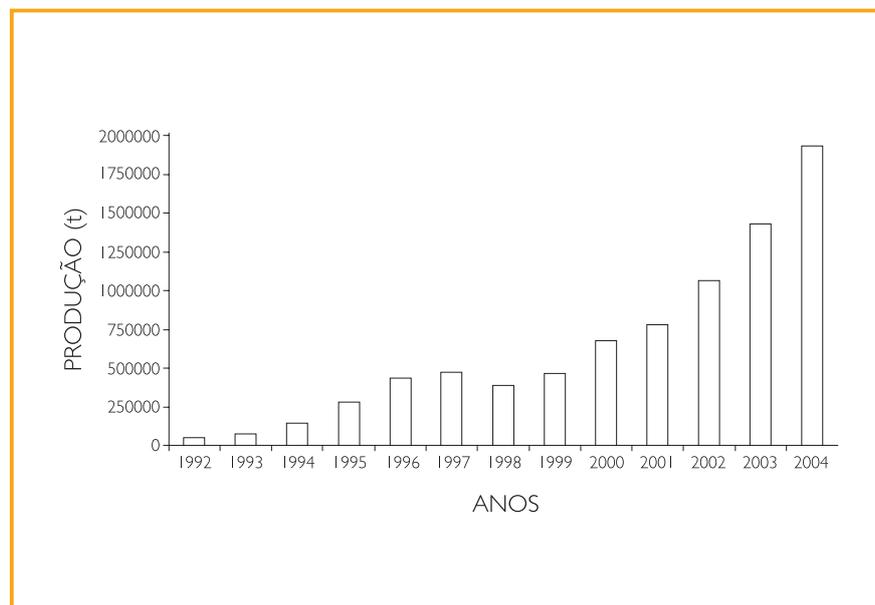


Fig. 1 - Produção de biodiesel na UE no período 1992 - 2004 (em toneladas)

País	Produção (t)	
	2003	2004
ALEMANHA	715 000	1 035 000
FRANÇA	357 000	348 000
ITÁLIA	273 000	320 000
DINAMARCA	41 000	70 000
REP. CHECA	70 000	60 000
ÁUSTRIA	32 000	57 000
ESLOVÁQUIA	0	15 000
ESPAÑA	6 000	13 000
REINO UNIDO	9 000	9 000
LITUÂNIA	0	5 000
SUÉCIA	1 000	1 400
<b>TOTAL UE</b>	<b>1 504 000</b>	<b>1 933 400</b>

Tabela 2 – Produção de biodiesel em 2003 e 2004.

O bioetanol e o ETBE, resultante da reacção química do etanol com o isobuteno - um derivado do petróleo - podem ser misturados à gasolina em concentrações até 5-20% (v/v) e 5-15% (v/v), respectivamente, sem que sejam necessárias modificações ou ajustes nos motores. Ambos são relevantes na aditivação da gasolina por promoverem o aumento do seu índice de octano e a melhoria da combustão com diminuição da emissão de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos. O bioetanol, relativamente ao ETBE, apresenta algumas características, designadamente alta volatilidade e elevada afinidade com a água, que o tornam menos vantajoso para ser utilizado em mistura com a gasolina. Apesar disso, tem sido muito utilizado no Brasil e nos EUA. O bioetanol pode também ser usado puro ou em elevadas taxas de incorporação na gasolina, embora, neste caso, em motores adaptados para o efeito.

### EXPERIÊNCIAS DE UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

A produção e utilização de biocombustíveis é há muito tempo uma realidade em diversos países da UE e também nos EUA e no Brasil. Neste último, a utilização de bioetanol de forma generalizada nos veículos automóveis existe desde finais da década de 1970, em resultado de uma estratégia nacional designada por Programa Próalcohol. Actualmente, o bioetanol é utilizado na forma anidra, em mistura com a gasolina na proporção de 22% e na forma hidratada, sem mistura com a gasolina. A grande utilização de bioetanol no Brasil deu também origem ao desenvolvimento pela indústria automobilística de motores a álcool

País	Produção em 2003 (t)		Produção em 2004 (t)	
	Bioetanol	ETBE	Bioetanol	ETBE
ESPAÑA	160 000	340 800	194 000	413 200
FRANÇA	82 000	164 250	102 000	170 600
SUÉCIA	52 000	0	52 000	0
POLÓNIA	60 430	67 000	35 840	s. d.
ALEMANHA	0	0	20 000	42 500
BIOETANOL DE ALCÓOL VÍNICO	70 320	s. d.	87 200	s. d.
<b>TOTAL UE</b>	<b>424 750</b>	<b>572 050</b>	<b>491 040</b>	<b>626 300</b>

s. d. - sem dados

Tabela 3 – Produção de bioetanol e de ETBE por estado-membro, em 2003 e 2004

e de motores para utilização de misturas álcool-gasolina, nomeadamente, General Motors, Ford, Volkswagen e Fiat.

Nos EUA, a utilização em larga escala do combustível designado por “gasohol” (mistura de 10% de etanol com gasolina) data de 1978, altura em que foram introduzidas isenções fiscais à utilização de álcool como combustível no sector transportador. Adicionalmente, em resposta às preocupações causadas pelo excesso de concentração de monóxido de carbono em algumas cidades americanas, particularmente nos meses de Inverno, a utilização de misturas de gasolina com bioetanol, denominadas gasolinas oxigenadas, foi generalizada a partir da década de 1990 [1].

O bioetanol é o biocombustível mais produzido no mundo graças essencialmente a estes dois países, o Brasil com cerca de 10,4 milhões de toneladas, em 2004, obtidas essencialmente a partir da cana de açúcar e os EUA com uma produção estimada de 8,4 milhões de toneladas, provenientes essencialmente do milho. Nestes dois países, a produção de biodiesel embora já iniciada, apresenta valores ainda insipientes.

A produção europeia (União Europeia a 25 países) das duas fileiras (bioetanol e biodiesel) representou em 2004, um total de 2 424 440 toneladas. Este valor representa um crescimento de 25,7% relativamente a 2003, correspondendo o valor global a uma contribuição de 79,5% de biodiesel (1 933 400 toneladas) e de 20,5% de bioetanol (497 040 toneladas) [2]. Mesmo assim, esta produção não representou mais de 0,8% (em base de energia) dos combustíveis usados na UE. Estima-se que o crescimento em 2005 venha a ser ainda superior, dada a imposição da directiva de incorporação de um mínimo de 2% de biocombustíveis até final de 2005, embora não deva ser

atingida uma percentagem superior a 1,4% em base de energia, mesmo que os diversos estados membros tenham cumprido as metas nacionais a que se propuseram.

Mas, se os números relativos ao bioetanol são modestos comparativamente ao Brasil e EUA, no que se refere a biodiesel a UE corresponde globalmente ao maior produtor mundial.

A produção de biodiesel na UE aumentou de uma forma substancial na última dezena de anos (Fig. 1), sendo actualmente a Alemanha o maior produtor (Tabela 2) com uma produção superior a metade da produção da UE e com a maior capacidade instalada de produção [2].

O grande crescimento observado na Alemanha resultou de uma legislação fiscal muito favorável que desde Janeiro de 2004 isenta completamente o biodiesel de ISP tanto na utilização de biodiesel na forma pura como em mistura. Além disso, desde 1999 que existe neste país uma taxa ecológica aplicada aos produtos derivados do petróleo que não atinge os biocombustíveis [2]. Pelo contrário, a França que chegou a ser o maior produtor de biodiesel em 2001, tem vindo a decrescer a sua produção, cifrando-se em 348 000 toneladas em 2004, apesar da quantidade autorizada pelo Governo para exoneração de €33 / hectolitro ser de 387 500 toneladas.

No que se refere à produção de bioetanol na UE (Tabela 3), a Espanha é actualmente o maior produtor com uma capacidade de produção que ultrapassa as 200 000 toneladas e a sua utilização é, em regra, sob a forma de ETBE.

O sucesso da produção de etanol em Espanha, que em poucos anos ultrapassou a França, desde sempre o maior produtor europeu, explica-se pela isenção total de taxas aplicadas ao etanol pelo Governo e uma estratégia política forte na aposta dos biocombustíveis associada a uma

dinâmica de desenvolvimento da agricultura. O crescimento da produção de bioetanol, em Espanha vai ainda aumentar em 2006 com a construção de uma nova fábrica com a capacidade anual de 160 000 toneladas obtidas por fermentação alcoólica de cereais.

## A SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, o desenvolvimento do sector foi completamente diferente. Inicialmente verificou-se um total desinteresse por parte dos principais actores da fileira de produção de biocombustíveis. Os agricultores não utilizaram para fins energéticos as terras de pousio obrigatório, os industriais não mostraram interesse em apostar nesta nova vertente, nem mesmo os industriais ligados ao sector das oleaginosas, e, a nível político, não surgiu qualquer medida ou estratégia que conduzisse ao desenvolvimento da produção de biocombustíveis.

Apenas se verificaram experiências pontuais de utilização de biodiesel em mistura com o gasóleo, em autocarros da Carris em Lisboa e dos STCP no Porto, em veículos de recolha de lixo da Câmara Municipal de Lisboa e em veículos das frotas das Câmaras Municipais de Lisboa e de Évora. Estas experiências, que no caso da Carris ainda se mantêm, tiveram por objectivo principal, estudar o comportamento e o rendimento dos motores e avaliar as vantagens ambientais através da determinação das emissões de gases, partículas e hidrocarbonetos resultantes do uso das misturas testadas.

A situação só se alterou a partir da entrada em vigor da Directiva 30/2003, principalmente por vontade do sector industrial e recentemente com o empenho do poder político. Apareceram diversas empresas interessadas em produzir biodiesel a partir de matéria-prima nacional, ou importada, se não houver disponibilidade nacional, e surgiram simultaneamente várias pequenas e médias empresas

Unidade industrial	Local	Produção	Observações
<b>A UTILIZAR SEMENTES OU ÓLEOS VEGETAIS IMPORTADOS</b>			
IBEROL	Alhandra	20 000 t/ano	A funcionar
IBEROL	Alhandra	100 000 t/ano	Em final de construção
FÁBRICA TORREJANA DE BIOCOMBUSTÍVEIS	Riachos	40 000 t/ano	Em início de produção
<b>A UTILIZAR ÓLEOS USADOS DE FRITURAS</b>			
DIESELBASE	Setúbal	3 000 l/dia	A funcionar
SPACE	V. N. de Famalicão	3 000 t/ano	A funcionar
SOCIPOLE	Porto	15-30 t/ano	A funcionar
ASSOCIAÇÃO DE MUNICÍPIOS ALENTEJANOS	Alentejo	500 l/dia	Em projecto

Tabela 4 - Unidades de produção de biodiesel em Portugal.

ligadas à produção de biodiesel a partir de óleos alimentares usados recolhidos nos sectores da hotelaria e da restauração. São também de salientar algumas acções promovidas essencialmente por agências regionais de energia e autarquias no sentido da recolha dos óleos alimentares usados, da sua transformação em biodiesel e posterior utilização na frota das autarquias. Referem-se os casos de Sintra e Oeiras como os mais emblemáticos. A Tabela 4 apresenta as unidades industriais de produção de biodiesel em Portugal e a situação em que se encontram. O biodiesel produzido a partir de óleos usados de fritura está a ser consumido essencialmente em frotas cativas e particulares. O biodiesel produzido a partir de óleos vegetais puros será vendido às companhias distribuidoras para mistura com gasóleo.

Dada a escassez de produção de matéria prima nacional tradicionalmente utilizada na obtenção de biodiesel (colza, girassol e soja) ou de bioetanol (cereais, beterraba, sorgo e outros) e os fracos rendimentos destas culturas, devem ser considerados três cenários para que a utilização de biocombustíveis em Portugal possa efectivar-se: (i) importação directa de biodiesel e/ou bioetanol; (ii) produção de biocombustíveis a partir de matérias primas importadas; e (iii) produção a partir de matérias primas nacionais. Todos os cenários permitem cumprir a directiva 30/2003 e contribuem para as melhorias ambientais associadas ao uso de biocombustíveis. Contudo, os dois primeiros não permitem a diminuição local de emissões de dióxido de carbono, em virtude da matéria prima ter sido cultivada noutra região. O primeiro cenário corresponde a substituir uma importação por outra, sem vantagens económicas e sociais. O segundo contribui para o desenvolvimento de novas indústrias e para a criação de alguns postos de trabalho. O terceiro abre novos mercados à agricultura, cria alternativas às culturas de regadio com problemas de sustentabilidade económica pelas novas medidas da PAC, permite desenvolver novas indústrias e origina o aparecimento de novos empregos na agricultura e na indústria.

De facto, a nova reforma da PAC, iniciada em 2003, com a introdução do processo de desligamento da produção, está a condicionar fortemente a continuação de diversas culturas de regadio, nomeadamente tabaco, milho e beterraba. Esse facto pode constituir uma janela de oportunidade para as culturas energéticas com vista à produção de bioetanol e biodiesel. A procura de matéria prima pelos produtores nacionais de biocombustíveis pode assim vir a ser satisfeita, pelo menos em parte, pela agricultura nacional, minimizando o risco do abandono da produção agrícola nos regadios e permitindo uma utilização economicamente competitiva destas áreas em Portugal.

Se este cenário for considerado politicamente estratégico, as taxas de isenção fiscal para os biocombustíveis deverão ser diferenciadas, dando um incentivo claro à produção nacional.

## REFERÊNCIAS

- [1] Forum “Energias Renováveis em Portugal”, 2002. Uma contribuição para os objectivos de política energética e ambiental, Hélder Gonçalves, António Joyce, e Luís Silva (editores).
- [2] EurObserv’ER, Systèmes Solaires, N° 167, Le Baromètre des Biocarburants- Juin, 2005.





A M.T.Brandão, Lda., é uma empresa com 20 anos de experiência na distribuição de equipamentos de Alta Tecnologia. Dispomos de uma equipa com formação adequada para um eficiente Apoio ao Cliente.



**Possuímos uma completa gama de produtos para **Teste & Medida** de elevada qualidade e performance, adequados à **Investigação e Desenvolvimento**.**






Rua de Serralves, 599 - 4150-708 Porto - Portugal | Tel. 226 167 370 - Fax 226 167 379  
e-mail: mtb@mtbrandao.com | www.mtbrandao.com




# Motive os seus alunos!



Versão do Professor

## TI-84 Plus Silver Edition VSC

(Versão do Professor)

**TI-84 Plus Silver Edition VSC (Versão Professor) – a calculadora ideal para o professor de Matemática e Ciências !**

### Inclui:

- Porta dedicada para ligação a ViewScreen™ ou TI-Presenter™.
- TI-Presentation Link, que permite aos seus alunos partilharem o seu trabalho com toda a sala de aula.
- Poster gigante para sala de aula.
- Acetato, com imagem da calculadora, para retro projecção.

[education.ti.com/portugal](http://education.ti.com/portugal)

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

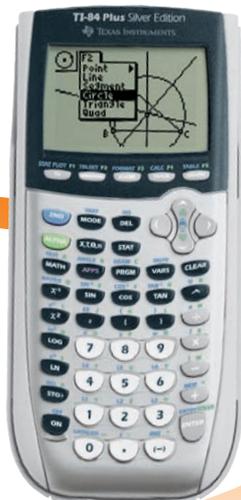
*TI Technology – Beyond Numbers*



# Oferta "TI – Soluções com um Sorriso!"

Se é professor e lecciona com a sua **TI-84 Plus Silver Edition** (ou TI-83 Plus Silver Edition) versão professor, receba gratuitamente o software **TI-SmartView™**, o emulador da **TI-84 Plus Silver Edition** para o seu computador.

Para isso, partilhe connosco uma situação real e divertida com a sua calculadora na sala de aula, e enviar-lhe-emos o software **TI-SmartView™** para que possa explorar todas as potencialidades da **TI-84 Plus Silver Edition**, agora também no seu computador.



Destaque ou fotocopie o cupão abaixo, junte a sua história e envie-nos por **Fax** (21 088 21 22), **E-mail** (ti.smartview@gmail.com) ou **Correio** (Remessa Livre 52300, EC Campo Grande, 1721-962 Lisboa). Enviaremos gratuitamente o software **TI-SmartView™** a todos os participantes, no prazo de sete dias úteis, e as experiências mais divertidas serão ainda publicadas no nosso website – [education.ti.com/portugal](http://education.ti.com/portugal).

## TI-SmartView™

O software TI-SmartView™ é o emulador da TI-84 Plus Silver Edition para o seu computador, fácil de utilizar, para motivar a sala de aula a explorar os conceitos de matemática e ciências. Baseado na funcionalidade da família de calculadoras TI-84 Plus (e também compatível com a família 83-Plus), o TI-SmartView™ funciona como complemento do uso da calculadora, na sala de aula, no laboratório e em casa.

## Principais funcionalidades:

- Visualização simultânea de representações gráficas, tabelas e equações.
- Capturas de ecrã com o pressionar de uma tecla, que podem ser utilizadas em software como o Microsoft® Word ou PowerPoint®.
- Historial de Teclas – À medida que as teclas são premidas, imagens das mesmas e a completa sequência podem ser projectadas para toda a sala de aula.

*Requisitos do sistema: Microsoft Windows® XP, 2000, ME ou 98, Mac® OS 10.2 ou mais recente, drive CD ROM e mínimo 10MB livres no disco rígido.*

## OS MEUS DADOS:

Nome: \_\_\_\_\_

Morada: \_\_\_\_\_

Localidade: \_\_\_\_\_ C. Postal: \_\_\_\_\_

Telef./Telem.: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

Professor de:  Matemática  Física/Química  Biologia  Básico

Nível:  Secundário  Universitário

Escola: \_\_\_\_\_ Localidade: \_\_\_\_\_

A minha calculadora é: \_\_\_\_\_ Nº Série: \_\_\_\_\_ Comprada em (mês/ano): \_\_\_\_\_

Oferta válida apenas para professores que possuam uma calculadora TI-83 Plus Silver Edition VSC ou TI-84 Plus Silver Edition VSC. Oferta limitada ao stock disponível para esta promoção. Para mais informações consulte [education.ti.com/portugal](http://education.ti.com/portugal).

A Texas Instruments reserva-se o direito de alterar ou terminar esta promoção em qualquer altura, sem aviso prévio.

Embora seja o elemento mais abundante no Universo, na Terra o hidrogénio não existe no seu estado puro, podendo ser gerado através de uma grande diversidade de processos e de fontes de energia. Na Terra o hidrogénio não é pois uma fonte de energia, sendo apenas um portador de energia com um elevado potencial de aplicação. O hidrogénio pode ser convertido directamente em electricidade através de células de combustível, com elevado rendimento e reduzido impacto ambiental. O hidrogénio poderá ser um dos combustíveis do futuro, nomeadamente no sector dos transportes e na produção descentralizada de electricidade, capaz de solucionar os grandes problemas associados aos combustíveis fósseis, tais como os impactos ambientais nefastos e a segurança do abastecimento. Espera-se que nas próximas décadas ocorram desenvolvimentos tecnológicos significativos para que a produção, armazenamento, transporte, distribuição e conversão do hidrogénio possam ser efectuados de forma competitiva, face às alternativas clássicas.

ANÍBAL TRAÇA DE ALMEIDA

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 3030 Coimbra

adealmeida@isr.uc.pt

PEDRO SOARES MOURA

Instituto de Sistemas e Robótica - Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 3030 Coimbra

pmoura@isr.uc.pt

# HIDROGÉNIO E DE COMBUSTÍV

As principais fontes de hidrogénio são a água ou alguns hidrocarbonetos, tais como os combustíveis fósseis (em particular o gás natural). Para quebrar esta cadeia de hidrocarbonetos ou separar o hidrogénio do oxigénio (na água) é necessário despende energia. Idealmente, toda a energia fornecida deveria ser armazenada no hidrogénio. Mas, em qualquer transformação de energia, ocorrem perdas, que dependem do processo utilizado para a obtenção do hidrogénio no seu estado elementar.

Actualmente, quase todo o hidrogénio a nível mundial é obtido a partir de combustíveis fósseis. Cerca de 48% da produção total é feita a partir de gás natural (Fig. 1), 30% a partir de petróleo, 18% a partir de carvão e apenas cerca de 4% é obtido com electricidade recorrendo à electrólise. Na produção a partir de combustíveis fósseis além de hidrogénio forma-se dióxido de carbono, pelo que, de forma a evitar a sua libertação para a atmosfera, este deve ser sequestrado (processo actualmente em desenvolvimento).

Os processos de produção de hidrogénio incluem:

- Separação com vapor de gás natural (processo de produção de hidrogénio actualmente dominante);
- Oxidação parcial de gás natural (menos eficiente que o processo anterior);
- Gasificação de carvão;

# E CÉLULAS

## VEL

- Gasificação de biomassa;
- Electrólise com electricidade obtida em:
  - centrais térmicas (carvão, fuel, gás natural, nuclear, etc.);
  - energias renováveis (eólica, energia solar fotovoltaica, energia solar térmica, ondas, etc.);
- Ciclos termoquímicos de alta temperatura:
  - solar térmica;
  - nuclear;
- Produção biológica.

