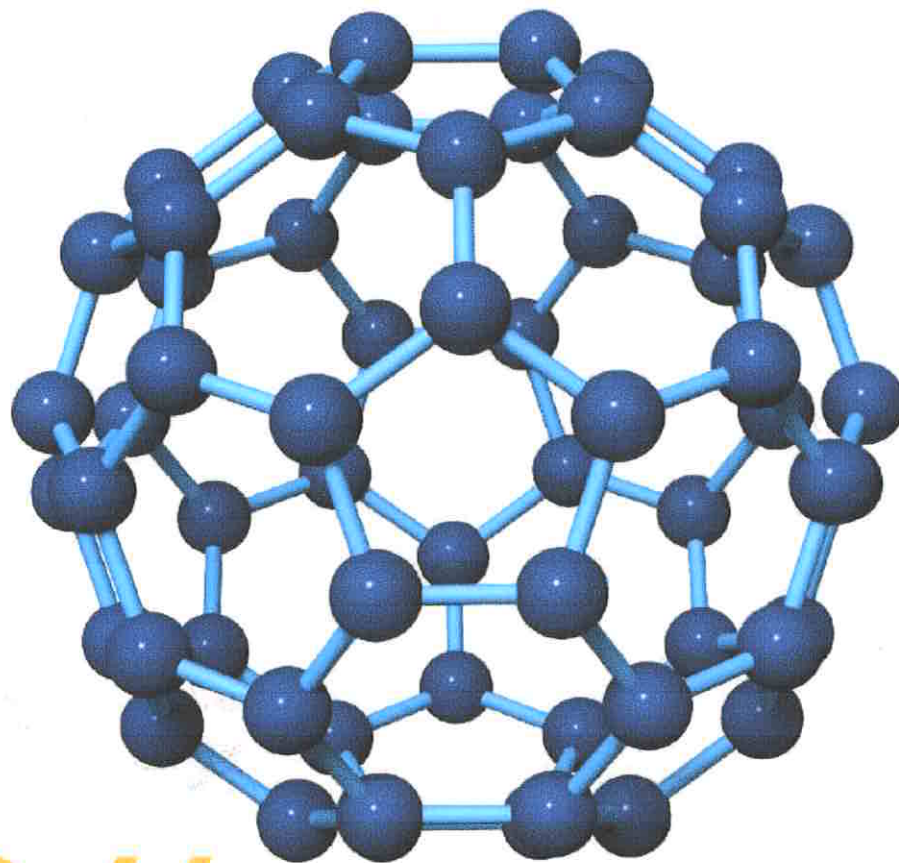




62-66

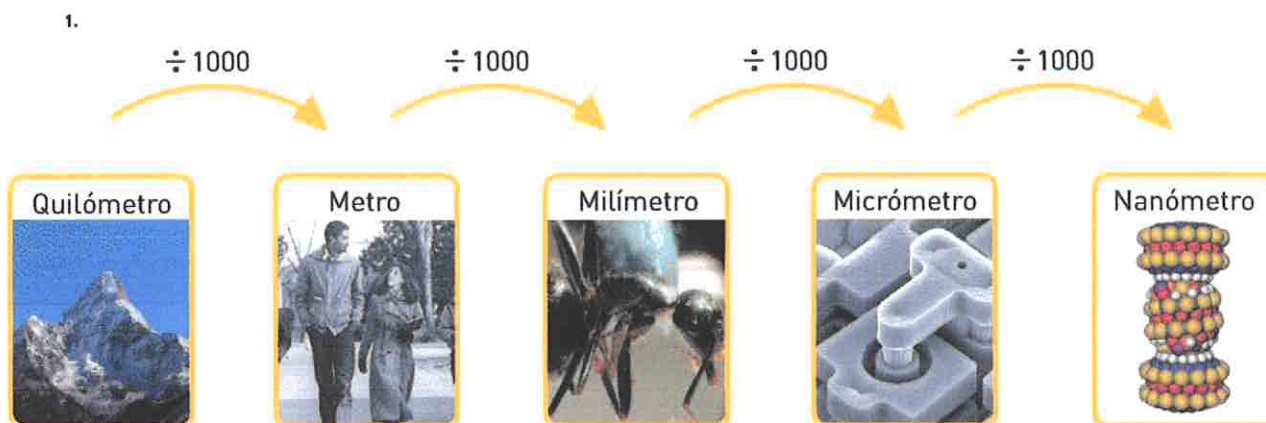
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA #01