### ELECTRÓLISE

Recorrendo à electrólise é possível obter hidrogénio com elevado grau de pureza. No entanto, o custo de obtenção

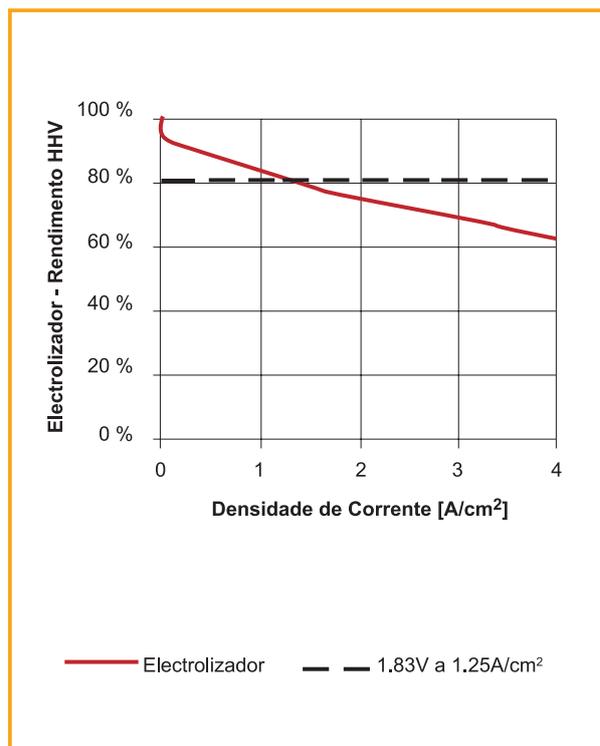


Fig. 2 - Rendimento na produção de hidrogénio (HHV-Higher Heating Value / Poder Calorífico Superior do  $H_2$ ) por electrólise, em função da densidade de corrente [1].

de hidrogénio a partir da electrólise é bastante elevado, quando comparado com a obtenção de hidrogénio a partir de combustíveis fósseis. Este processo é relativamente eficiente, mas as perdas de energia crescem acentuadamente quando a densidade de corrente é elevada (Fig. 2).

Para armazenar a energia eléctrica obtida a partir de fontes renováveis intermitentes, como a energia solar ou a energia eólica, pode produzir-se hidrogénio através de electroli-zadores. Este hidrogénio pode ser armazenado e utilizado posteriormente para produzir electricidade, recorrendo a uma célula de combustível, quer em aplicações estacionárias (por exemplo, em edifícios), quer nos transportes.

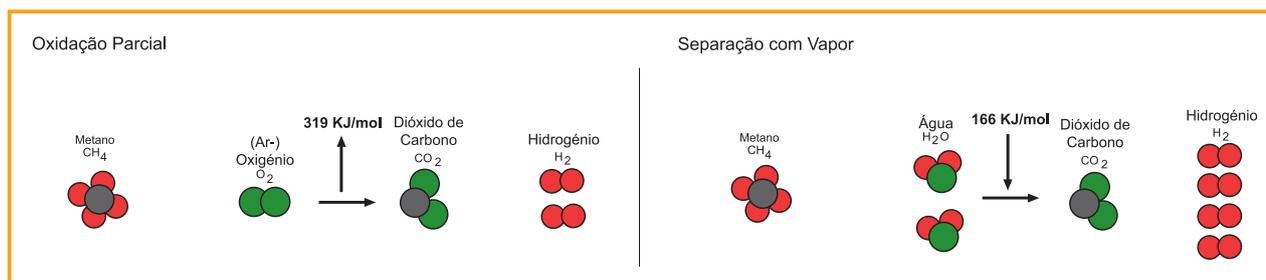


Fig. 1 - Processos de produção de hidrogénio com gás natural.

### VALOR ENERGÉTICO DO HIDROGÉNIO

O hidrogénio possui um elevado valor energético por unidade de massa. No entanto, o hidrogénio, em condições de pressão e temperatura normais, encontra-se no estado gasoso. Uma vez que o hidrogénio tem massa bastante reduzida, o seu valor energético por unidade de volume é também bastante reduzido (Tabela 1), pelo que é necessário armazená-lo a elevadas pressões (ou mantê-lo sob a forma líquida), para que seja possível armazenar uma quantidade significativa de hidrogénio por unidade de volume.

### COMPRESSÃO DE HIDROGÉNIO

A compressão de um gás requer energia, que depende do processo termodinâmico utilizado. A Fig. 3 mostra que a energia necessária para o processo adiabático é claramente superior à do processo isotérmico. No processo de compressão de hidrogénio a energia necessária é também muito superior à energia necessária para a compressão de metano, o qual requer cerca de 20% da energia do hidrogénio para ser comprimido até 800 bar.

### LIQUEFAÇÃO DE HIDROGÉNIO

Ainda mais energia é necessária para compactar o hidrogénio por liquefacção, que consome 35 a 60 MJ/kg, ou seja, a 30 a 50% da energia total contida no hidrogénio (Fig. 4).

Portador de energia	Forma de armazenamento	Densidade de energia por massa [kWh/kg]	Densidade de energia por volume [kWh/l]
Hidrogénio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido (-253 °C)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido (-162 °C)	13,9	5,8
GPL	Líquido	12,9	7,5
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Electricidade	Líquido	11,6	9,7
	Bateria ácido-chumbo	0,05	0,1
	Bateria iões de lítio	0,25	0,05

Tabela 1 - Densidade de energia do hidrogénio versus a de outros portadores de energia.

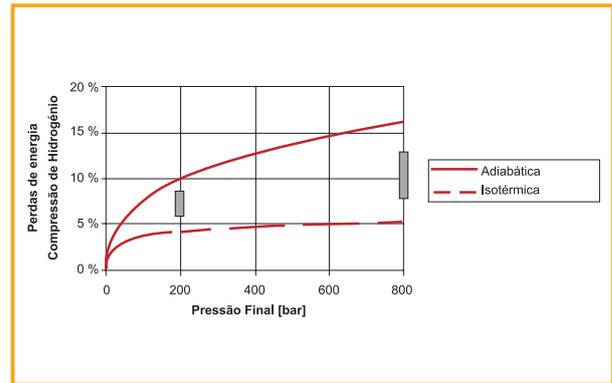


Fig. 3 - Perdas de energia na compressão de hidrogénio [1].

### TRANSPORTE DE HIDROGÉNIO

A economia de hidrogénio envolve também o transporte de hidrogénio por camiões, comboios, navios ou condutas. Enquanto na maioria dos casos o transporte de combustíveis é limitado pelo peso, no caso do hidrogénio líquido é limitado pelo volume. Um camião de 40 toneladas pode transportar apenas cerca de 500 kg de hidrogénio comprimido ou 3500 kg de hidrogénio líquido, o que leva a um grande dispêndio de energia no seu transporte.

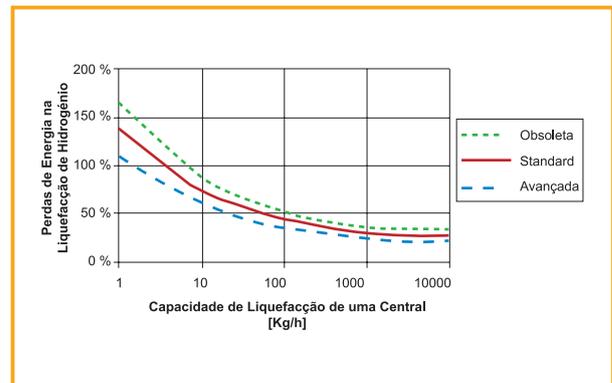


Fig. 4 - Perdas de energia na liquefacção de hidrogénio [1].

Outra forma de transporte é possível recorrendo a condutas. Para uma conduta de 2000 km as perdas representam cerca de 20% do valor energético do hidrogénio transportado, enquanto no caso do metano essas perdas são cerca de metade.

### CÉLULAS DE COBUSTÍVEL

As células de combustível são dispositivos electroquímicos que convertem directamente, sem combustão, a energia química contida num combustível rico em hidrogénio em electricidade e energia térmica, tendo-se afirmado como uma das tecnologias de produção de energia eléctrica mais promissoras.

A Fig. 5 apresenta os componentes básicos de uma célula de combustível, os quais incluem um eléctrodo positivo (ânodo), um eléctrodo negativo (cátodo) e um electrólito. O hidrogénio é fornecido ao ânodo, enquanto o oxigénio é fornecido ao cátodo. O combustível é oxidado electroquimicamente na superfície do ânodo, onde o catalisador promove a separação dos electrões dos átomos de hidrogénio, criando iões positivos. O electrólito permite a passagem dos iões do ânodo para o cátodo, mas bloqueia a passagem dos electrões, os quais são forçados a seguirem pelo circuito eléctrico exterior à célula. Os iões de hidrogénio, quando chegam ao cátodo, combinam-se simultaneamente com os electrões que retornam do circuito eléctrico e com os átomos de oxigénio fornecidos ao cátodo, formando água.

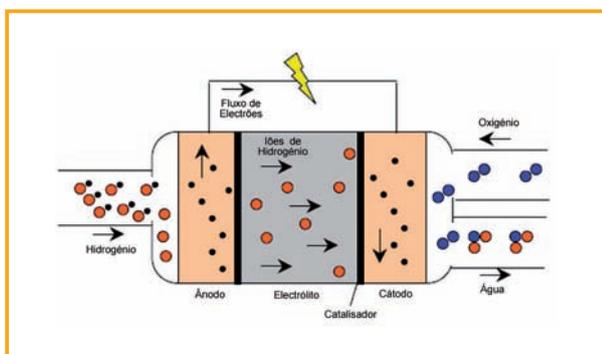


Fig. 5 - Diagrama de uma célula de combustível.

Uma célula de combustível apenas produz uma tensão de cerca de 1 volt, pelo que é usual interligarem-se várias destas unidades, formando uma pilha que poderá fornecer uma tensão mais facilmente utilizável. Uma pilha de combustível pode ser configurada com vários grupos de células interligadas em série e paralelo, podendo obter-se a tensão, corrente e potência pretendidas.

Existem cinco tipos principais de células de combustível, os quais se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento técnico e comercial: célula de combustível de membrana de protões (PEMFCs), alcalina (AFCs), de carbonatos fundidos (MCFCs), de ácido fosfórico (PAFCs), e de óxidos sólidos (SOFCs).

Os combustíveis mais utilizados em sistemas de pilhas de combustível incluem o gás natural, o hidrogénio e o metanol. Outros combustíveis têm-se revelado candidatos viáveis para o uso em pilhas de combustível, como o biogás, a gasolina, o gasóleo e outros destilados do petróleo, o éter dimetilico, o etanol, assim como produtos resultantes da gaseificação do carvão e da biomassa.

O combustível utilizado no núcleo das células é o hidrogénio, embora este gás não se encontre facilmente disponível. Por outro lado as infra-estruturas de extracção, transporte e distribuição, refinação e/ou purificação de hidrocarbonetos já estão integradas na nossa sociedade. Consequentemente, têm sido concebidos sistemas de pilhas de combustível para aplicações práticas utilizando hidrocarbonetos. Estes sistemas requerem, habitualmente, a presença de um conversor, o qual transforma os hidrocarbonetos num gás rico em hidrogénio, procede à remoção de contaminantes, e fornece hidrogénio puro à célula.

A Fig. 6 mostra o diagrama de uma célula de combustível, com capacidade de separar o hidrogénio do gás natural, para produção combinada de electricidade e de calor.

As unidades já disponíveis comercialmente produzem electricidade com eficiências entre 40% e 60%, com emissões reduzidas e de forma tão silenciosa que podem facilmente ser utilizadas em ambiente urbano. São particularmente bem adaptadas ao mercado da produção de electricidade distribuída devido a essas características, às

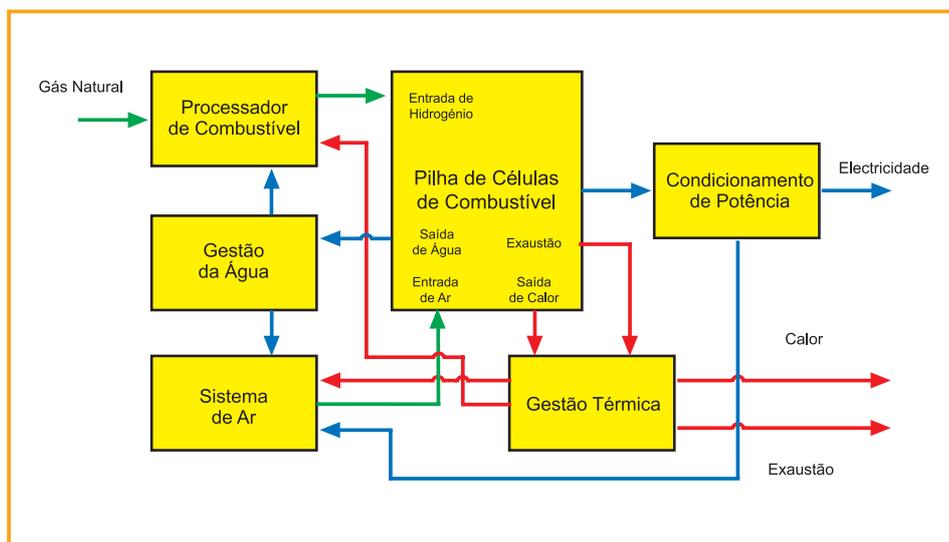


Fig. 6 - Diagrama de uma célula de combustível a gás natural.

quais se junta ainda a sua modularidade e a possibilidade de construção de unidades com qualquer potência.

As células de combustível libertam quantidades consideráveis de calor durante o seu funcionamento, o qual pode ser utilizado para a produção de água quente ou vapor. Quando as quantidades de calor e/ou as temperaturas dos gases de escape são reduzidas, estas podem ser aproveitadas para a produção de água quente, aquecimento ambiente ou vapor de baixa pressão. Pelo contrário, para células de altas temperaturas, é possível aproveitar o calor libertado no escape para produzir vapor a alta temperatura e pressão, o que o torna adequado para a produção de electricidade em ciclo combinado, podendo ser conseguidos rendimentos muito elevados (Fig. 7), superiores aos das melhores centrais térmicas convencionais.

A utilização de hidrogénio numa célula de combustível, quando combinado com oxigénio, resulta apenas na libertação de energia eléctrica, de calor e de água, não existindo quaisquer emissões poluentes (Fig. 8). Se o hidrogénio for obtido por electrólise com recurso a fontes de energia renováveis, o processo terá de facto emissões nulas, mas, se o hidrogénio for obtido a partir de combustíveis fósseis, então as vantagens ambientais não serão tão significativas.

A Fig. 9 apresenta uma possível aplicação de células de combustível, alimentadas a gás natural, em residências para produção combinada de electricidade e de calor (aquecimento ambiente e de águas sanitárias).

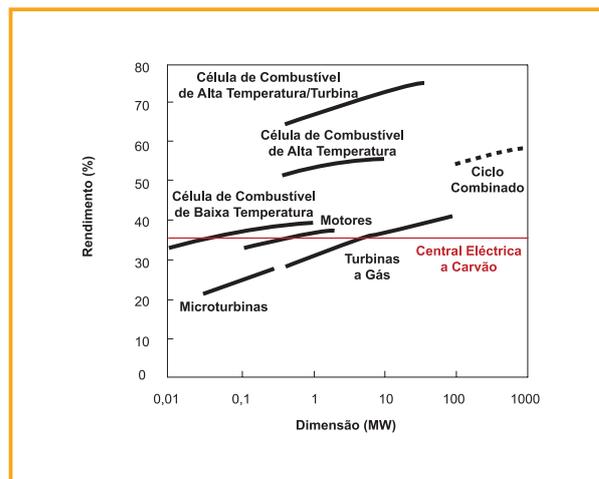


Fig. 7 - Rendimento de diversas tecnologias de produção de energia.

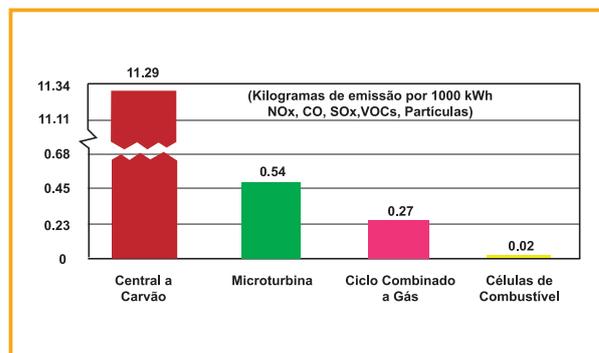


Fig. 8 - Emissões relativas de poluentes das diversas tecnologias (Plug Power)

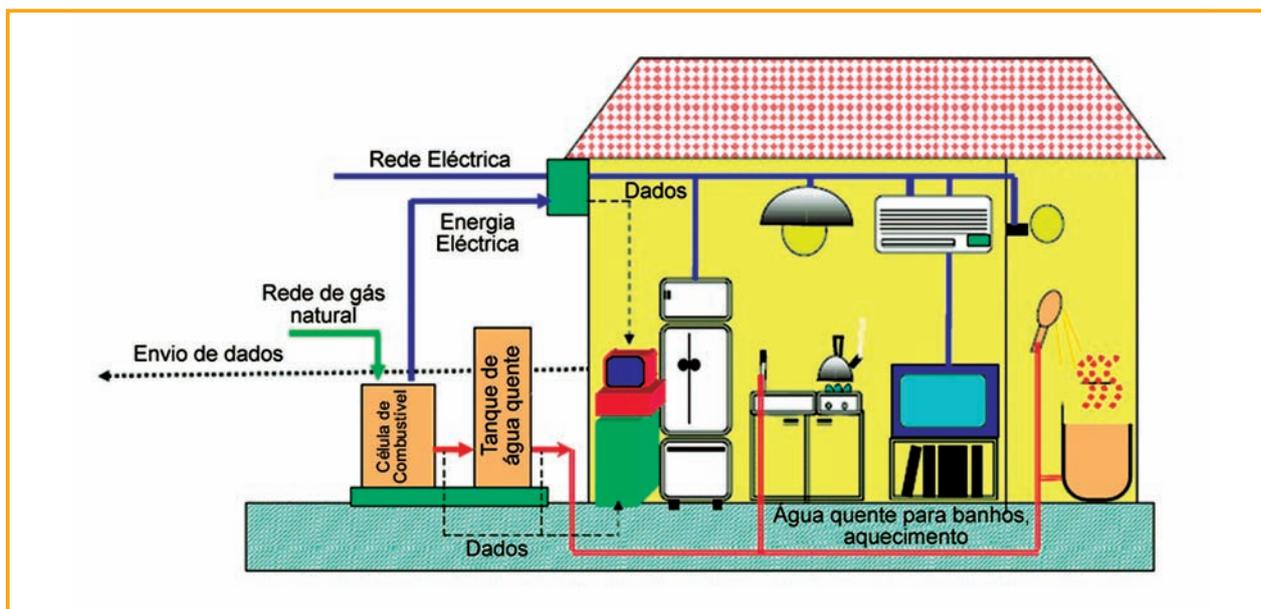


Fig. 9 - Aplicação doméstica de uma célula de combustível.

## CONCLUSÕES

As células de combustível encontram o seu nicho de mercado a médio prazo (2010) nas aplicações de geração distribuída de electricidade e de energia térmica, ou seja, perto dos locais de consumo, apresentando como vantagens:

- Implementação de sistemas de alta fiabilidade (centros de telecomunicações, redes de dados, bancos), com possibilidade de integração em ambiente urbano;
- Decréscimo do uso de combustíveis fósseis importados, particularmente se o hidrogénio for produzido com energias renováveis;
- Redução das emissões de dióxido de carbono e de outros poluentes;
- Mitigação da necessidade de expansão da capacidade de produção centralizada, e da capacidade de transmissão e distribuição de energia eléctrica;
- Redução das perdas de transporte e de distribuição (10% de toda a electricidade produzida).

No entanto, apresentam-se como barreiras à aplicação de células de combustível:

- Elevados custos dos equipamentos conversores;
- Desconhecimento da tecnologia;
- Disponibilidade de apoio técnico;
- Disponibilidade da rede de produção, de armazenagem e de distribuição de hidrogénio;
- Volatilidade de preços dos combustíveis fósseis.

Estima-se que, quando as células de combustível atingirem um custo inferior a 1500 euros/kW, a sua aplicação se fará em larga escala, nomeadamente em grandes edifícios para produção de electricidade, aquecimento e ar condicionado. A outra aplicação das células de combustível com um enorme potencial encontra-se no sector dos transportes para substituir o motor de combustão interna, altamente ineficiente e poluidor. Para ser viável a aplicação de células de combustível nos automóveis é necessário que o seu custo desça para um valor inferior a 50 euros/kW, ou seja cerca de 100 vezes menos que o seu valor actual.

## BIBLIOGRAFIA

1. Bent Sorensen, *Hydrogen and Fuel Cells*, Academic Press, 2005.
2. *Decentralised generation: development of EU policy*, ECN-C-02-075, Outubro de 2002.
3. Koppel T. and Reynolds J., *A Fuel Cell Primer: The Promise and Pitfalls*, www.fuelcellstore.com, Maio de 2001.
4. Lee Willis and Walter G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, Marcel Dekker, 2000.
5. U.S. Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*, EG&G Services, Outubro de 2000. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/769283-sD4TGw/native/769283.pdf>

## REFERÊNCIAS

- [1] Ulf Bossel, Baldur Eliasson and Gordon Taylor, *The future of the hydrogen economy: bright or bleak?*, Abril de 2003. [http://www.pacificsites.net/~dglaser/h2/General\\_Articles/hydrogen\\_economy.pdf](http://www.pacificsites.net/~dglaser/h2/General_Articles/hydrogen_economy.pdf).

Apresentam-se as várias gerações da energia eléctrica produzida através da fissão nuclear, discutindo as suas vantagens e os seus inconvenientes.

Pretende-se analisar de forma objectiva as principais razões que explicam o facto desta forma de energia ser mal-amada pelo público em geral, que a excluiu até há pouco tempo do espectro político aceitável como uma das opções para fazer frente à debilidade estrutural representada pela enorme dependência de energia importada.

Apresentam-se também os motivos que conduzem o autor a acreditar que o ressurgimento desta forma de geração eléctrica será inevitável no mundo ocidental, incluindo o nosso próprio país.

# NOVAS FORMAS NUCLEAR

Cem anos depois das descobertas de Einstein que revolucionaram o pensamento científico, a consequência mais relevante para a humanidade é a energia de fissão nuclear.

Há cinquenta anos que esta forma de energia vem produzindo electricidade através da reacção em cadeia da fissão de núcleos de urânio, permitindo hoje que 7% de toda a energia consumida no mundo seja desta origem, 16% de toda a electricidade, atingindo na Europa mais de um terço, representando assim a forma mais importante de geração eléctrica neste continente.

Tal acontece com um registo de segurança incomparável com qualquer outra forma de produção energética, não emitindo para a atmosfera qualquer tipo de emissão relevante. É actualmente a forma de energia mais competitiva, devido à quantidade mínima de matéria-prima que é necessária para produzir uma unidade de energia eléctrica, em comparação com as outras formas de geração de energia eléctrica.

Por essa razão tem ajudado a humanidade a atrasar a exaustão dos recursos fósseis, tendo num passado recente contribuído de uma forma decisiva para o controlo dos preços desses recursos. Além disso, tem atrasado o fenómeno da mudança climática.

PEDRO MIGUEL DE SAMPAIO NUNES

Charlemagne, Consultores em Questões Europeias Lda

psampaionunes@sapo.pt

# S DE CISÃO

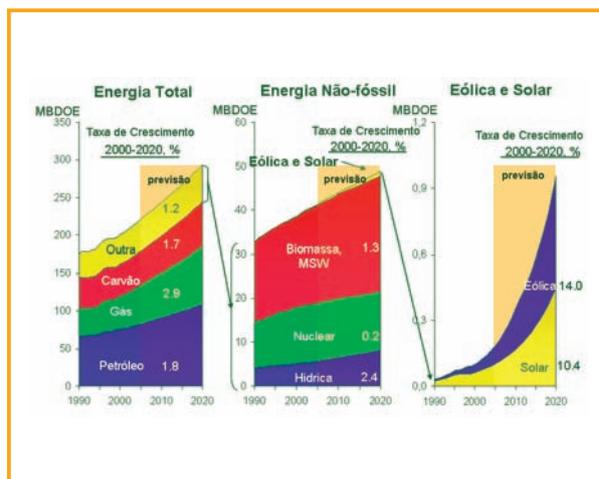


Fig. 1 - Procura mundial de energia.

continua a colocar problemas para a sua disseminação em larga escala. Será necessário um salto tecnológico na acumulação de energia eléctrica ou a massificação da economia do hidrogénio para se resolver essa dificuldade maior.

## CONDICIONANTES DA MATRIZ ENERGÉTICA GLOBAL

Apenas um sexto da energia consumida actualmente é de origem não-fóssil e, desta, a biomassa domina nos países em desenvolvimento, que ainda usam a lenha como combustível, sendo o restante dividido pela hídrica e pela nuclear (Fig. 1).

As novas energias renováveis têm uma posição ainda muito marginal, e apesar do aumento espectacular da sua taxa de crescimento anual, o seu preço ainda não competitivo e a sua intermitência não lhes permitem contribuir, a curto e médio prazo, para a solução dos graves problemas que a humanidade enfrenta.

### Competitividade das renováveis

A internalização dos custos externos, que hoje se faz através de subsidiação conjugada com a prioridade no despacho, irá ser gradualmente realizada por meios economicamente mais eficientes, como o Sistema Europeu de Comércio de Licenças de Emissão, que tornará em breve a energia eólica competitiva com as energias convencionais fósseis; porém, a intermitência dessas formas de energia

## Potencial da eficiência energética

Por outro lado a enorme jazida de economias, que representa uma melhor eficiência energética, não é facilmente capturável. De acordo com a Fig. 2, os progressos permanentes no sentido de uma maior economia em energia não são suficientes para contrariar o aumento crescente da procura, mas apenas para diminuir a sua taxa de crescimento. E este facto é ainda mais verdadeiro quando se aplica a economias como a nossa, que carecem de muita energia para assegurar o seu crescimento e a qualidade de vida das populações.

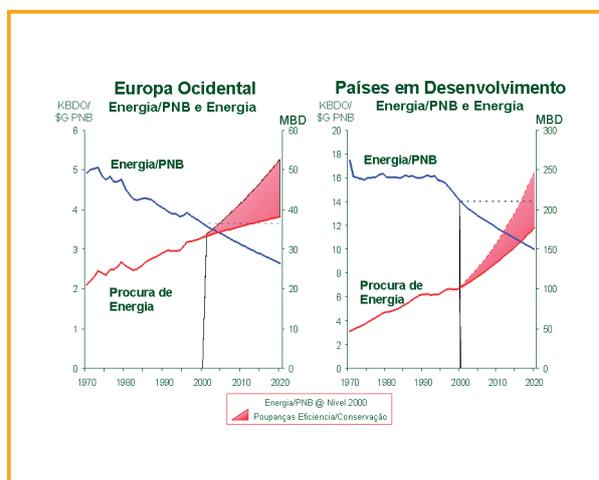


Fig. 2 - Evolução da energia por PNB e da procura de energia.

Duração das reservas fósseis

Se verificarmos agora o volume de reservas calculadas pela relação do valor de reservas provadas sobre o valor de consumo actual anual temos o número de anos que deverão durar essas reservas (Fig. 3). Este valor é meramente indicativo, uma vez que tem sido sistematicamente “esticado” pela evolução tecnológica; representa, no entanto, uma referência importante porque nos dá uma indicação quantificada de comparação em bases semelhantes da quantidade de recursos existentes, bem como uma certa aproximação do limite físico das reservas exploráveis economicamente.

Como se mostra na Fig. 3, o petróleo encontra-se concentrado no Médio-Oriente onde existem cerca de dois terços das reservas mundiais com os mais baixos custos de produção, de 2 a 4 USD o barril, e com 39 anos de *reserves/production (R/P) ratio*. Quanto ao gás natural encontra-se um pouco melhor distribuído com 70% das reservas ao redor da Europa, com incidência na Rússia, Médio-Oriente e Norte de África, com 61 anos de R/P. O carvão está muito melhor distribuído e tem cerca de 200 anos de R/P, mas o seu impacto no ambiente coloca graves problemas à sua utilização.

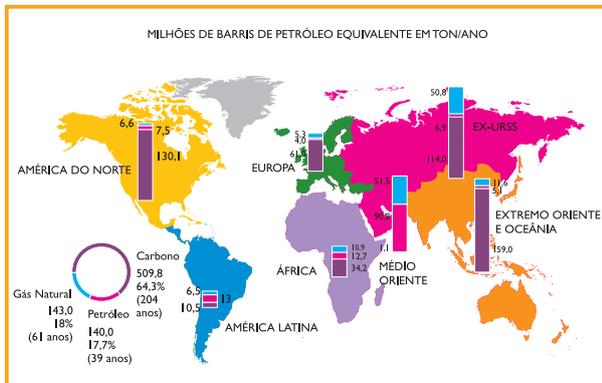


Fig. 3 - Reservas mundiais de energia fóssil.

Relativizar a razão R/P

Este indicador deve ser relativizado porque os prazos de existência teórica dos recursos energéticos são sensivelmente os mesmos há mais de duas décadas, uma vez que a tecnologia e as novas descobertas têm permitido adicionar em cada ano as mesmas quantidades que são consumidas. Porém, nos últimos anos não se registaram novas descobertas significativas, o que leva os especialistas a dar cada vez mais crédito à teoria de termos já atingido o pico das reservas; por outro lado as grandes economias emergentes, como a China, a Índia e a Indonésia, estão a atingir níveis de motorização que absorvem quantidades maciças de produtos petrolíferos que o actual mercado não consegue fornecer.

Necessidade de renovar o parque gerador

Esta situação gerou uma tensão no mercado mundial das matérias-primas energéticas que foi responsável por um aumento continuado e persistente dos preços de todas as fontes utilizadas na geração eléctrica, quando a Europa se aproxima de uma época em que será necessário instalar cerca de 300 GW nos próximos 25 anos para substituir o parque existente.

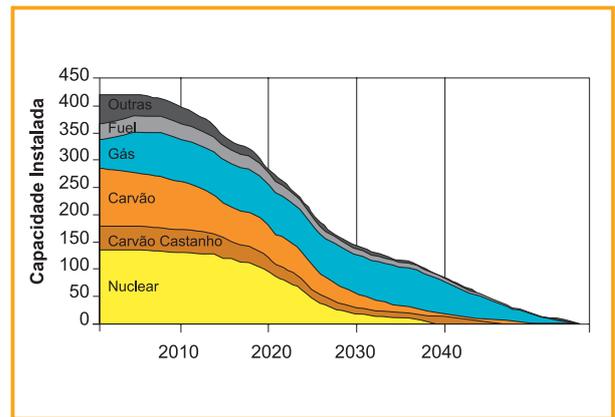


Fig. 4 - Necessidade de nova geração no mercado europeu.

Perante esta situação há que analisar de forma objectiva e transparente qual o tipo de geração que deverá vir a substituir a presente base largamente fóssil do parque actual, face às questões que se colocam no plano ambiental, de segurança de abastecimento ou da competitividade da economia.

FAZ SENTIDO FALAR EM CISÃO NUCLEAR HOJE?

Fará sentido neste quadro, e face ao abandono pela opinião pública ocidental no seguimento do acidente de Chernobyl, de voltar a encarar a opção da cisão nuclear?

As reservas de urânio

Vejamos a questão das reservas de urânio: estão distribuídas de forma equilibrada por países estáveis politicamente e têm um *ratio R/P* de 60 anos para as reservas conhecidas, estimando-se em quatro vezes mais as reservas ainda por descobrir (Fig. 5).

Por outro lado, estão em demonstração tecnologias de geração nuclear, os reactores regeneradores de neutrões rápidos, que permitem aumentar em 60 vezes as reservas existentes, o que permitirá chegar folgadoamente à fusão nuclear e à utilização competitiva e massificada das energias renováveis.

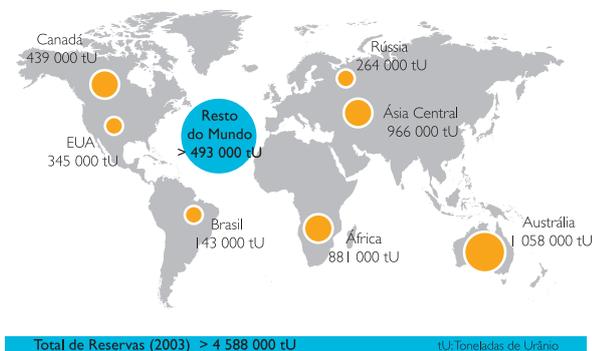


Fig. 5 - As reservas de urânio.

### A competitividade do nuclear

De qualquer modo o *ratio* R/P é estimado para os custos correntes de produção de cada matéria-prima e cresce naturalmente à medida que o preço de mercado sobe, mas neste caso o limite é a possibilidade de se manter competitivo a esse novo custo do produto final. Ora aí é que as situações diferem de forma drástica: o impacto do preço das matérias-primas nas várias formas de geração eléctrica é fundamentalmente diferente, entre os 5% da geração nuclear, podendo ir até 20% se incluirmos o custo da reciclagem do combustível usado e o tratamento dos resíduos finais, até 52% para o carvão e 73% para o ciclo

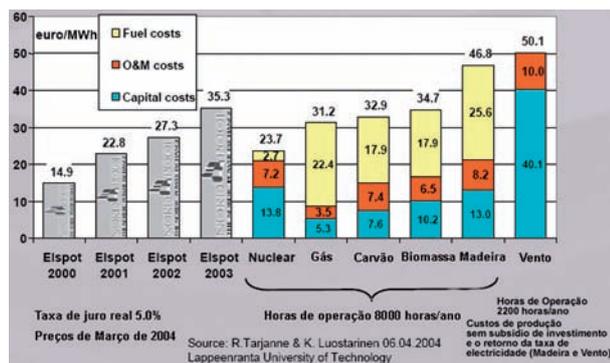


Fig. 6 - Competitividade da energia nuclear.

combinado a gás natural.

Essa análise ressalta da Fig. 6, elaborada na Finlândia e com base na decisão inédita num país ocidental de retomar a geração nuclear após o acidente de Chernobyl e numa altura de abertura total do mercado.

Para além de se constatar a competitividade do quilowatt-hora (kWh) nuclear em relação a todas as outras formas

de geração alternativa, podemos também verificar que estes custos não têm ainda o custo adicional associado às penalidades de Quioto que, depois da data em que foram calculados, dobraram os custos do petróleo, do gás e do carvão.

### MELHORAR A SEGURANÇA, REDUZIR A DEPENDÊNCIA, PROTEGER O AMBIENTE

Não considerando o risco da proliferação de armas atómicas, que não é um problema em Portugal devido ao duplo controlo da Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA) e da *European Atomic Energy Community* (EURATOM), outra das questões polémicas tem a ver com a segurança do funcionamento dos reactores. Para enquadrar essa questão é importante saber que o pior acidente que pode suceder num reactor é o que aconteceu em Chernobyl.

### A questão da segurança das instalações

Após vinte anos de desinformação sobre este assunto, as Nações Unidas, através de um relatório em que estiveram envolvidas várias das suas agências, veio dar esclarecimentos sobre este acontecimento: apenas comprovadamente perderam a vida até hoje menos de 50 pessoas, sem qualquer evidência de malformações congénitas ou de outro tipo de consequências graves para a saúde dos 600 000 afectados.

Deduz-se desta análise que a energia nuclear após cinquenta anos de existência é a forma de energia, de longe mais segura, embora haja a percepção pública contrária, tal como os transportes aéreos o são para a mobilidade.

### O problema dos resíduos nucleares

A outra questão que tornou a cisão nuclear mal-amada é a questão dos resíduos nucleares: ora essa é seguramente uma das grandes vantagens da energia nuclear em relação às outras formas de geração termoeléctrica: os resíduos da geração nuclear são incomparavelmente menores em volume, cerca de 100 000 vezes, e perdem com o tempo a sua nocividade ao contrário dos resíduos químicos e biológicos.

Para produzir 1 MW de energia eléctrica durante um ano são necessárias 2 500 t de carvão, 1 500 t de fuelóleo, 700 t de gás natural e apenas 25 kg de urânio enriquecido. Ora estas matérias-primas darão naturalmente origem a resíduos na proporção correspondente, isto é, 5 000 t de CO<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub>, de cinzas e de metais pesados libertados para a atmosfera no caso do carvão, 4 800 t de CO<sub>2</sub> e de SO<sub>2</sub> para o fuelóleo, 2 400 t de CO<sub>2</sub> para o gás natural e apenas 23 kg de resíduos (sendo apenas 1kg de resíduos de alta actividade) para o caso do nuclear (Fig. 8).

Combustível	Resíduos
2 500 T DE CARVÃO	5 000 t de CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , cinzas e metais pesados libertados para a atmosfera
1 500 T DE FUELÓLEO	4 800 t de CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> e outros
700 T DE GÁS NATURAL	2 400 t de CO <sub>2</sub>
25 KG DE URÂNIO ENRIQUECIDO	23 kg de resíduos (apenas 1kg de resíduos de alta actividade)

Fig. 8 - Resíduos resultantes da produção de 1 MW de electricidade durante um ano.

Essa quantidade mínima de resíduos, cerca de 0,1% dos resíduos perigosos industriais, pode ter um tratamento caro ou barato. O tratamento caro é a partição e transmutação dos elementos através do bombardeamento por neutrões, o que permite acelerar o tempo de decaimento desses resíduos. O prémio Nobel Carlo Rubbia desenvolveu o conceito do amplificador de energia, que está em vias de demonstração e que usa este processo para eliminar os resíduos perigosos e ao mesmo tempo produzir energia. A forma mais barata é a vitrificação dos resíduos e o seu enterramento em formações geológicas estáveis, deixando ao tempo a diminuição da actividade radioactiva até à conversão dos resíduos em material inerte.

**Impacto sobre o meio ambiente**

No que diz respeito ao impacto sobre o ambiente, a energia nuclear é igualmente a forma de energia mais concentrada e que emite menores emissões poluentes, estando à frente em termos do cálculo das emissões de ciclo de vida de CO<sub>2</sub>, de várias formas de energias renováveis (Fig. 9). Por esta razão tornar-se-á uma opção irrecusável quando o Protocolo de Quioto estiver em aplicação plena.

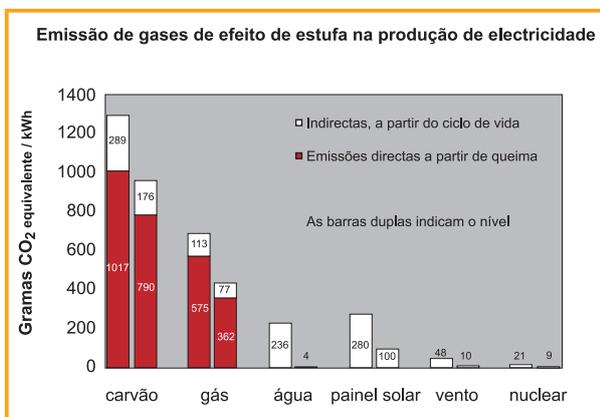


Fig. 9 - Ciclo de vida da produção de CO<sub>2</sub> nas várias fileiras de energia.

**TIPOS DE REACTORES DE CISÃO NUCLEAR**

Um reactor nuclear caracteriza-se por três parâmetros: o combustível, o moderador e o permutador de calor e esses parâmetros permitem fazer a respectiva classificação:

- Os reactores a água pressurizada (PWR) São os mais frequentes, existindo 266 em serviço no mundo. O permutador de calor e o moderador são a água a forte pressão. O combustível é urânio ligeiramente enriquecido, eventualmente misturado com plutónio (combustível MOX).
- Os reactores a água ebulente (BWR) Existem 93 reactores em serviço sobretudo na Alemanha, no Japão e nos EUA. O permutador de calor e o moderador são a água em ebulição, o vapor alimentando directamente a turbina. O combustível é urânio ligeiramente enriquecido.
- Os reactores a água pesada (PHWR) Estão activos 39 reactores, principalmente no Canadá. O moderador é de água pesada, o permutador de calor de água ligeira e o combustível é urânio ligeiramente enriquecido.
- Os reactores arrefecidos a CO<sub>2</sub> (AGR – MAGNOX) Foram muito utilizados nos anos 60 – 70, encontrando-se 22 centrais a funcionar apenas no Reino Unido. Este tipo de reactor, que utiliza urânio natural ou muito ligeiramente enriquecido, tem um permutador de calor a gás carbónico, particularmente transparente aos neutrões. O moderador é a grafite.
- Os RBMK Este tipo de reactor, utilizado em Chernobyl, apresenta uma instabilidade intrínseca. Estes reactores têm sido progressivamente desactivados, estando ainda 17 em exploração na Rússia e Europa de Leste. O RBMK utiliza urânio ligeiramente enriquecido como combustível, água em ebulição no permutador de calor e grafite como moderador.
- Os reactores regeneradores Existem em funcionamento ainda três reactores a neutrões rápidos de carácter experimental.

Quanto à evolução dos reactores de cisão nuclear considera-se igualmente a seguinte classificação:

- A 1ª geração corresponde aos primeiros reactores industriais dos anos 60;
- A 2ª geração corresponde aos reactores que estão, em geral, em exploração actualmente;

- A 3ª geração, que está já hoje disponível no mercado, representa uma evolução tecnológica dos reactores de 2ª geração, integrando os mesmos conceitos;
- A 4ª geração, ainda em estado de protótipo, é formada por reactores que tentam aplicar novos conceitos.