A IDADE DOS NANOMATERIAIS

DO AVANÇO DA CIÊNCIA E DOMÍNIO DAS NANOTECNOLOGIAS EIS-NÓS CHEGADOS A UMA NOVA ERA DA HISTÓRIA DA HUMANIDADE; A DA MANIPULAÇÃO CONTROLADA DA MATÉRIA À ESCALA MOLECULAR E DAS INÚMERAS POSSIBILIDADES DE INTERAGIR, ALTERAR E, SEGUNDO ALGUNS, SUPERAR O LEGADO DE MILHÕES DE ANOS DE EVOLUÇÃO NATURAL. CAIXA DE PANDORA OU PANACEIA UNIVERSAL? MITOS, PREOCUPAÇÕES E O ESTADO ACTUAL DA ARTE.

TEXTO ANTÓNIO DE PÁDUA LOUREIRO E NUNO REIS

1. Relações de escala



Embora as opiniões não sejam unânimes quanto à definição

de nanotecnologias, o seu advento pressagia uma nova revolução tecnológica de impacto profundo na estrutura civilizacional. O termo nanotecnologia foi utilizado pela primeira vez em 1974 por Norio Taniguchi, da Universidade de Tóquio, como sendo uma tecnologia de manipulação da matéria à escala do nanómetro (1). Para contextualizar tão pequenos tamanhos, refira-se que os átomos têm décimos de nanómetro, as proteínas cerca de uma dezena, as linhas condutoras num circuito impresso de computador algumas centenas, as bactérias alguns milhares, e um simples cabelo uma espessura de cerca de uma centena de milhar de nanómetros. Isto significa que a relação de escala entre o pico Everest e uma formiga de meio centímetro é sensivelmente a mesma que entre esta última e o nanómetro (Figura 1). É justamente este imenso (1) espaço disponível em dimensões muito reduzidas que define o domínio de actuação das nanotecnologias.

Esta ideia de explorar o espaço do muito pequeno – o nanomundo – não é tão recente como possa parecer. Já em 1959, o físico Richard Feynman (Figura 2), na sua célebre palestra "There is plenty of room at the bottom", antecipou a extraordinária capacidade de miniaturização que ficaria disponível se fossem utilizados os átomos, ou pequenos agrupamentos destes, como componentes individuais na construção de dispositivos e máquinas. Segundo Feynman, tal não desafiava nenhuma lei conhecida da Física, simplesmente não havia sido realizado por "sermos demasiado grandes". Uma demonstração inequívoca deste potencial tem sido verificada na área da microelectrónica com o incremento contínuo do número de componentes por circuito impresso (Figura 3). Actualmente, os vulgares processadores Pentium IV incorporam 40 milhões de transístores e outros processadores mais recentes incorporam dez vezes mais. O desenvolvimento tecnológico dos processos de litografia utilizados na microelectrónica permite hoje a gravação de detalhes com dimensões abaixo dos 100 nanómetros, estimando-se que em 2015 possam atingir os dez nanómetros (utilizando radiação ultravioleta extrema, com comprimentos de onda da ordem dos 13 nanómetros). Existem, porém, limites físicos a partir dos quais será impossível reduzir a dimensão de transístores ou de outros dispositivos construídos com base nos actuais princípios do seu funcionamento. A chave para ultrapassar estas limitações reside na exploração de todo o potencial que nos é oferecido pelas nanotecnologias.

O que confere às nanotecnologias um tão grande potencial inovador é o facto

de a matéria a estas escalas se comportar de uma forma que nos é pouco familiar, obedecendo às leis da Mecânica Quântica (ver Breve história da Mecânica Quântica). As peculiaridades deste comportamento permitem a concepção de novos dispositivos que operam segundo princípios radicalmente diferentes dos que funcionam à escala macroscópica. Por exemplo, a coexistência de vários estados quânticos pode conduzir a novas arquitecturas de computadores com um número de combinações e operações simultâneas muitíssimo superior ao do actual sistema binário, em que os estados possíveis são apenas 1 ou 0. Também à nanoescala, a importância crescente dos efeitos da movimentação aleatória dos átomos e moléculas e das forças interatómicas e intermoleculares permite a formação de dispositivos sem intervenção externa, utilizando os princípios de auto-organização observados na Natureza. A chave desta auto-organização reside no facto de a informação necessária à especificação do dispositivo estar codificada na estrutura molecular. Por exemplo, a sequência de grupos aderentes e não aderentes numa molécula determina a forma como esta se organiza perante outras do mesmo ou de outro tipo.