Os reactores de 3ª geração são de vários tipos:

- *ABWR* (1 350 MW)  
Trata-se de um reactor a água ebuliente, construído pela General Electric, Toshiba e Hitachi, certificado no Japão e nos Estados Unidos. Há duas unidades em operação no Japão e uma em construção em Taiwan, tendo também participado no concurso público na Finlândia.
- *ESBWR* (1 300 MW)  
Este reactor usa a tecnologia de água ebuliente e está em fase de estudos na General Electric, tendo o seu processo de certificação sido lançado nos Estados Unidos.
- *SWR* (1 000 MW)  
Trata-se de um reactor a água ebuliente, em fase de desenvolvimento pela Framatome.
- *AES 91* (1 000 MW)  
Este reactor usa a tecnologia a água pressurizada e foi desenvolvido pela empresa russa Atomstroyexport. Há reactores deste tipo em construção na China e também participou no concurso público na Finlândia.
- *AES 92* (1 000 MW)  
Trata-se de um reactor a água pressurizada, também desenvolvido pela Atomstroyexport, semelhante ao AES 91, com sistemas passivos (sistemas de segurança que agem espontaneamente em caso de necessidade e sem electricidade). Está em construção na Índia.
- *AP 1000* (1 000 MW)  
Este reactor, que também usa a tecnologia a água pressurizada, está a ser desenvolvido pela Westinghouse tendo sido lançado o seu processo de certificação nos Estados Unidos.

A 4ª geração de reactores nucleares é a dos sistemas do futuro, que irão suceder, num prazo de 15 a 20 anos, aos reactores do tipo EPR de 3ª geração. Esta nova geração de reactores terá inovações e desenvolvimentos importantes tanto do ponto de vista do reactor como do ciclo de combustível.

Os objectivos pretendidos por estes sistemas do futuro e a escolha das tecnologias necessárias para as atingir estão no centro de discussões internacionais, nomeadamente no seio do Fórum Internacional Geração IV lançado em 2001 por iniciativa do Departamento Americano de Energia. Participam neste Fórum dez países (África do Sul,

Argentina, Brasil, Canada, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Japão, Reino-Unido, Suíça) bem como a União Europeia. Os conceitos em estudo são:

- *SCWR: Supercritical-Water-Cooled Reactor* (1000 MW)  
Trata-se de um reactor, não regenerador, a água ligeira, com um permutador de calor e moderador a água supercrítica (água a 200 bar e 508 °C).
- *SFR: Sodium Fast Reactor* (1100 MW)  
Este é um reactor regenerador, rápido a sódio (550 °C), com um permutador de calor a sódio e que não tem moderador.
- *VHTR: Very High Temperature Reactor*  
Trata-se de um reactor dedicado à produção de hidrogénio devido à sua elevada temperatura. É um reactor não regenerador, a gás a temperatura muito elevada, com um permutador de calor a hélio (900 a 1500 °C) e moderador a grafite.
- *GFR: Gas-cooled Fast Reactor* (300 MW)  
É um reactor regenerador, rápido a hélio (850 °C), com um permutador de calor a hélio e que não tem moderador.
- *LFR: Lead-cooled Fast Reactor* (1200 MW)  
Trata-se de um reactor regenerador, rápido a chumbo (540 °C), com um permutador de calor a chumbo e sem moderador.
- *MSR: Molten Salt Reactor*  
É um reactor regenerador, a sais fundidos (700 °C), cujo combustível é o permutador de calor (sais fundidos com urânio e tório) e moderador a grafite.

## ASSEGURAR A COMPETITIVIDADE DA ECONOMIA PORTUGUESA

Uma ilação muito relevante para Portugal retirada da Fig. 6 é que, num país que cria pouca riqueza, as formas de geração termoeléctrica fóssil deixam pouco valor acrescentado, indo a maior parte da margem para os países fornecedores das matérias-primas.

Havendo neste momento uma ideia generalizada de que a geração futura se fará à base de um reforço significativo da geração eólica e dos ciclos combinados a gás natural, verifica-se que a primeira opção, para além de um custo significativamente superior, é intermitente, e por isso ter-se-á que recorrer quer à importação, para cobrir cerca de 70% do tempo em que esta forma de energia não produz, quer aos grupos termoeléctricos convencionais que serão cada vez mais a gás natural.

### A vulnerabilidade dos ciclos combinados à flutuação do preço do gás natural

Vejamus quanto custa a geração a gás natural para um custo de 5 \$/MBtu e o modo como o custo do kWh varia em função do custo do gás natural (Fig. 10).

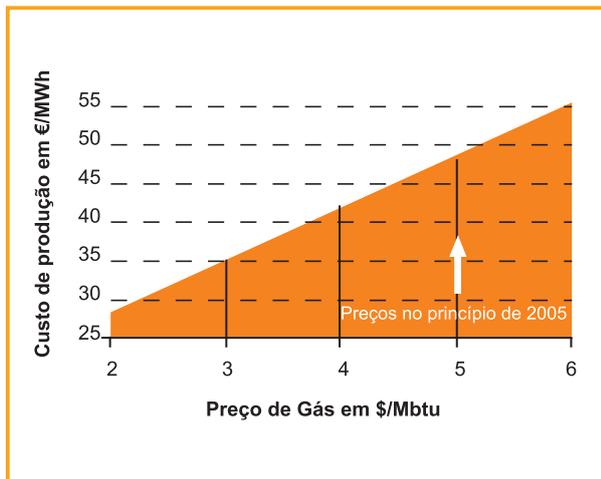


Fig. 10 - Variação do custo de geração de uma central a ciclo combinado em função do preço do gás.

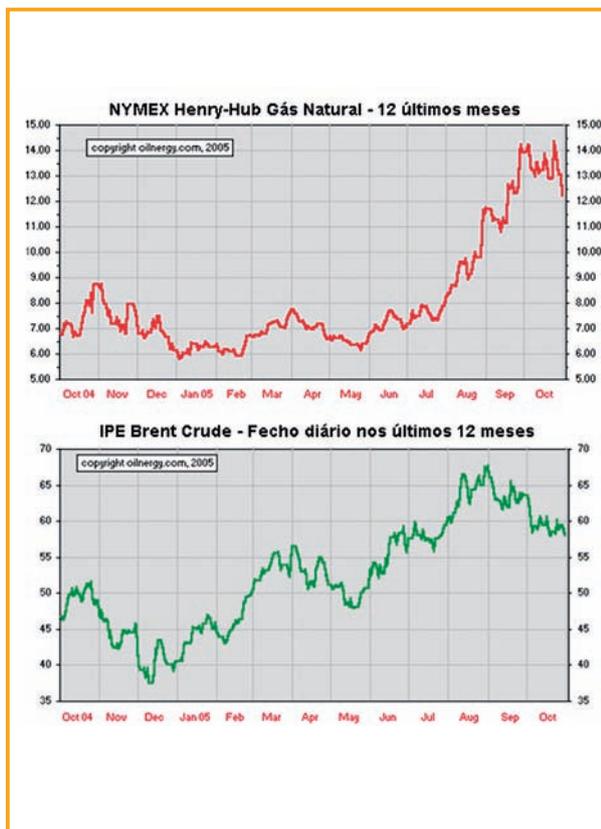


Fig. 11 - Evolução do preço do gás natural e do petróleo.

A Fig. 11 mostra a variação do custo do petróleo no último ano, bem como a ligação do custo do gás natural ao preço do *crude*.

É importante reter o valor de 14 \$/MBtu a que se chegou há cerca de um mês.

Concluimos que, aos preços actuais do petróleo e sem considerar as penalidades de Quioto, o custo do MWh dos ciclos combinados ficará a cerca de 90 euros!

### Retomar a opção nuclear não é um caso isolado no mundo

Contrariamente à opinião menos informada, a energia nuclear está em expansão no mundo. Existem em funcionamento actualmente 440 reactores nucleares produzindo 16% da electricidade mundial (tabela 1). Neste momento estão em construção 24 reactores nucleares no mundo – com incidência na Ásia – estão encomendados 40 e propostos 73. Entre os países que mais estão a investir em capacidade nuclear contam-se a China, que vai decuplicar o seu número de centrais, a Índia, que irá multiplicar por quinze, e o Japão que prossegue a sua política de diminuir a sua exposição à dependência do exterior. Na Europa Ocidental apenas a Finlândia e a França decidiram construir centrais nucleares de terceira geração.

O debate está lançado em todos os outros países no seguimento da alta dos custos dos combustíveis.

### O actual paradigma energético nacional não é sustentável

Numa economia que cria pouca riqueza, que cada vez mais tem dificuldade em exportar e que tem vindo a aumentar enormemente a sua factura de importação de matérias-primas energéticas, a actual política energética não pode senão agravar estas fragilidades, especialmente num contexto de preços de petróleo superiores a 30 \$/bbl. A aposta nas energias renováveis e no gás natural conduzirão ao agravamento da impossibilidade da nossa indústria poder ser competitiva com outras economias, que têm um apoio significativo no nuclear.

De acordo com os dados de um estudo recente da UBS, em 2012 a factura eléctrica nacional, sem o recurso à energia nuclear, aumentará para o dobro num cenário de 60\$/bbl e 142% num cenário possível do petróleo a 80\$/bbl. Para além de continuarmos a importar a maior parte da energia de que necessitamos e a não valorizar um recurso endógeno de que dispomos com relativa abundância, o urânio natural.

	GERAÇÃO ELECTRICIDADE NUCLEAR 2004		REACTORES em OPERAÇÃO Mar 2006		REACTORES em CONSTRUÇÃO Mar 2006		REACTORES PLANEADOS Mar 2006		REACTORES PROPOSTOS Mar 2006		URÂNIO NECESSÁRIO 2006
	mil milhões kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	toneladas U
Argentina	7.3	8.2	2	935	1	692	0	0	0	0	134
Arménia	2.2	39	1	376	0	0	0	0	0	0	51
Bélgica	44.9	55	7	5728	0	0	0	0	0	0	1075
Brasil	11.5	3.0	2	1901	0	0	1	1245	0	0	336
Bulgária	15.6	42	4	2722	0	0	2	1900	0	0	253
Canada*	85.3	15	18	12595	0	0	2	1540	0	0	1635
China	47.8	2.2	9	6587	5	4480	6	5050	19	15000	1294
Republica Checa	26.3	31	6	3472	0	0	0	0	2	1900	540
Egipto	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Finlândia	21.8	27	4	2676	1	1600	0	0	0	0	473
França	426.8	78	59	63473	0	0	0	0	1	1600	10146
Alemanha	158.4	32	17	20303	0	0	0	0	0	0	3458
Hungria	11.2	34	4	1755	0	0	0	0	0	0	251
Índia	15.0	2.8	15	2993	8	3638	0	0	24	13160	1334
Indonésia	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4000	0
Irão	0	0	0	0	1	915	2	1900	3	2850	0
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Japão	273.8	29	55	47700	1	866	12	14782	0	0	8169
Coreia DPR (Norte)	0	0	0	0	1	950	1	950	0	0	0
Coreia OR(Sul)	124.0	38	20	16840	0	0	8	9200	0	0	3037
Lituânia	13.9	72	1	1185	0	0	0	0	1	1000	134
México	10.6	5.2	2	1310	0	0	0	0	0	0	256
Holanda	3.6	3.8	1	452	0	0	0	0	0	0	112
Paquistão	1.9	2.4	2	425	1	300	0	0	2	1200	64
Roménia	5.1	10	1	655	1	655	0	0	3	1995	176
Rússia	133.0	16	31	21743	4	3600	1	925	8	9375	3439
Eslováquia	15.6	55	6	2472	0	0	0	0	2	840	356
Eslovénia	5.2	38	1	676	0	0	0	0	0	0	144
África do Sul	14.3	6.6	2	1842	0	0	1	165	24	4000	329
Espanha	60.9	23	9	7584	0	0	0	0	0	0	1505
Suécia	75.0	52	10	8938	0	0	0	0	0	0	1435
Suiça	25.4	40	5	3220	0	0	0	0	0	0	575
Turquia	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4500	0
Ucrânia	81.1	51	15	13168	0	0	2	1900	0	0	1988
Reino Unido	73.7	19	23	11852	0	0	0	0	0	0	2158
EUA	788.6	20	103	98034	1	1065	0	0	13	17000	19715
Vietname	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
<b>MUNDO**</b>	<b>2618.6</b>	<b>16</b>	<b>441</b>	<b>368,496</b>	<b>27</b>	<b>21,361</b>	<b>38</b>	<b>39,557</b>	<b>113</b>	<b>82,220</b>	<b>65,478</b>

Tabela I - Geração de energia nuclear no mundo.

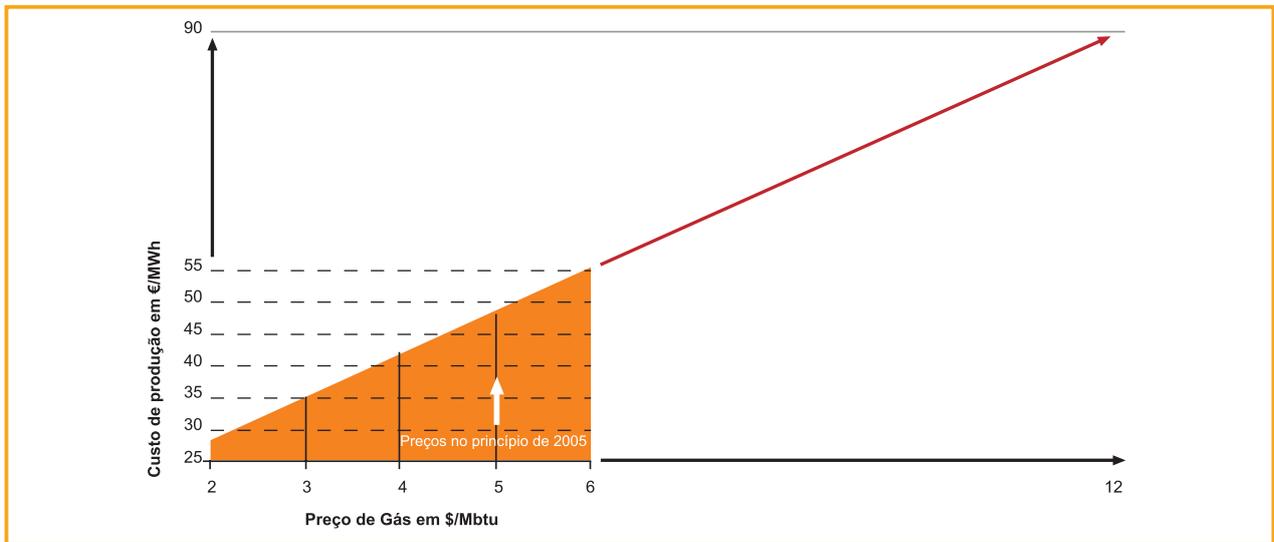


Fig. 12 - Variação do custo de geração de uma central a ciclo combinado em função do preço do gás.

CONCLUSÕES

Em conclusão podemos referir o seguinte:

(i) A produção a gás natural só será de novo competitiva no caso de uma forte queda dos preços do combustível. Essa queda só irá ocorrer se se criarem as condições de bolha de gás ou de mercado de compradores. Neste momento e face às intenções de investimento em geração de ciclos combinados estamos numa situação de mercado de vendedores. Foi o lançamento dos programas de geração nuclear na Europa Ocidental, aliada à exploração do Mar do Norte, que originou o contra choque dos preços do petróleo em 1986, a seguir aos choques de 1973 e 1979.

(ii) O relançamento do nuclear terá como consequência o desligar dos preços do petróleo e do gás natural. Permitirá ainda o lançamento da economia de hidrogénio a um custo igual ao actual do gás natural, se produzido por electrólise com base no nuclear.

(iii) Para Portugal é condição imprescindível passar a dispor de energia nuclear para assegurar a competitividade de da sua economia, diversificar fontes para aumento da segurança de abastecimento e da concorrência e cumprir as obrigações ambientais.

(iv) As tecnologias de cisão nuclear em desenvolvimento asseguram que não haverá escassez de combustível mesmo num cenário de retoma do nuclear, necessário para a resolução dos desafios que se colocam à humanidade, do ponto de vista ambiental, de desenvolvimento sustentável e de segurança de abastecimento. Esta retoma permitirá fazer a ponte para a fusão nuclear ou para um sistema assente em energias renováveis competitivas e estáveis.

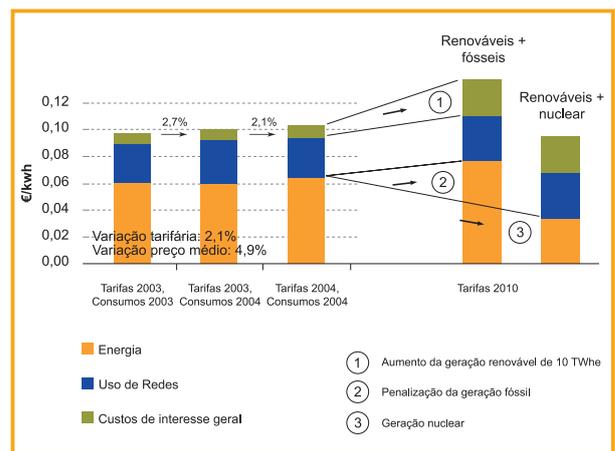


Fig. 13 - Impacto estimado do sobrecusto das renováveis e das penalidades de Quioto.

# <http://spf.pt>

Visite o nosso "site" e faça-se sócio da Sociedade Portuguesa de Física

A investigação em fusão nuclear conduziu a progressos notáveis nas últimas décadas, permitindo enfrentar com confiança a próxima etapa destinada a demonstrar a viabilidade da fusão como fonte de energia, o projecto ITER.

Neste trabalho expõem-se os princípios básicos da fusão e o modo de funcionamento de um futuro reactor. Apresentam-se os progressos científicos e os avanços tecnológicos da fusão e descreve-se o projecto ITER. Finalmente analisa-se o papel relevante que a fusão deverá desempenhar nas opções energéticas para o futuro, tendo em conta a sua potencial capacidade de produzir energia eléctrica em larga escala, de forma competitiva e com reduzido impacto ambiental.

M. E. MANSO e C. A. F. VARANDAS

Instituto Superior Técnico

Centro de Fusão Nuclear, Associação EURATOM / IST

Instituto Superior Técnico - Av. Rovisco Pais,

P-1049-001 Lisboa, Portugal

[emilia@cfm.ist.utl.pt](mailto:emilia@cfm.ist.utl.pt) / [cvarandas@cfm.ist.utl.pt](mailto:cvarandas@cfm.ist.utl.pt)

# FUSÃO NUCLEAR OPÇÃO ENERGÉTICA PARA O FUTURO

A Agência Internacional de Energia prevê que o consumo mundial de energia duplique nos próximos 40 anos. Actualmente cerca de 80% do consumo é assegurado pelos combustíveis fósseis, situação que não é sustentável pelas graves alterações atmosféricas que está a provocar e porque estes combustíveis deverão estar esgotados num futuro próximo (começando pelo petróleo). São, por isso, necessárias opções energéticas alternativas de grande escala, sendo a fusão nuclear uma dessas opções.

Numa reacção de fusão, pequenas quantidades de matéria dão origem a enormes quantidades de energia:  $3,136 \times 10^{-29}$  kg de combustível originam 17,59 MeV. Comparando com as reacções químicas, 1 milhão de vezes menos poderosas que as nucleares, tem-se, por exemplo, que cerca de um litro de combustível de fusão produz a mesma energia que 6600 toneladas de carvão.

A produção comercial de energia eléctrica a partir da fusão de átomos leves, tal como acontece no Sol e nas estrelas,

# AR, UMA ÉTICA O

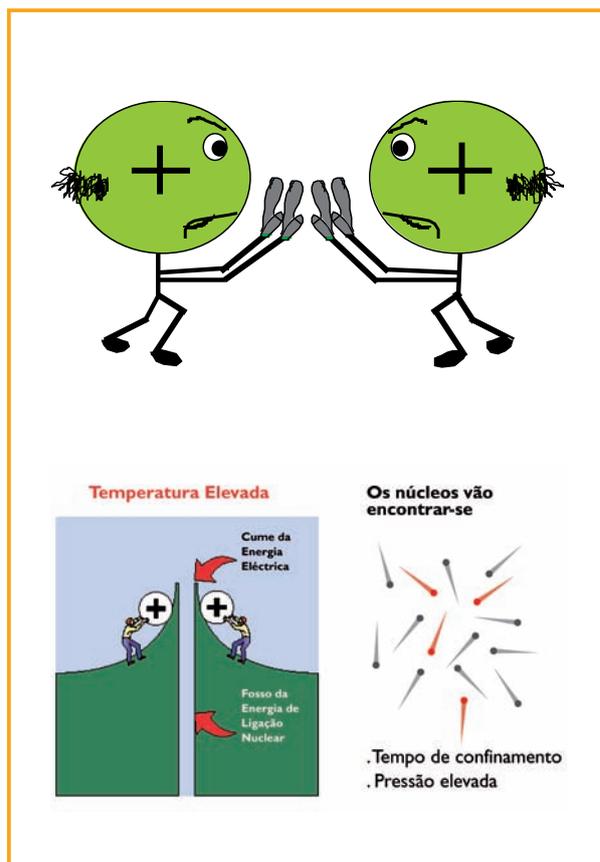


Fig. 1 - Condições para que ocorram as reacções de fusão.

porá à disposição do homem uma fonte alternativa de energia de larga escala, com baixo impacto ambiental. Numa altura em que a fusão nuclear vai entrar numa etapa decisiva, o projecto ITER, destinado a demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão, é importante perceber os princípios básicos desta nova forma de energia, o seu estado de desenvolvimento e as perspectivas futuras.

## PRINCÍPIOS BÁSICOS DA FUSÃO NUCLEAR

Para conseguir uma reacção de fusão é necessário aproximar dois núcleos que, devido a terem carga do mesmo sinal (positiva), têm tendência a repelir-se (Fig. 1). Para ultrapassar esta barreira natural e chegar à zona muito próxima do núcleo onde se manifestam as forças nucleares (Fig. 1), é preciso que os núcleos possuam uma energia considerável.

A fusão exige, por isso, que o meio que reage possua temperaturas muito elevadas, tipicamente da ordem de 100

milhões de graus Celsius (10 keV). A temperaturas tão elevadas, os electrões separam-se dos núcleos e a matéria fica no estado de plasma. O plasma é um meio ionizado, com comportamento colectivo e macroscopicamente neutro (Fig. 2), que existe na Natureza sob diversas formas; na realidade, 99 por cento da matéria do Universo encontra-se na forma de plasma, o quarto estado da matéria.

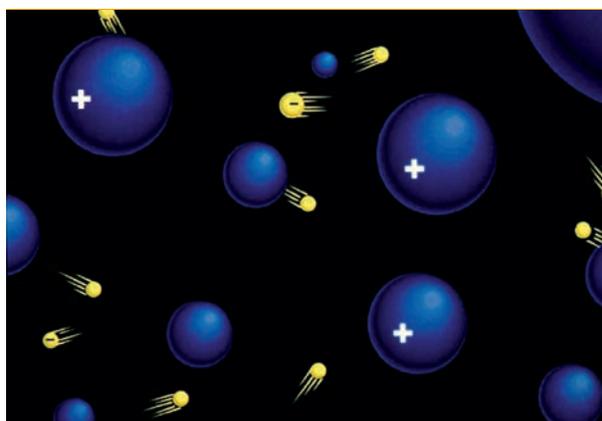


Fig. 2 - Representação esquemática de um plasma.

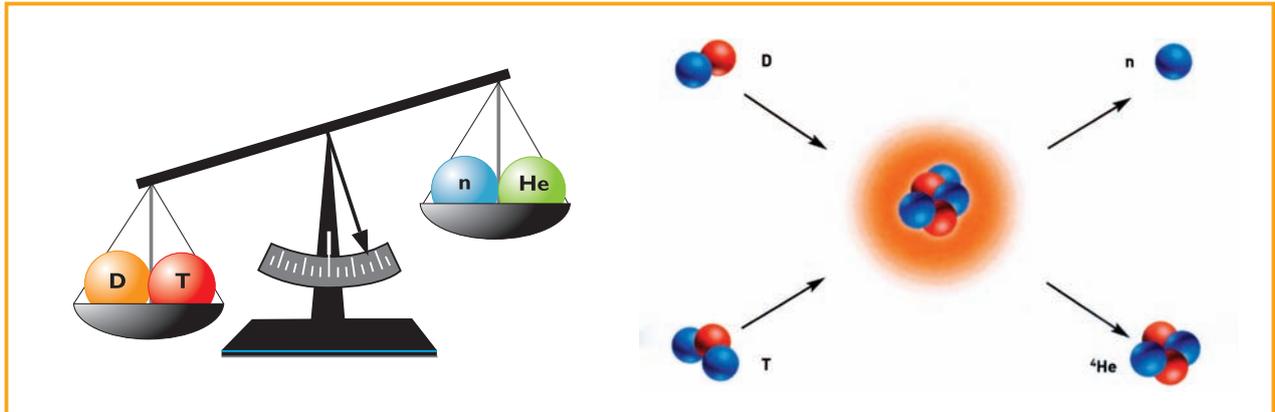
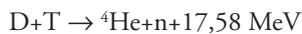


Fig. 3 - Reações de fusão com deutério e trítio.

### Combustível de fusão nuclear

A reacção de fusão mais fácil de conseguir actualmente na Terra é a que envolve deutério (D) e trítio (T), dois isótopos do hidrogénio (Fig. 3). Esta mistura já foi usada em dois dispositivos experimentais de fusão, os tokamaks TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*), nos Estados Unidos, e JET (*Joint European Torus*), na Europa.



Como veremos adiante, os combustíveis primários da fusão são o deutério e o lítio, uma vez que o trítio é obtido a partir do lítio, no interior do próprio reactor.

### Condições necessárias à obtenção de energia na fusão nuclear

Para que a fusão possa ser utilizada como fonte de energia é necessário que, além da temperatura elevada, o plasma esteja confinado o tempo suficiente para garantir que o conjunto de partículas carregadas sofra um número suficiente de reacções de fusão. Define-se um tempo de confinamento de energia,  $\pi$ , como o tempo que o plasma quente leva a perder a sua energia (por radiação, convecção e condução), quando se cortam abruptamente as suas fontes de aquecimento. O tempo  $\pi$  caracteriza, de certa forma, o isolamento térmico do plasma.

Para que a fusão seja rentável do ponto de vista energético, é ainda necessário que a energia produzida pelas reacções de fusão exceda largamente as perdas térmicas do plasma. Esta condição impõe um limite inferior ao produto da densidade ( $n_c$ ) pelo tempo de confinamento de energia ( $\pi$ ), dado pelo critério de *Lawson*:

$$n_c \cdot \pi > f(Q)$$

em que  $Q$ , factor de amplificação de energia, é a relação entre a potência de fusão produzida e a potência de aquecimento (exterior) fornecida ao plasma. A igualdade  $Q = 1$  significa que a potência gerada pelo plasma é igual à potência que lhe é fornecida do exterior. Este estado, conhecido por *breakeven*, é aproximado nos dispositivos experimentais actuais com melhor desempenho ( $Q = 0,6$  no JET). O valor  $Q = \infty$  significa que a potência exterior fornecida ao plasma é nula. Neste caso, o plasma é auto-sustentado e diz-se que se atingiu a “ignição”.

### FUSÃO NAS ESTRELAS E NA TERRA

As condições necessárias para que a fusão ocorra no Sol e nas outras estrelas são garantidas, naturalmente, por forças gravitacionais muito intensas (Fig. 4). Este confinamento gravítico não é possível na Terra. Há, contudo, duas vias alternativas para obter a fusão nos laboratórios: o confinamento magnético e o confinamento inercial.

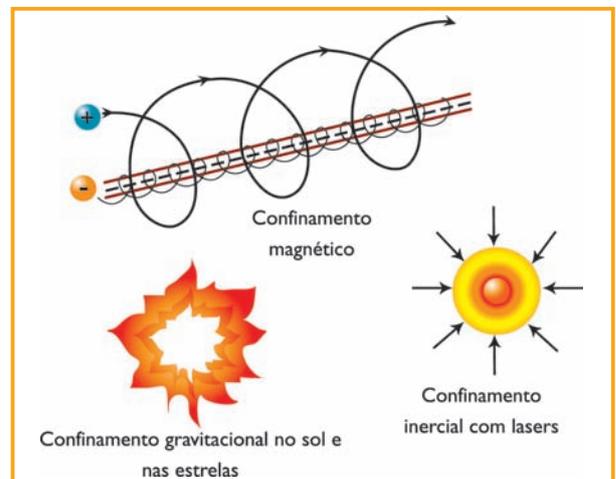


Fig. 4 - Vários tipos de confinamento de um plasma de fusão.

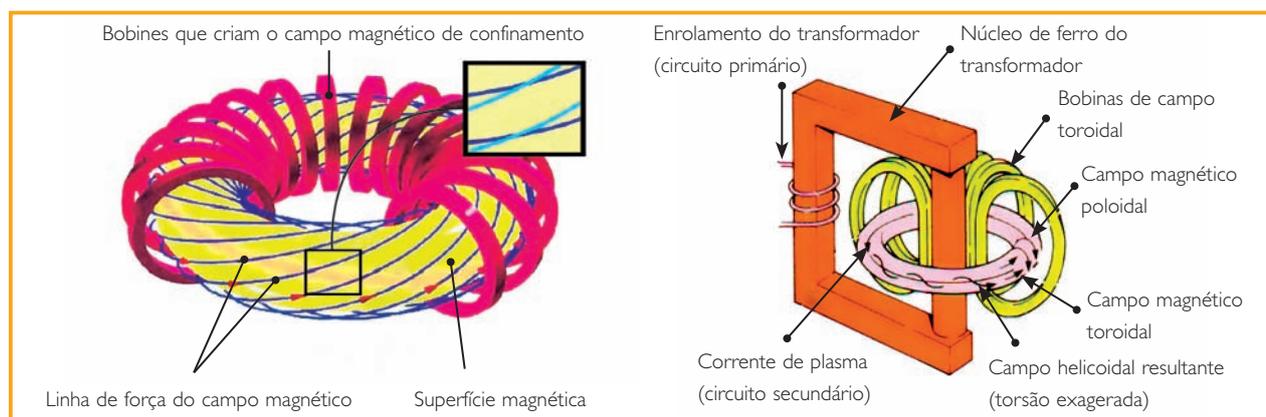


Fig. 5 - Configuração magnética num tokamak.

### Confinamento magnético

Como o plasma, representado esquematicamente na Fig. 2, é um fluido electricamente condutor (embora globalmente neutro), quando se lhe aplicam campos magnéticos, as partículas carregadas (iões e electrões) descrevem trajectórias em forma de hélice enrolando-se em volta das linhas do campo, ficando deste modo capturadas (Fig. 4). É este o princípio do confinamento magnético, o qual necessita de tempos de confinamento da ordem do segundo (fusão lenta), dado que as densidades do plasma são muito baixas (da ordem de  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ).

### Confinamento inercial

Nesta configuração são utilizados lasers muito potentes ou feixes de partículas que são focados num pequeno alvo, constituído por uma pequena cápsula de combustível formado por deutério e trítio (Fig. 4). O alvo é comprimido a densidades 1000 superiores às densidades típicas dos materiais sólidos e aquecido a temperaturas de cerca de 100 milhões de graus Celsius. As reacções de fusão ocorrem durante um tempo muito curto, da ordem de alguns bilionésimos de segundo (fusão rápida), uma vez que a densidade de combustível nas cápsulas é muito elevada ( $10^{27} \text{ m}^{-3}$ ).

### Tokamak

Até agora o confinamento magnético toroidal do tipo tokamak, de concepção russa, tem sido aquele que tem produzido melhores resultados, sendo, por isso, a configuração que se encontra mais desenvolvida.

As geometrias cilíndricas foram as primeiras a ser utilizadas mas deixavam escapar o plasma pelas extremidades. Para evitar esta situação, o cilindro foi fechado sobre si mesmo numa configuração toroidal semelhante à da câmara de ar

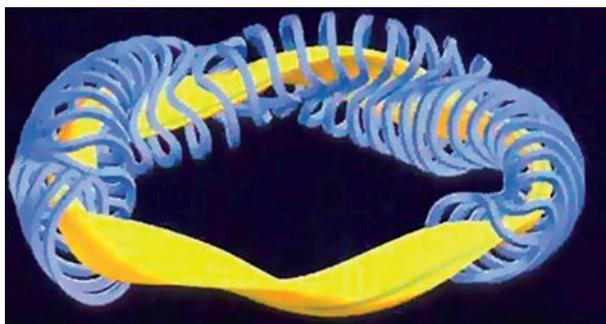
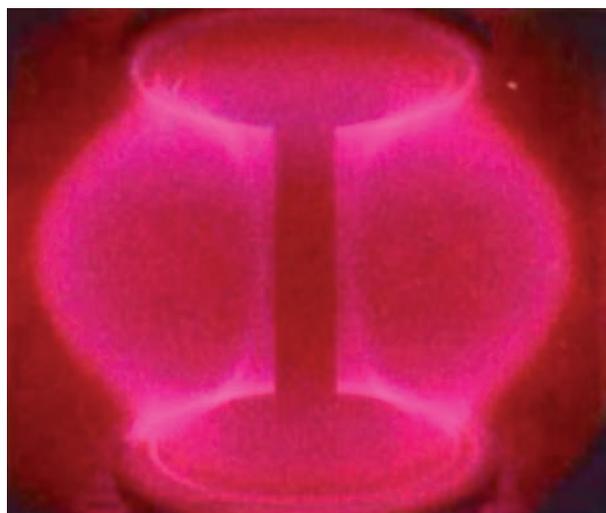
de um pneu (Fig. 5). No entanto, a curvatura (e, consequentemente, a força centrífuga) em conjunto com a não homogeneidade do campo magnético (mais elevado na parte interior do toróide do que na parte exterior) dão origem à deriva das partículas carregadas; os iões e os electrões têm tendência a separar-se e acabam por escapar do “aprisionamento magnético”. Para compensar este efeito as linhas do campo magnético devem ser helicoidais (Fig. 5), o que se consegue adicionando ao campo magnético toroidal um outro campo que lhe é perpendicular, o campo poloidal.

O campo magnético poloidal de um tokamak é criado por uma corrente axial que circula no próprio plasma, criada por indução magnética, comportando-se o plasma como o secundário do transformador (Fig. 5). O plasma assim originado designa-se por plasma indutivo. Um tokamak funciona, em princípio, em regime pulsado, uma vez que não é possível variar indefinidamente no tempo o fluxo magnético que circula no núcleo do transformador. Esta impossibilidade resulta da saturação do ciclo de histerese do ferro ou do fim da variação no tempo da corrente do primário.

O tokamak pode, no entanto, operar em regime contínuo desde que a corrente axial seja gerada de forma não indutiva, o que se consegue utilizando as ondas electromagnéticas e/ou os feixes de partículas usados no aquecimento auxiliar do plasma.

### Stellarator e outros dispositivos experimentais

O confinamento magnético do dispositivo experimental designado por stellarator (Fig. 6) assenta totalmente em correntes que circulam em bobinas exteriores ao plasma, sendo esta configuração intrinsecamente contínua. Há ainda outro tipo de dispositivos experimentais: o reversed-field pinch e uma versão mais compacta do tokamak, o tokamak esférico (Fig. 7). Este dispositivo experimental poderá vir a

Fig. 6 - Campos magnéticos num *stellarator*.Fig. 7 - Plasma num *tokamak* esférico.

dar contribuições importantes para o projecto dos futuros reactores de fusão, conduzindo a uma economia na sua construção e operação.

### Aquecimento do plasma

O aquecimento devido à corrente que circula no plasma de fusão (aquecimento ohmico) não é suficiente para que as reacções de fusão ocorram, tornando-se necessário usar métodos adicionais de aquecimento, através de:

- Injecção de partículas neutras de alta energia, sendo as partículas do feixe ionizadas no plasma e confinadas pelo campo magnético;
- Ondas electromagnéticas com frequências características do meio. Neste caso, a energia das ondas é transmitida ao plasma e a frequência das ondas permite definir qual a espécie de partículas (iões ou electrões) que vai ser aquecida e a região do plasma onde se dará o aquecimento.

As reacções de fusão num futuro reactor deverão ser em

número suficiente para que a energia dos núcleos de hélio (partículas alfa), que permanecem confinados no plasma, se torne o método de aquecimento dominante ( $Q > 5$ ).

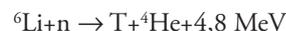
### REACTOR DE FUSÃO

A Fig. 8 apresenta o esquema de um reactor de fusão. A mistura de combustível é injectada na câmara (1) onde, graças aos sistemas de confinamento e de aquecimento, passa ao estado de plasma e é “queimado” (2). O plasma produz cinzas (átomos de hélio) e energia, sob a forma de radiação ou de partículas carregadas (3), que abandonam a sua energia na “primeira parede”, que constitui o primeiro obstáculo material que encontram para além do plasma. A energia cinética dos neutrões, por sua vez, é convertida em calor na camada fértil (*breeding blanket*) (4), que é o elemento situado depois da “primeira parede”, dentro da câmara de vácuo. Esta câmara isola o espaço onde se dão as reacções de fusão do exterior. A camada fértil desempenha assim várias funções: (i) recupera a energia dos neutrões; (ii) regenera o trítio necessário à reacção de fusão; (iii) protege a câmara de vácuo e o sistema magnético, reduzindo consideravelmente o fluxo e a energia dos neutrões.

A primeira parede, a camada fértil e a câmara de vácuo são arrefecidas por um sistema de extracção de energia. Esta energia é utilizada para produzir vapor, que vai ser usado para gerar energia eléctrica (5).

### Produção de trítio

O trítio necessário para as reacções de fusão existe em quantidades muito reduzidas na Natureza. No reactor, será produzido localmente através do bombardeamento com neutrões (produzidos na reacção de fusão) da camada fértil de lítio, utilizando a seguinte reacção:



### Materiais

Tal como em qualquer instalação sujeita a um fluxo de partículas de alta energia (como, por exemplo, num reactor de fissão e num acelerador), os materiais que constituem a estrutura do reactor de fusão serão activados. A escolha de materiais com tempo de decaimento rápido vai permitir minimizar a quantidade de detritos radioactivos e diminuir o impacto ambiental da fusão. A validação de materiais de baixa activação exige uma fonte de neutrões de 14 MeV, cujo desenvolvimento é o objectivo de um programa internacional designado por *International Fusion Material Irradiation Facility* (IFMIF).

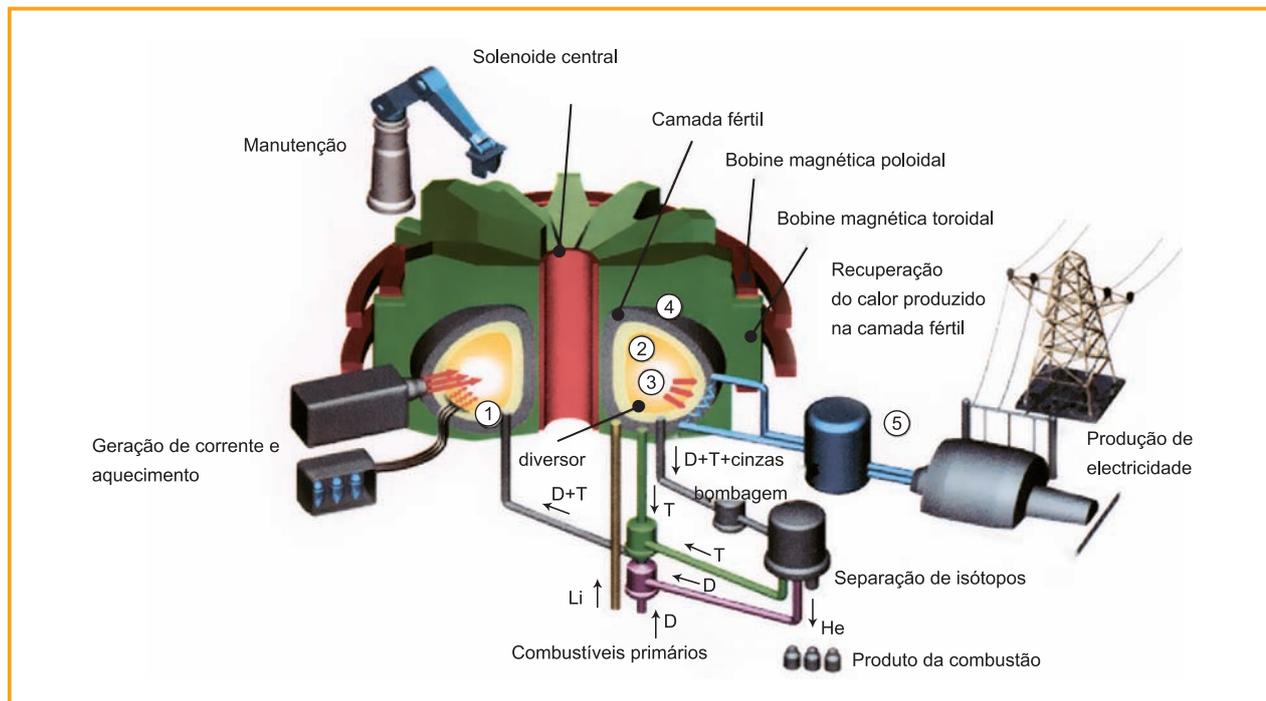


Fig. 8 - Esquema de um reator de fusão[1].

## VANTAGENS DA FUSÃO

A fusão nuclear é uma fonte potencial de energia limpa, “amiga” do ambiente, segura, praticamente inesgotável e economicamente atractiva.

### Combustíveis

Os combustíveis básicos, deutério e lítio, são abundantes e encontram-se bem distribuídos geograficamente. O deutério pode ser extraído de forma económica da água do mar (33 gramas por metro cúbico). Os recursos em deutério representam mais de 10 milhões de anos do consumo mundial anual de energia! Os recursos em lítio que são abundantes e estão bem distribuídos na Terra estão estimados para 2 000 anos, existindo a possibilidade de serem estendidos para vários milhões de anos assim que houver tecnologia para extrair o lítio da água do mar.

### Segurança

No caso de ocorrer qualquer tipo de acidente basta fechar a torneira de admissão do combustível para que as reacções de fusão cessem quase instantaneamente. Além disso, nas condições em que ocorrem as reacções de fusão, o plasma é muito pouco denso (alguns gramas de combustível para um volume superior a 1000 m<sup>3</sup>), pelo que a quantidade de

combustível presente no dispositivo experimental é muito pequena. Por outro lado, qualquer perturbação descontrolada do meio leva ao seu arrefecimento, cessando rapidamente as reacções de fusão. Ou seja, não existem reacções em cadeia e a continuação das reacções numa situação de descontrolo é intrinsecamente impossível.

### Ausência de poluição

A fusão, tal como as energias renováveis e a fissão, não produz gases com efeito de estufa ou poluição atmosférica.

### Baixa radioactividade

Nenhum dos combustíveis de base (deutério e lítio) ou o produto da reacção (hélio), são tóxicos ou radioactivos. O trítio, que é radioactivo, é um elemento que se decompõe em hélio por emissão de electrões pouco energéticos (5,7 keV) e tem um período de decaimento relativamente curto (12,3 anos). Mas, embora a sua radiotoxicidade seja baixa, num futuro reator é necessário ter em conta o facto de o trítio permear os meios materiais.

Os materiais que constituem a estrutura do reator serão activados. A investigação na área dos materiais permite prever a utilização de materiais de tempo de decaimento rápido, que vão minimizar a quantidade de detritos radioactivos.

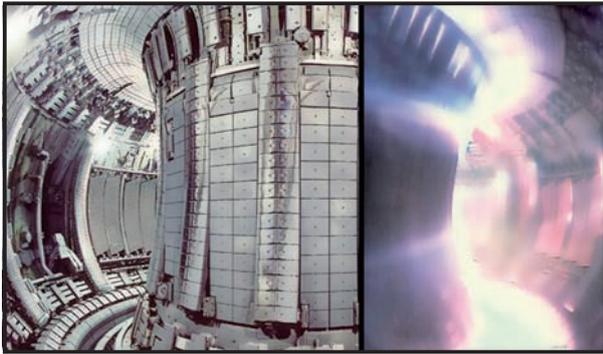


Fig. 9 - Interior do tokamak JET: (a) sem plasma; (b) com plasma.

Entre 50 e 100 anos após a paragem do reactor (dependendo dos avanços da investigação em materiais de baixa activação), será possível reciclar os detritos radioactivos e reintroduzi-los novamente na produção de energia de fusão.

**Aspectos económicos**

Existem vários modos de estimar os custos da energia obtida a partir de futuros reactores de fusão nuclear, baseados em modelos mais conservadores, que têm por base a extrapolação do desempenho previsto para o ITER com materiais convencionais, e outros que admitem materiais mais avançados e operações a temperaturas mais elevadas. Mesmo nos cenários mais conservadores, os estudos apontam para custos competitivos da energia de fusão, especialmente tendo em conta que deverá ser imposta num futuro próximo uma taxa sobre a quantidade de carbono produzido.

**PROGRESSOS EM FUSÃO NUCLEAR**

As primeiras experiências de confinamento magnético foram realizadas nos Estados Unidos da América em 1938. Em 1958 estabeleceram-se as primeiras colaborações internacionais na área da fusão nuclear. A nível europeu a investigação é coordenada pelo Tratado EURATOM; esta organização, completamente integrada, tem tido uma contribuição fundamental para a posição dominante que a Europa tem em fusão nuclear.

Em 1968 os cientistas russos anunciaram o desempenho superior do tokamak, que rapidamente suplantou as outras configurações. Vários tokamaks (de dimensões modestas) foram construídos em diversos países: Alemanha, França, Inglaterra, Itália, Estados Unidos, Federação Russa e Japão. Foi nestes dispositivos que foram desenvolvidos os meios de diagnóstico e controlo do plasma e os métodos de aquecimento, que levaram a um progresso rápido da compreensão da física dos plasmas de fusão e das tecnologias associadas ao processo de fusão. No fim dos anos 80 foram lançados vários projectos de tokamaks de grande dimensão: JET (EU), JT-60 (Japão) e TFTR (US). A França construiu em 1988 um tokamak (Tore Supra) dispondo de bobinas supercondutoras, destinado a preparar a física e a tecnologia de um futuro reactor com funcionamento contínuo. A descoberta nos anos 80 de um regime de funcionamento com confinamento superior (modo H) revelou-se fundamental, sendo actualmente o regime de referência para o funcionamento do ITER.

O tokamak JET (Fig. 9) é actualmente o maior tokamak do mundo e aquele onde foram conseguidos os resultados mais espectaculares: em 1997 foram obtidos 16 MW de potência de fusão com um factor de amplificação de

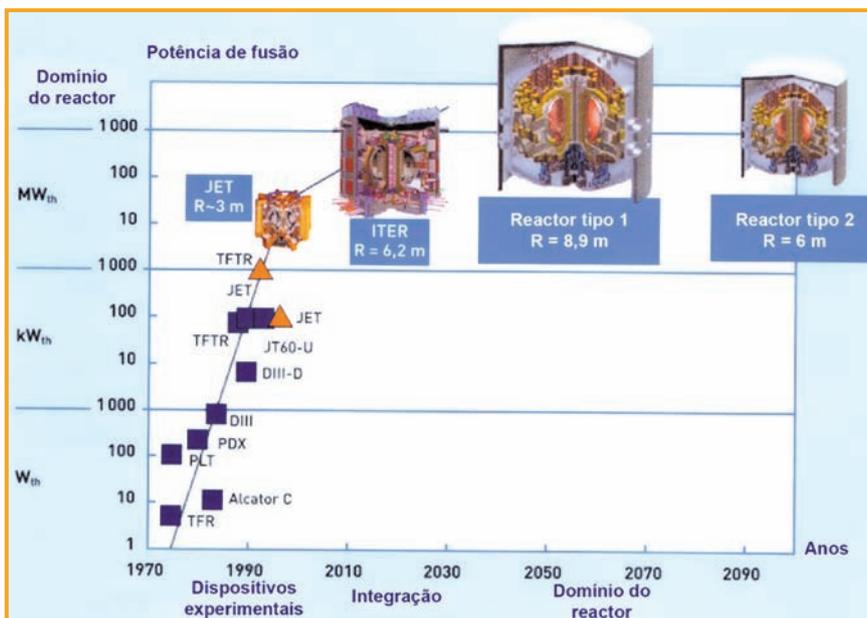


Fig. 10 - Avanços na fusão nuclear desde 1970 e caminho em direcção ao reactor de fusão nuclear [1].

potência  $Q \cong 0,65$ , muito próximo das condições de *breakeven* ( $Q = 1$ ). O JET tem capacidade de realizar plasmas D-T e está equipado com as tecnologias associadas: gestão do ciclo do trítio e meios de manipulação por telecomando. Em 1998 o *diversor*, que é o componente do *tokamak* destinado a extrair as cinzas resultantes das reacções de fusão, foi totalmente substituído por manipulação telecomandada. Outros avanços notáveis em termos de confinamento do plasma, exploração de cenários de operação e desenvolvimento de tecnologias têm sido conseguidos noutros dispositivos experimentais mais pequenos e mais especializados. A próxima etapa consiste na integração de todos os resultados e tecnologias numa mesma instalação, o *tokamak* ITER.

A Fig. 10 apresenta os avanços obtidos desde 1970 e o caminho em direcção a um reactor capaz de produzir energia eléctrica a partir de reacções de fusão nuclear.

### Projecto ITER

O *International Thermonuclear Experimental Reactor*, (ITER) (Fig. 11), é uma experiência que vai funcionar em condições muito próximas das de um reactor de fusão. Será construído em Cadarache, França, no âmbito de uma colaboração à escala planetária, tendo como parceiros principais a Euratom, o Japão, a Federação Russa, os Estados Unidos da América, a China, a Coreia e a Índia e o seu início está previsto para 2006.

O objectivo principal do ITER é demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da energia de fusão por confinamento magnético. Este *tokamak* poderá produzir 500 MW de potência de fusão durante 400 segundos com o auxílio de 50 MW de potência de aquecimento, ou seja com uma amplificação de energia de um factor de 10 ( $Q = 10$ ), permitindo o estudo de plasmas de combustão, isto é, de plasmas em que o aquecimento devido às partículas alfa (núcleos dos átomos de hélio) geradas na reacção de fusão é dominante.

O ITER será o primeiro dispositivo experimental a integrar a maior parte das tecnologias essenciais ao reactor: bobinas supercondutoras de grande dimensão, capazes de criar elevados campos magnéticos, componentes expostos ao plasma arrefecidos activamente, gestão do trítio, manutenção completamente robotizada e módulos com camada fértil de lítio. Prevê-se que os períodos de construção e de exploração sejam, respectivamente, de 10 e 20 anos.

### FUTURO ENERGÉTICO

Tendo em conta os problemas actuais associados ao consumo de energia (em recursos e em custos ambientais),

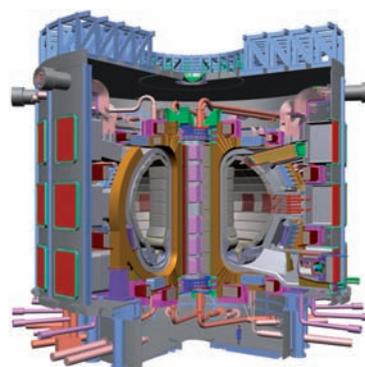


Fig. 11 - O *tokamak* ITER.

a geração de hoje tem a responsabilidade de preparar as bases do conhecimento das soluções energéticas do futuro. A fusão nuclear, processo de produção de energia no Sol e nas estrelas, com capacidade de produzir energia em larga escala e respeitadora do meio ambiente, deverá constituir uma opção energética indispensável para o futuro.

Os resultados obtidos até agora permitem prever o sucesso do projecto ITER, destinado a demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão. A etapa seguinte será a construção de um dispositivo experimental com a capacidade de produzir energia eléctrica a partir da energia de fusão, o *DEMO*. Através de uma política de desenvolvimento paralelo das diferentes fases conducentes ao reactor comercial de fusão, prevê-se que a energia de fusão esteja disponível na segunda metade deste século.

Citando a famosa frase do físico Lev Artsimovitch em resposta à pergunta “Quando é que a fusão nuclear vai estar pronta?”, diremos “A fusão estará pronta quando a sociedade precisar dela”.

### BIBLIOGRAFIA

1. *Le Soleil et la Terre*, CLEFS – CEA n° 49, 2004.
2. *La Fusion Nucléaire*, J. Weisse, Que sais-je?, 2003.
3. “Energy Powering your World”, EFDA, 2002.
4. “Fusão Nuclear, Energia para o Futuro”, JET Joint Undertaking, 1995.

Os desafios económicos, energéticos e ambientais a que o sector dos transportes rodoviários se encontra sujeito têm servido de estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias de propulsão assim como de novos combustíveis. Aborda-se aqui a questão da introdução de veículos e combustíveis alternativos no sector dos transportes identificando os principais desafios e barreiras, assim como as potenciais vantagens a médio e longo prazo.

TIAGO LOPES FARIAS

Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais, Pavilhão de Mecânica 1, 2.º Andar

1049-001, Lisboa

tiago.farias@ist.utl.pt

# VEÍCULOS ALTE

Os compromissos do Protocolo de Quioto implicam a redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) em 5% no período 2008-2012 face às emissões de referência de 1990. No que respeita à Europa, e devido ao seu papel mais influente na produção de GEE, esta redução terá de ser de 8%. Portugal, pelo menos neste capítulo, pôde tirar proveito da sua fraca taxa de industrialização, e ao abrigo do Protocolo viu-se numa situação bastante vantajosa, já que ficou autorizado a aumentar as suas emissões em 27%. Volvidos 15 anos durante os quais pouco foi feito no sentido de garantir os compromissos estabelecidos, o cenário é agora bastante menos animador. As emissões aumentaram em mais de 30%, devido essencialmente ao sector dos transportes.

De entre os vários modos de transporte (rodoviário, ferroviário, marítimo e aéreo), é o rodoviário que maior peso tem, contribuindo com mais de 80% para o total das emissões de GEE. Esta contribuição resulta essencialmente dos ligeiros de passageiros e dos transportes de

# TERNATIVOS

situações, nomeadamente com as emissões de poluentes nocivos? Ou terão de ser as outras fontes de emissão, como a indústria, ou a produção de energia, a compensar os efeitos poluidores devidos aos transportes?

## VEÍCULOS ALTERNATIVOS DO FUTURO: HIDROGÉNIO E PILHAS DE COMBUSTÍVEL

A primeira ideia que nos vem à cabeça é simples: por que não substituir os motores e os combustíveis que temos vindo a utilizar há décadas por novas soluções que emitam menos dióxido de carbono, menos poluentes, e que gastem menos combustível? Por outras palavras, não haverá soluções tecnológicas que resolvam o problema? Muito se fala hoje em dia das pilhas de combustível, um sistema inventado no século XIX, cujo princípio de funcionamento é simples. Trata-se de produzir energia eléctrica invertendo o processo de electrólise da água. Ou seja, se podemos separar as moléculas de hidrogénio e oxigénio da água usando energia eléctrica, torna-se possível, juntando hidrogénio com oxigénio, gerar energia eléctrica. Passaríamos então a ter veículos eléctricos que emitiriam apenas água. Um processo simples, no papel, mas que apresenta uma vasta gama de problemas. Para além das dificuldades em desenvolver equipamentos fiáveis, compactos, e com um custo competitivo, o combustível em causa é o hidrogénio. Para muitos, só o nome assusta. Mas, para os mais conhecedores da matéria, os problemas são de outra natureza. Por exemplo, como será produzido o hidrogénio? De fontes renováveis? Do gás natural? Do petróleo? Mesmo que estas barreiras sejam ultrapassadas, será necessário abastecer regularmente os nossos automóveis. Será que o futuro passa pela existência de uma rede europeia de hidrogénio, à semelhança do que estamos a construir para o gás natural? E, caso se adopte este combustível, como armazená-lo a bordo de um veículo? Comprimido em tanques a 300 a 700 bar? Ou líquido a uma temperatura negativa de 253 °C? E quanto ao preço? Alguma vez poderá vir a ser competitivo com a gasolina e o gasóleo? Embora o cenário seja pouco apelativo, os grandes construtores de automóveis têm vindo a apostar fortemente nesta tecnologia. São exemplos disso a Daimler Chrysler, com a sua família de modelos NECAR, e, mais recentemente, o *F600 Hygenius*, a Ford, com modelos derivados do Focus, e a General Motors, que investiu fortemente nesta tecnologia, tendo fundado o *Global Alternative Propulsion Center* (GAPC). Igualmente ambiciosas foram a Toyota e a Honda que já se encontram a comercializar os seus modelos, numa forma ainda experimental, na Califórnia (Fig. 1).

A General Motors foi ainda mais longe, tendo optado por uma estratégia dupla. Por um lado, desenvolve um modelo baseado na filosofia actual do conceito automóvel, tendo originado o *Hydrogen 3* (baseado no Opel Zafira).

mercadorias com 50% e 40% respectivamente. Ou seja, o problema dos transportes, face ao Protocolo de Quioto, é essencialmente um problema de transportes rodoviários.

A juntar ao Protocolo de Quioto, surge também a questão da poluição atmosférica local, do ruído do tráfego, assim como a quase total dependência energética que o sector dos transportes rodoviários tem de um único produto: o petróleo. Isto é, enquanto outros sectores diversificaram a sua fonte energética, nos transportes rodoviários a aposta foi “num só cavalo”.

Face ao que foi referido, as perguntas que se colocam são bastante simples. O que se poderá fazer para inverter esta situação? Haverá medidas e políticas possíveis de concretizar em tão curto intervalo de tempo? Estarão os cidadãos, ou melhor ainda os condutores, preparados para aceitar as medidas ou as novas tecnologias e participar activamente na resolução deste problema? Será que a tecnologia vai resolver o problema, como tem acontecido com outras



Fig. 1 - A família NECAR da Daimler Chrysler (em cima) e o Mercedes Hygenius (em baixo).

Por outro, promove o conceito de veículo do futuro, que combina o hidrogénio, as pilhas de combustível (e logo a propulsão eléctrica) e a tecnologia *by wire*. Nasceu assim o *Hy-Wire*, um modelo que, tirando partido do conceito de plataforma em forma de *skate board*, possibilita a permuta de carroçarias sem alterar o sistema de tracção e controlo, todos acomodados na plataforma (Fig. 2).

### O HIDROGÉNIO EM PORTUGAL

Na Europa, o projecto *Clean Urban Transports for Europe* (CUTE) promoveu a demonstração da aplicação combinada de pilhas de combustível e hidrogénio em frotas de transportes urbanos de passageiros. O projecto envolve nove cidades europeias cujos operadores locais estão a utilizar, inseridos nas suas frotas, três autocarros a pilhas de combustível fornecidos pela Daimler-Chrysler. Em paralelo, a BP e a Shell fornecem as infra-estruturas necessárias para a produção, transporte e abastecimento de hidrogénio.

Portugal apresenta um papel muito activo neste projecto, uma vez que a cidade do Porto (mais concretamente a Sociedade de Transportes Colectivos do Porto, STCP) aderiu à ideia, tendo iniciado em Fevereiro de 2004 a utilização de três autocarros a hidrogénio (Fig. 3). A estação de abastecimento foi fornecida pela BP, sendo o hidrogénio produzido em Alenquer numa fábrica daLinde. O Instituto Superior Técnico é responsável pelos estudos de emissões globais (desde a produção do hidrogénio até à sua utilização pelo autocarro) para comparação com soluções convencionais, nomeadamente os autocarros Diesel e a gás natural ao serviço da STCP.

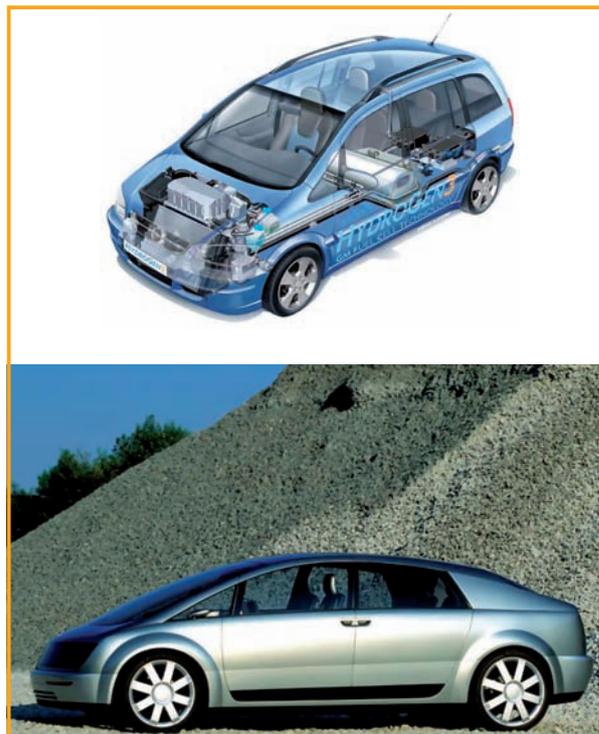


Fig. 2 - Opel Hydrogen (em cima) e Hy-Wire e GM Sequel: uma visão do automóvel do futuro (em baixo).

Embora as pilhas de combustível não passem ainda de uma aventura por parte dos construtores de automóveis e das petrolíferas, os investimentos já realizados e as apostas quer políticas quer tecnológicas apontam para que possamos vir a ter outro combustível a concorrer com a gasolina e o gasóleo. Resta saber quando! Porque, mesmo sabendo das potencialidades do hidrogénio como nova fonte energética no mundo automóvel, são várias as barreiras a ultrapassar. Fica assim o desafio à ciência, à indústria automóvel, de componentes e de combustíveis, aos grandes decisores políticos e à sociedade em geral.



Fig. 3 - Autocarro da Mercedes Benz a pilhas de combustível que funcionou regularmente entre 2004 e 2005 como parte da frota da STCP (Porto).



Fig. 4 - Toyota Prius (à esquerda) e Honda Civic IMA (à direita): a tecnologia.

### VEÍCULOS ALTERNATIVOS DO PRESENTE: HÍBRIDOS

Mas continuando os motores de combustão interna a dominar os transportes rodoviários, a solução alternativa passará pela redução dos consumos ou pela substituição da gasolina e do gasóleo por combustíveis mais “limpos”. A Associação Europeia dos Construtores Automóveis (ACEA) assinou um acordo voluntário de redução de consumos. Significa que, em média, os veículos comercializados no futuro emitirão menos dióxido de carbono por quilómetro do que os actuais. Não significa, contudo, que venhamos a ter menores emissões, pois esse factor dependerá do utilizador. Nada nos diz que venham a ser adquiridos os modelos que menos consomem. Que o diga a Volkswagen, que apresentou o *Lupo 3L Tdi*. O famoso “três litros” (é isto mesmo: só consome 3 litros aos cem) teve muito poucos aderentes.

No que respeita aos combustíveis alternativos, as soluções existem. O gás natural apresenta-se como uma solução interessante para frotas urbanas. Implica a utilização de vários reservatórios cilíndricos a bordo que ocupam espaço e aumentam o peso do veículo. Adicionalmente, seria necessário haver uma rede de abastecimento nacional que permitisse enchimentos rápidos. Os biocombustíveis (biodiesel e bioetanol) poderão trazer mais valias em termos de emissões de dióxido de carbono e de redução da dependência do petróleo. Contudo, os problemas relacionados com a produção e o respectivo custo terão de ser ultrapassados.

Uma forma inteligente de otimizar o funcionamento do sistema de propulsão de um automóvel é recorrer a sistemas híbridos que conjugam a energia eléctrica com a gerada pelo motor convencional de combustão interna. As grandes vantagens residem, por um lado, no facto de ser possível regenerar a energia durante as travagens e, por outro, permitem a utilização do motor de combustão interna, sempre que possível, perto do seu regime de rendi-

mento máximo. Se pensarmos que, em condução urbana, mais de 40% do consumo de combustível se dissipa sob a forma de calor nos discos dos travões, rapidamente nos apercebemos das potencialidades dos veículos híbridos. Estes apresentam, na prática, consumos menores, embora à custa de um sistema de propulsão mais complexo e, de certa forma, duplicado. Independentemente da sua complexidade, o processo de proliferação destas tecnologias parece agora irreversível. O sucesso dos modelos da Toyota (nomeadamente o *Prius*) e da Honda (*Civic IMA*) (Fig. 4), assim como as declarações e alianças recentemente anunciadas pelos principais construtores (nomeadamente GM, Mercedes e BMW) são prova disso. Isto é, a médio prazo teremos o mercado inundado de veículos híbridos. Mais eficientes, menos poluidores, mas forçosamente mais caros.

Recordando que as políticas de transportes têm de perseguir objectivos mais vastos que o aumento da eficiência energética, expõem-se os conceitos básicos e fornecem-se exemplos de boas práticas no que respeita à procura de mobilidade e à gestão dos fluxos e comportamento dos condutores e veículos nesses fluxos, mostrando a multiplicidade de frentes em que é possível actuar para haver sucesso. Apresenta-se o conceito recente de *Vehicle-to-Grid*, no qual os veículos de transporte individual deixam de ser apenas consumidores de energia, passando também a ter um papel de fornecedores à rede eléctrica, sobretudo em situações de pico de procura ou de perturbação no fornecimento de base.

JOSÉ MANUEL VIEGAS e FILIPE MOURA  
Instituto Superior Técnico  
Centro de Sistemas Urbanos e Regionais,  
1049-001 Lisboa

viegas@ist.utl.pt  
fmoura@ist.utl.pt

# A PROCURA E A EFICIÊNCIA E NOS TRANSPORTES

Para além da eficiência energética, a política de transportes não pode deixar de atender a outros objectivos: a eficiência económica do sistema de transportes, a equidade e coesão social e a sustentabilidade ambiental são pilares essenciais dessa política.

A eficiência económica é fundamental quer do lado da produção dos serviços de transportes quer do lado dos consumidores. Nesta vertente, os ganhos internos ao sistema de transportes repercutem-se em ganhos de eficiência das actividades económicas e sociais em geral.

Por outro lado, o Estado deve atender às necessidades de equidade e coesão social do território nacional, garantindo níveis de cobertura de território no desenho da rede e dos horários dos sistemas de transportes, assim como as obrigações de serviço público nos transportes públicos (nomeadamente no que respeita à regularidade, à capacidade e às tarifas acessíveis destes serviços).

Também é obrigação do Estado criar as regras e estímulos que conduzam à minimização dos impactes ambientais decorrentes da actividade transportadora, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental do país.

O atendimento dos objectivos em qualquer destas outras dimensões não é obrigatoriamente contrário à procura da eficiência energética, antes deve ser integrado nela.

# ENERGÉTICA

## TRANSPORTES

Existem várias frentes de ganho de eficiência nos transportes: através da tecnologia, da gestão da procura, dos fluxos e dos comportamentos dos condutores.

Estando as intervenções sobre as tecnologias da oferta tratadas noutra artigo desta revista<sup>1</sup>, o presente artigo foca as restantes frentes, através das quais se pretende, por um lado, influenciar as escolhas de mobilidade de pessoas e mercadorias e, por outro, modificar os comportamentos dos condutores para tirar melhor partido dos recursos sem modificar os padrões de mobilidade. São apresentados alguns exemplos de boas práticas em cada uma das secções.

Por fim, é ainda apresentado o conceito de “veículo-para-a-rede” (do inglês *vehicle-to-grid* – V2G) através do qual o sistema de transportes aparece não só do lado dos consumidores de energia, mas também na distribuição descentralizada de energia como parceiro do sector energético. Essa mudança do papel dos veículos no sistema energético poderá mudar a abordagem ao problema da eficiência energética do sistema de transportes.

### INTERVENÇÃO SOBRE A PROCURA DE TRANSPORTES

Existem, essencialmente, quatro famílias de instrumentos de intervenção sobre o sistema de transportes: preços,

regulamentos, informação e usos de solo. Perante sistemas complexos, as intervenções mais eficazes são as que recorrem conjuntamente a vários instrumentos (Vieira, 2005). Acresce ainda que a consideração dos outros objectivos citados obriga frequentemente a intervenções mais complexas. Nas próximas subsecções são apresentados exemplos de aplicação destes instrumentos para diversos objectivos operacionais: transferência modal, ocupação dos veículos, redistribuição dos tempos da mobilidade, redução/substituição da mobilidade e gestão dos fluxos e dos comportamentos.

### Transferência modal

Pretende-se com a transferência modal que as pessoas e as empresas optem pelo modo de transporte mais eficiente para cada deslocação ou cadeia de deslocações, usando vários instrumentos, nomeadamente mecanismos de preço, regulamentos e informação explícita (ou implícita) para os utentes.

Uma das formas utilizadas no domínio dos preços é a internalização dos custos externos nos preços finais para o utente. Pretende-se que o preço reflecta a totalidade dos custos ocasionados por cada modo, atenuando esta falha de mercado que distorce as condições de concorrência entre os vários modos. Na Suíça, Alemanha e Áustria, foram adoptadas portagens sobre camiões que utilizam as auto-estradas (todas as estradas no caso da Suíça). No entanto, esta medida parece não estar para já a induzir transferência modal mas apenas uma melhor ocupação dos camiões [2].

Outra possibilidade é a adopção de preços que reflectam a escassez dos recursos, nomeadamente em situações de congestionamento urbano onde o recurso escasso é o espaço. A portagem urbana foi introduzida em Singapura, em três cidades norueguesas e posteriormente em Londres (Fig. 1). Define-se nestes casos um cordão envolvendo o núcleo da cidade, no interior do qual os condutores devem pagar o direito de circulação. Em Singapura, existe uma diferenciação do preço pago consoante a hora de entrada no sistema.

A transferência modal pode ainda ser atingida através de regulamentos de racionamento limitativo. Neste caso, definem-se quotas de utilização do sistema, podendo as regras de atribuição dessas quotas premiar os utentes mais eficientes do ponto de vista energético. Na passagem rodoviária do Brenner (Áustria) foi definido um sistema de “ecopontos”, com um montante fixo disponível diariamente. A atribuição de “ecopontos” a cada veículo pesado é efectuada com base na tecnologia do veículo: quanto mais eficiente, menor é a quantidade de “ecopontos” a adquirir por cada passagem [3]. Existem outros sistemas regula-





Fig. 2 - Faixa exclusiva para veículos com ocupação elevada (Califórnia).

### Redistribuição dos tempos da mobilidade

Outra forma de ganhar eficiência energética consiste na deslocação dos veículos em regimes fluidos e a velocidades estáveis, através da melhor distribuição temporal das viagens.

Os mecanismos de preço também têm sido utilizados neste sentido:

- Preços diferenciados consoante o horário de uso da viatura particular, como nas portagens ao domingo à tarde a norte de Paris, e as tarifas de TC variáveis em hora de ponta (mais elevadas) e fora de ponta (mais baixas), em Santiago do Chile ou em Washington;
- Definição de preços variáveis consoante o nível de congestionamento, como por exemplo em algumas auto-estradas nas regiões de San Diego e Toronto, com actualização em tempo real, e disponibilização da informação previamente (*Web*) e no momento da escolha do percurso.

Também o racionamento limitativo pode constituir uma alternativa para a redistribuição dos tráfegos ao longo do dia. No essencial, trata-se de definir níveis máximos de utilização em sistemas de capacidade finita, pela obrigação de reserva prévia. Este sistema, usado desde sempre na aviação [10], pode ser facilmente aplicado em secções críticas da rede viária interurbana, como por exemplo em

túneis e pontes, entre outros, e ser complementado por um esquema de preços variáveis consoante a procura dos vários períodos (*yield management ou revenue management*).

### Redução e substituição da mobilidade

A substituição de viagens por serviços mais eficientes é promovida pela “mobilidade virtual” recorrendo às tecnologias de informação, nomeadamente à *Internet*. Esta mobilidade virtual pode ser eficaz sobretudo para (algum) trabalho, compras, (alguma) cultura e lazer. No entanto, pode gerar mobilidade de substituição (no caso das compras) ou mesmo em acréscimo face à libertação de tempo, nomeadamente gerando pendulações mais longas na procura de outras oportunidades de trabalho anteriormente inacessíveis, ou mesmo mais projectos que passam a ser comportáveis por via dos ganhos de tempo.

### GESTÃO DOS FLUXOS E DOS COMPORTAMENTOS

Nesta secção são apresentados alguns exemplos de medidas que também pretendem promover o melhor desempenho das viaturas através da gestão dos fluxos de tráfego e do comportamento dos condutores.

#### Maior homogeneidade no tráfego

A maior homogeneidade da corrente de tráfego promove a maior eficiência energética, reduzindo o número global de acelerações e desacelerações. Consoante os subsistemas de transportes as soluções variam:

- Segregação do tráfego rodoviário por pistas em função das características dinâmicas dos veículos;
- Vias de comboios rápidos e de comboios lentos (por exemplo, separação dos serviços suburbanos e interurbanos);
- Proibições de acesso de pesados em alguns troços de estrada com maior nível de saturação.

Adicionalmente, o treino de condução “suave” induz uma maior homogeneização das correntes de tráfego, reforçando o ganho de eficiência gerado no próprio veículo.

#### Ramp metering

O conceito de *ramp metering* visa reduzir a perturbação da corrente de tráfego nas auto-estradas pelas rampas de acesso. Já em utilização há vários anos em França, no Japão e nos EUA, são instalados semáforos nas rampas de

acesso a auto-estradas com fortes cargas de tráfego [11]. Os semáforos abrem o verde para um carro de cada vez quando os sensores detectam folga na corrente de tráfego da pista da direita (soluções inteligentes) ou, nas soluções semi-inteligentes, a intervalos regulares em função da carga de tráfego medida na pista da direita da auto-estrada.

### Corredor *BUS* intermitente (CBI)

O corredor *BUS* permanente só deve ser atribuído quando nessa pista possam ser servidas mais pessoas em TC do que em TI, o que corresponde a pelo menos 20 autocarros *standard* por hora. Com a introdução do conceito de corredor *BUS* intermitente, a pista de circulação alterna o seu estatuto, ficando reservada para os autocarros apenas quando estes se aproximam, dando-lhes condições de circulação idênticas às de um corredor *BUS* permanente [12]. Depois, essa pista regressa ao estatuto banalizado até à aproximação do próximo autocarro. Este conceito está em fase de projecto de demonstração na Alameda Universitária em Lisboa, desde Setembro de 2005 (Fig. 3).



Sem o CBI

Com o CBI

Fig. 3 - Implementação do CBI na Alameda Universitária em Lisboa.

### COMPLEMENTARIDADE POTENCIAL ENTRE OS TRANSPORTES E OS SISTEMAS ENERGÉTICOS

Nesta secção é apresentado o conceito de V2G, que consiste na transformação dos veículos em “micro-geradores dispersos”, quando as viaturas estão estacionadas.

#### Conceito de V2G

Na base do conceito de V2G está a constatação de que os automóveis estão parados 93 a 96% do tempo, gerando apenas custos (por exemplo, amortizações, seguros, custo com estacionamento, entre outros), quando poderiam gerar valor acrescentado. Por outro lado, num cenário futuro de larga disseminação de veículos com propulsão eléctrica (VPE), a autonomia típica destes veículos ronda os 150-200 km mas a distância média diária percorrida por cada veículo é aproximadamente 32 km, o que permite afirmar que haverá uma parte significativa de energia acumulada nos VPE, útil para outras funções além da mobilidade.

Os VPE podem ser veículos totalmente eléctricos (motor eléctrico), híbridos (combinação de motor eléctrico e com outra forma de propulsão - actualmente o motor de combustão interna) ou a pilhas de combustível (motor eléctrico alimentado a partir de hidrogénio). Nos EUA, estima-se que a potência total instalada na frota automóvel seja quatro vezes superior à potência total de geração instalada nos sistemas energéticos tradicionais, admitindo um parque automóvel totalmente constituído por VPE.

A Fig. 4 apresenta o diagrama ilustrativo do sistema de geração de energia V2G proposto por Kempton e Tomić [13]. Do lado esquerdo do diagrama, as fontes primárias geram energia eléctrica, conduzida pela rede até ao mercado de retalho. As setas duplas representam a possibilidade de haver um fluxo reversível de energia de, e para, os VPE. Na primeira situação, a energia flui dos geradores de energia para as baterias dos VPE, ou outros consumidores finais. Na segunda, os VPE assumem a função de “micro-geradores” e a energia flui dos veículos para a rede eléctrica.

Para o funcionamento deste sistema basta que exista ligação do veículo à rede eléctrica e uma forma de comunicação entre o veículo e o operador da rede que lhe contratará o serviço de fornecimento de electricidade. Esta função pode ocorrer, quer de noite, quer durante o dia, quando os veículos estão parados.

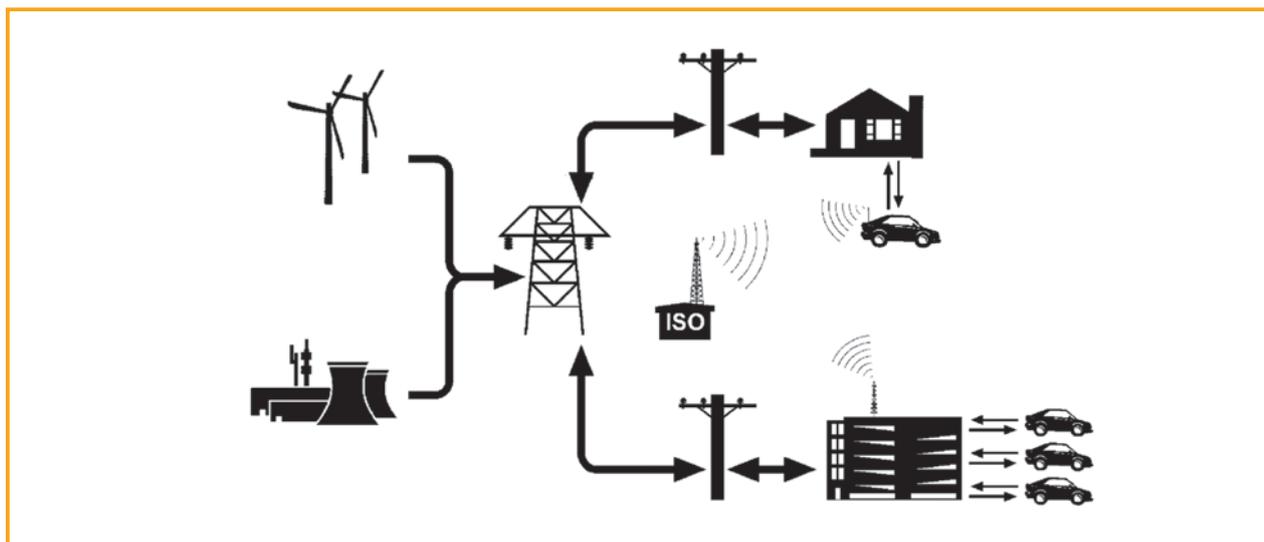


Fig. 4 - Diagrama ilustrativo do sistema de geração de energia V2G [13].

### Potencialidade

Diversos estudos [13-15] demonstraram que o sistema V2G pode ser rentável para o proprietário do veículo (isto é, na perspectiva do consumidor e sem contabilizar os custos de oportunidade), podendo os custos acrescidos de preparar o veículo para fornecer energia à rede eléctrica ser inferiores aos benefícios obtidos através da venda dessa electricidade à rede, para determinados mercados de energia, por exemplo os serviços de despacho da rede (através dos quais se procede à regularização contínua da frequência e da tensão da corrente eléctrica), horas de pico de procura e compensação de falhas de geração (recorrendo às reservas girantes). Se um VPE carregar a bateria em períodos de vazio, quando o preço do kWh é mais baixo, pode vender a electricidade a preços mais elevados, nos mercados acima referidos.

O V2G pode ser mais competitivo nestes mercados quando comparado com os sistemas vigentes (analisando os sistemas alternativos através dos seus custos económicos), nomeadamente as centrais a carvão ou as turbinas a gás, o que já não se verifica no mercado de fornecimento contínuo de electricidade [16]. A competitividade do V2G depende fortemente dos custos de capital dos VPE e das respectivas infra-estruturas de transportes de combustível e abastecimento [16], nomeadamente no que se refere aos veículos com pilhas de combustível e aos veículos totalmente eléctricos (devido aos custos ainda elevados das baterias).

### CONCLUSÕES

A busca da eficiência energética tem várias frentes, havendo múltiplos instrumentos de gestão da procura e dos fluxos de transportes com potencial significativo de ganhos de

eficiência, complementando os ganhos conseguidos do lado da oferta.

A eficácia dos instrumentos de gestão da procura e dos fluxos de transportes pode ser aumentada conjugando medidas, o que se torna desejável quando se pretende atender a vários objectivos políticos para além da eficiência energética. No entanto, as intervenções que pretendem mudar os comportamentos são sempre susceptíveis de encontrar resistência popular, porque envolvem muitas escolhas estruturais (locais de residência e trabalho) e os comportamentos foram adaptados ao sistema de transportes que conheciam até às decisões finais (isto é, anteriores às eventuais intervenções).

Face à multiplicidade de objectivos a perseguir, o que mais tem faltado é uma política coerente e estável de transportes, definindo orientações estratégicas e intervenções conjugadas dos vários agentes. Isso permitiria aos clientes do sistema de transportes definir as suas estratégias de mobilidade com base num melhor conhecimento de como este sistema irá evoluir.

Finalmente, ao abordar o binómio transportes/energia, a preocupação tem sido a de minimizar o consumo de energia pelos transportes. Poderemos assistir a uma nova realidade em que o sistema de transportes possa contribuir para a eficiência do sistema de energia, não só reduzindo a intensidade do seu consumo, mas também servindo como gerador complementar de energia (nomeadamente contribuindo para a descentralização da geração de energia). Por outro lado, o efeito indirecto do V2G seria a difusão mais rápida dos VPE, mais eficientes do ponto de vista energético (e ambiental), pelo facto de poderem gerar energia quando parados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Vieira, J., “Aplicação de instrumentos com objectivos ambientais no sector dos transportes: da intervenção regulamentar à multi-instrumentalidade”, *DeCivil-IST*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.
- [2] Suter, S. and Walter, F., “Environmental Pricing: Theory and Practice - The Swiss Policy of Heavy Vehicle Taxation”, *Journal of Transport Economics and Policy* **35**, 381-397 (2001).
- [3] Giorgi, L. and Schmidt, M., “Transalpine Transport: A Local Problem in Search of European Solutions or a European Problem in Search of Local Solutions?”, *Transport Reviews* **25**, 201-219 (2005).
- [4] Litman, T., *Mobility Management and Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities*, Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ), Eschborn, 2002, p. 44.
- [5] Cervero, R., “Planned Communities, Self-containment and Commuting: A Cross-national Perspective”, *Urban Studies*, **32**, 1135-1161 (1995).
- [6] Cervero, R. and Radisch, C., “Travel Choices in Pedestrian Versus Automobile Oriented Neighbourhoods”, *Transport Policy*, **3**, 127-141 (1996).
- [7] *Lisboa: o desafio da mobilidade*, Câmara Municipal de Lisboa (Ed.), Lisboa, 2005, p. 291.
- [8] Correia, G. and Viegas, J. M., “A framework for future development of neighbourhood mobility plans in Portugal” (working paper), *CESUR*, Instituto Superior Técnico, 2005.
- [9] Correia, G. and Viegas, J. M., “Car Pooling Clubs: Solution for the affiliation problem in traditional/dynamic ridesharing systems”, *Proceedings of the 10th Jubilee Meeting of the EURO Working Group on Transportation: "Advanced OR and AI Methods in Transportation"*, Poznan (Poland), 2005, pp 493-498.
- [10] Belobaba, P. P. and Wilson, J. L., “Impacts of yield management in competitive airline markets”, *Journal of Air Transport Management* **3**, 3-9 (1997).
- [11] Bogenberger, K. and May, A. D., *Advanced Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering Strategies*, ITS - Univ. of California, Berkeley, 1999, p. 69.
- [12] Viegas, J. and Lu, B., “The Intermittent Bus Lane signals setting within an area”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **12**, 453-469 (2004).
- [13] Kempton, W. and Tomić, J., “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, *Journal of Power Sources* **144**, 268-279 (2005).
- [14] Brooks, A. and Gage, T., “Integration of Electric Drive Vehicles with the Electric Power Grid: a New Value”, *Proceedings of the 18th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition*, 20-24 October, 2001, Berlin, Germany.
- [15] Lipman, T. E., Edwards, J. L. and Kammen, D. M., *Economic Implications of Net Metering for Stationary and Motor Vehicle Fuel Cell Systems in California*, University of California Energy Institute (UCEI), Berkeley, California, 2002.
- [16] Moura, F., 2005, “Driving energy system transformation with "vehicle-to-grid" power”, *YSSP Final Report*, IIASA, Luxembourg, 16 September, 2005, p. 62.

## NOTAS

<sup>1</sup> Este tema é abordado no artigo de Tiago Farias.

<sup>2</sup> Parques de estacionamento junto das interfaces intermodais.

# O LIVRO DA NATUREZA

Actividades em Matemática e Física

Participa e descobre

<http://www.math.ist.utl.pt/livrodanatureza>

## Organização:

Centro de Matemática e Aplicações

Centro de Física Computacional

Centro de Física Teórica de Partículas

CEMAT

CFC

CFTP

## Apoios:

**FCT** Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR Portugal

**Ciência Inovação 2010** Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

Neste trabalho descrevem-se e caracterizam-se, de forma sintética, os desafios que os sistemas eléctricos de energia enfrentam como resultado da introdução do conceito de produção distribuída, da necessidade de exploração intensiva de recursos energéticos renováveis e da introdução de conceitos de mercado na gestão técnica e comercial do sistema.

JOÃO A. PEÇAS LOPES

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e  
INESC Porto - Instituto de Engenharia de Sistemas e  
Computadores do Porto  
Rua Dr. Roberto Frias  
4200-465 Porto

jpl@fe.up.pt

# OFERTA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉCTRICOS

Os aspectos principais que caracterizam a actual situação do sector eléctrico nos países desenvolvidos são:

- a) o crescimento sustentado do consumo de electricidade (por vezes com taxas de crescimento significativas, como é o caso de Portugal);
- b) a preocupação pela segurança de abastecimento e pela qualidade do serviço;
- c) a necessidade da redução das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de electricidade;
- d) a integração de conceitos de mercado na gestão técnica e comercial do sistema eléctrico de energia.

Dada a importância económica do sector da electricidade, o desenvolvimento deste está intimamente ligado à prossecução de políticas de desenvolvimento sustentado. Este cenário tem vindo a exigir ao sistema eléctrico de energia medidas técnicas e económicas com diversos objectivos:

- Aumentar a eficiência de exploração do sistema eléctrico;
- Aumentar a integração de fontes de energia renovável (caracterizadas por uma forte intermitência);
- Monitorizar previsionalmente e em tempo real as condições de operação do sistema.

# EFICIÊNCIA M TRICOS

com uma grande produção distribuída, situada ao nível das redes de distribuição, que coexiste com grandes unidades de produção, formando um sistema activo e integrado em todos níveis de exploração. A Fig. 1 descreve comparativamente as estruturas dos sistemas eléctricos do passado e do futuro. No novo modelo, é necessário recorrer a armazenamento de energia (com diferentes escalas temporais de utilização) para compensar os desvios de produção que ocorrem devido às características de intermitência de algumas fontes de energia, como é o caso da energia eólica.

No novo modelo há uma forte componente de produção distribuída que permite aumentar a eficiência da cadeia energética, pelo facto de aproximar a produção dos consumidores, diminuindo as perdas na rede eléctrica e reduzindo a necessidade de investimentos nas infra-estruturas de rede. As soluções com viabilidade técnico-económica para a produção distribuída incluem:

- A energia solar fotovoltaica;
- A energia eólica;
- A cogeração (incluindo futuramente microturbinas e células de combustível);
- A mini-hídrica.

Tal tem conduzido ao desenvolvimento de novos paradigmas de operação, que actualmente começam a afirmar-se, e que envolvem o abandono da concepção da produção centralizada de electricidade seguida do transporte e distribuição até aos consumidores, para adoptar um modelo

Sob o ponto de vista económico, note-se que os custos de produção de electricidade variam tipicamente entre os 2 cêntimos de euro por quilowatt-hora (c€/kWh) e os 6 c€/kWh enquanto a sua venda aos consumidores varia entre os 3 c€/kWh e os 8 c€/kWh na distribuição em alta e média tensão, enquanto que na baixa tensão estes valores

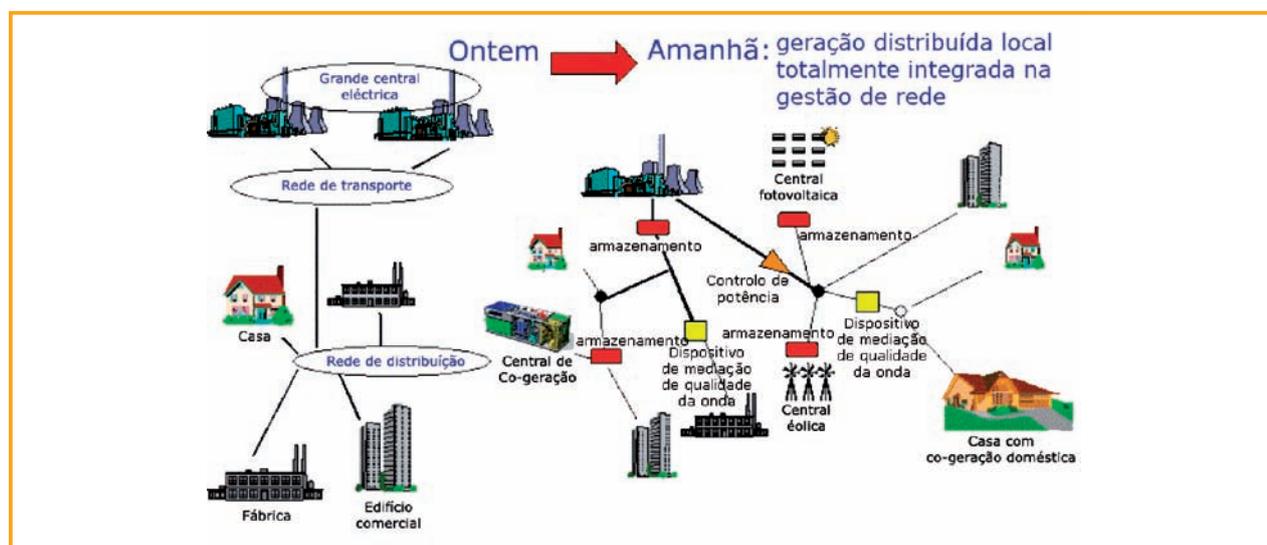


Fig. 1 - Comparação entre estruturas do sistema eléctrico de energia (em *New Era for Electricity in Europe*, European Commission Edition, 2003).

estão compreendidos entre os 9 e os 12 c€/kWh. Daqui se percebe o interesse económico em produzir electricidade junto dos consumidores (remunerando-a a valores economicamente interessantes), evitando parte dos custos com o uso das redes de transporte e distribuição.

**DESENVOLVIMENTO DE NOVOS CONCEITOS E ESTRATÉGIAS**

O desenvolvimento e a concretização destes conceitos exige um maior esforço de controlo e gestão da rede eléctrica, envolvendo a necessidade de novos conceitos técnicos como o da gestão hierarquizada do sistema, conforme se descreve a seguir.

De referir que, durante o arranque da implementação da produção distribuída, esta era (e ainda é) não despachável, injectando no sistema toda a electricidade que produzia. Tal situação não é admissível em cenários em que há grande penetração deste tipo de produção de electricidade, exigindo novos conceitos de gestão técnica e comercial para controlar este tipo de produção.

Além disso, a geração eólica não é, na maior parte dos casos, produção distribuída, por se apresentar em grandes parques eólicos, sendo recomendável a extensão destes conceitos de gestão também a este tipo de produção.

**Gestão hierarquizada da produção**

Num sistema em que o volume de produção distribuída é significativo, é necessário então criar estruturas de gestão hierarquizada da produção, como a que se descreve na Fig. 2 para o caso da gestão da energia eólica. Com efeito, pretende-se que os geradores individuais sejam agrupados em grupos, que por sua vez são agrupados em *clusters*, formando centrais virtuais que são despachadas e controladas na perspectiva da gestão global da sua produção, exigindo a instalação de uma estrutura de comunicações eficiente e fiável para monitorizar e controlar os equipamentos de produção ligados às redes (eventualmente em diferentes níveis de tensão) [1]. Dado o grau de dispersão destes equipamentos de produção seria tecnicamente muito complexo e oneroso desenvolver estruturas de gestão desta produção a partir de um único centro de controlo e despacho.

Para permitir a gestão global da produção e o equilíbrio comercial entre a oferta e a procura é necessário, neste cenário, dispor de funcionalidades de previsão da produção para as centrais que exploram fontes de energia com características de intermitência, para horizontes temporais de pelo menos 48 horas. Tal significa o desenvolvimento de metodologias que exploram os resultados da previsão meteorológica. Estas soluções estão presentemente em investigação e teste em países da Europa onde o recurso à produção eólica tem já um peso significativo.

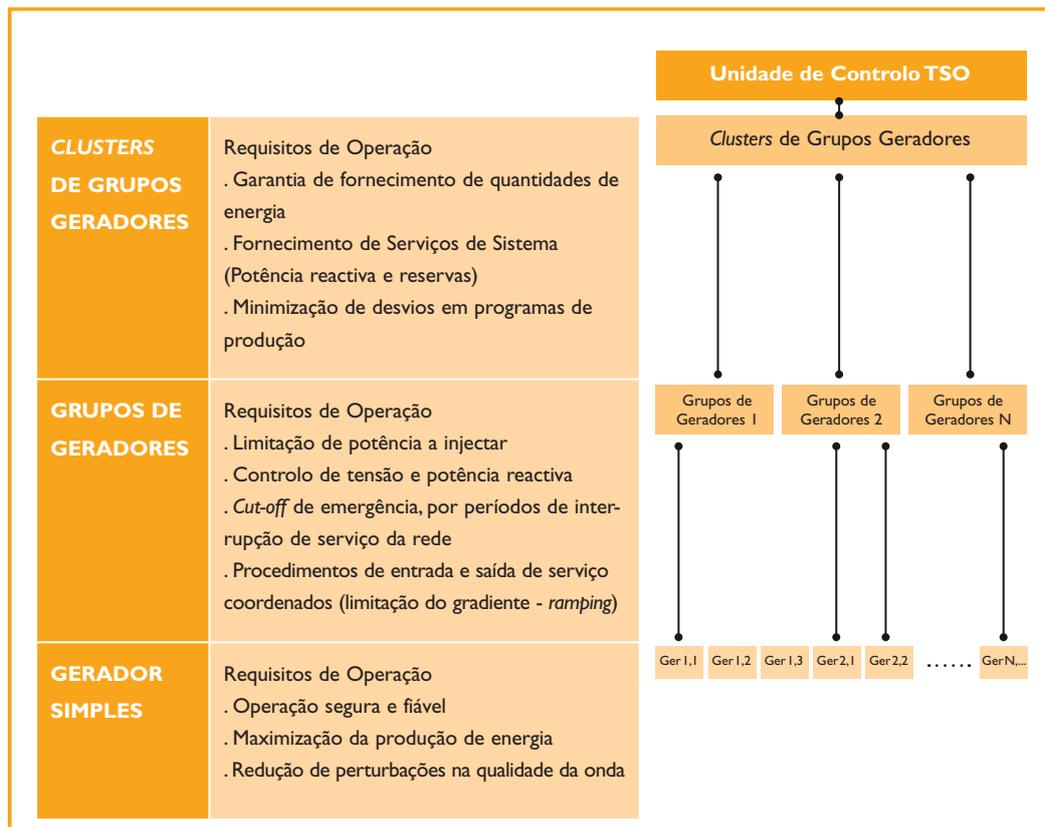


Fig. 2 - Estrutura hierarquizada de operação e gestão do sistema.

## O conceito de microrrede

A extensão da produção distribuída às redes de baixa tensão, recorrendo a microgeradores que exploram várias tecnologias e fontes de energia será uma realidade num futuro próximo, conduzindo ao desenvolvimento de um novo conceito - a microrrede, cuja arquitectura a Fig. 3 [2,3] descreve de forma esquemática.

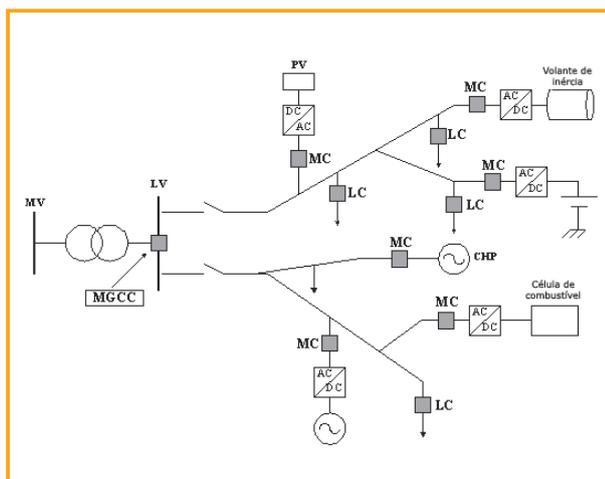


Fig. 3 - Arquitectura da microrrede.

Uma microrrede corresponde a uma rede de distribuição de baixa tensão onde são ligados sistemas de microgeração muito próximos das cargas. Uma microrrede pode ser constituída a partir de uma rede de distribuição de uma zona urbana, de uma rede de um centro comercial ou de uma unidade fabril.

Usando as tecnologias actualmente disponíveis, os sistemas de micro-geração podem incluir diversos tipos de pilhas de combustível, microturbinas a gás, sistemas eólicos e solar fotovoltaicos (PV), juntamente com dispositivos de armazenamento de energia (volantes de inércia, super-condensadores, baterias de acumuladores). Uma das tecnologias mais promissoras a utilizar nestas microrredes corresponde à utilização de sistemas que permitam a produção combinada de calor e electricidade (CHP), estando associados a caldeiras utilizadas para o aquecimento de águas sanitárias ou aquecimento ambiente, em condomínios e instalações domésticas.

Para além dos dispositivos atrás mencionados, uma microrrede inclui ainda um sistema de controlo hierárquico suportado por um sistema de comunicações a instalar para o efeito. Esse sistema de comunicação pode ser realizado recorrendo a tecnologia PLC (*Power Line Carrier*) (solução técnica economicamente interessante) ou a tecnologia de comunicações sem fios (*wireless*).

A gestão técnica e económica da microrrede é efectuada, de forma centralizada, por uma unidade designada de *MicroGrid Central Controller* (MGCC), a instalar no posto de transformação de onde deriva a microrrede, conforme mostra a Fig. 3. Para esse efeito, o MGCC pode incluir diversas funcionalidades, como sejam a previsão de cargas, o despacho económico óptimo, a avaliação de segurança dinâmica, etc. Admitindo o funcionamento em rede isolada para esta rede, o MGCC assume ainda as funções de um sistema de controlo secundário de frequência, semelhante ao de um controlo automático de geração das redes convencionais. O MGCC é ainda responsável pela gestão da estratégia de reposição de serviço (*black-start*), o que constitui uma vantagem decisiva para a microrrede, tendo em consideração o interesse na redução dos tempos de reposição de serviço aos consumidores. Num nível hierárquico inferior, cada carga (ou grupo de cargas) e unidade de microgeração dispõem de um controlador local, designado por *load controller* (LC) e de um *microgenerator controller* (MC). Com base em informação recebida a partir do MGCC, estes sistemas controlam as cargas (utilizando o conceito de interruptibilidade das cargas) e as unidades de microgeração (controlo local de potência activa e de tensão).

Esta microrrede, pelo facto de possuir capacidade de geração e de controlo da produção e controlo das cargas, admite o funcionamento em rede isolada, o que é altamente inovador atendendo a que os sistemas de microgeração são ligados à rede através de interfaces electrónicas, não apresentando inércia. Tal implica conceitos inovadores para o controlo dos inversores de interface e a utilização de elementos com capacidade de armazenamento de energia como os volantes de inércia (designados na literatura anglo saxónica por *flywheels*).

A Fig. 4 apresenta as evoluções temporais das potências eléctricas injectadas pelas microfuentes na rede e a frequência deste sistema numa situação de rede isolada, sendo patente a capacidade de o sistema, no seu conjunto, efectuar o seguimento da variação dos consumos da microrrede neste cenário de operação [3].

## A OFERTA DE NOVOS SERVIÇOS

O desenvolvimento do novo modelo do sistema de eléctrico de energia conduziu assim a um novo conjunto de serviços, que resultam em parte da nova conceptualização das operações técnicas e comerciais do sistema. Entre estes serviços estão os seguintes:

- Produção de electricidade (com diferentes níveis de concentração);
- Serviços de sistema:

- Compensação e balanço, envolvendo o recurso a reservas para diferentes horizontes temporais;
- Controlo de tensão e potência reactiva;
- Reposição de serviço (*black start*), envolvendo a possibilidade de funcionamento das redes de distribuição em rede isolada;
- Comercialização de electricidade.

Estes serviços passaram a ser geridos numa perspectiva de mercado, havendo diferentes tipos de mercados ou de contratualização consoante o serviço a utilizar e sendo os preços definidos pelo de encontro entre a oferta e a procura - o fecho do mercado.

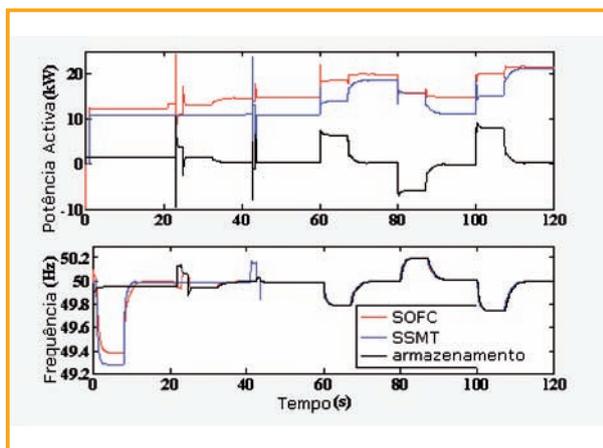


Fig. 4 - Comportamento de grandezas eléctricas das microfones e da microrrede.

## CONCLUSÕES

Descreveram-se de forma breve algumas das principais mudanças que têm vindo a ocorrer e que se irão consolidar nos próximos anos no que concerne ao funcionamento dos sistemas eléctricos de energia, numa perspectiva de oferta de novos produtos e de melhoria da eficiência global do sistema.

A concretização dos novos conceitos implica o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas para a produção de electricidade, para o controlo e a gestão do sistema eléctrico, abrindo novas oportunidades para a indústria do sector eléctrico. O desenvolvimento destas soluções requer o aprofundamento da colaboração entre a indústria e as instituições do sistema científico e tecnológico.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Peças Lopes, "Procedimentos de Operação e Arquitecturas de Gestão dos Sistemas Eléctricos para Acomodar com Segurança Níveis Elevados de Produção Eólica", *Actas do ENER'05*, Figueira da Foz, Maio 2005.
- [2] J. A. Peças Lopes *et al.*, "Management of Microgrids", *Actas do JIEEC2003*, Bilbao, Espanha, 28-29 Outubro de 2003.
- [3] J. A. Peças Lopes, Carlos Moreira e Fernanda Resende, "Microgrids Islanding Operation and Contribution for Black Start", *Actas do 16th PSCC*, Liège, Bélgica, Agosto de 2005.



# OIBF 2006



23-30 SETEMBRO 2006  COIMBRA, PORTUGAL  
**Olimpíada Ibero-americana de Física**



<http://oibf2006.fis.uc.pt/>   

NOS PRÓXIMOS NÚMEROS

à luz de  **EINSTEIN** 1905-2005

Para nós, físicos devotos, a separação entre passado, presente e futuro é apenas uma ilusão, se bem que persistente **Albert Einstein**

CICLO DE CONFERÊNCIAS: "À luz de Einstein"



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



UNIÃO EUROPEIA  
Fundo Social Europeu



GOVERNO DA REPÚBLICA PORTUGUESA