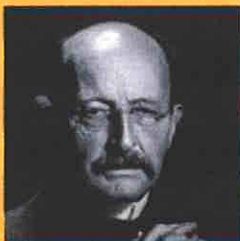
Neste contexto, é costume distinguir as nanotecnologias em dois tipos de abordagem: de baixo para cima (bottom-up), ou de cima para baixo (top-down). Os processos de auto-organização (ou autoconstrução) são normalmente referidos por abordagem bottom-up, no sentido em que a construção da estrutura resulta da reunião de pequenos componentes, em geral moléculas. Outro exemplo deste tipo de abordagem é o de posicionar sequencialmente átomos ou moléculas individuais numa superfície de acordo com um plano preestabelecido, o que se torna muitíssimo moroso. A vantagem da auto-organização molecular reside na quase espontaneidade e simultaneidade da formação de nanoestruturas, permitindo a produção célebre de maiores quantidades.

O segundo tipo, top-down, é uma extensão natural dos processos de fabrico utilizados na microelectrónica (Figura 4). Nestes casos, películas finas de diferentes materiais são sequencialmente depositadas e "esculpidas" de forma selectiva por fotolitografia ou por feixes de electrões ou de iões que permitam o registo de detalhes abaixo dos 100 nanómetros. Torna-se assim possível o fabrico de dispositivos tridimensionais de nano-arquitectura controlada (NEMS – Nano ElectroMechanical Systems).

Embora as nanotecnologias sejam muitas vezes conotadas com a Física e as engenharias (devido à importância dos fenómenos quânticos e às suas

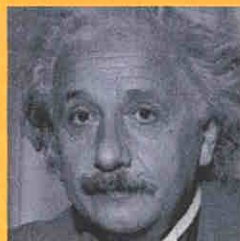
2. Richard Feynman

BREVE HISTÓRIA DA MECÂNICA QUÂNTICA

**Max Planck.**

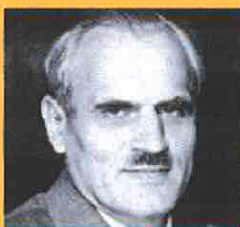
Numa comunicação à Sociedade Alemã de Física em 14 de Dezembro de 1900, Planck postulou o conceito de quantum de energia, para que os resultados dos seus cálculos sobre o espectro de radiação do "corpo negro", com base nas teorias físicas então conhecidas, concordassem com os experimentais. A energia radiada não seria contínua, mas emitida por

quanta de energia, múltiplos inteiros de $h\nu$. Neste produto, h é a "constante de Planck" ($h=6,63 \times 10^{-34}$ Joule.segundo) e ν é a frequência de uma onda electromagnética, igual à frequência de vibração do electrão da parede do "corpo negro" que emite essa onda. [Inicialmente, Planck postulou que apenas a energia de vibração dos electrões estava quantificada, e só mais tarde admitiu a quantificação das próprias ondas electromagnéticas]. Foi este o primeiro corte com a Física Clássica, e há quem considere 14-12-1900 a data de nascimento da Física Quântica, embora só por volta de 1925-1926 ela fosse completamente estabelecida com Heisenberg e Schrödinger.

**Einstein.**

Partindo dos trabalhos de Planck, em 1905, Einstein explicou o efeito fotoelétrico (utilizado nas células fotoelétricas e mais recentemente na conversão da energia solar em energia eléctrica), sendo-lhe atribuído por esse estudo o Prémio Nobel da Física em 1921. Este efeito consiste no arranque de electrões da superfície de um metal devido à

incidência nela de luz (ondas electromagnéticas). É necessário que a frequência ν das ondas seja superior a certo valor [ou, equivalentemente, que o comprimento de onda λ seja inferior a certo valor] para que o efeito apareça. Mesmo que a intensidade da luz seja alta, não se observará o efeito se ν for inferior a esse valor. Einstein considerou que a luz (radiação electromagnética) é sempre constituída por quanta de luz (pacotes de energia $E=h\nu$, anos mais tarde designados por fótons), deslocando-se à velocidade da luz desde a fonte emissora até ao alvo e completamente absorvidos pelos electrões do alvo, arrancando-os dele.

**Compton.**

Em 1923, fez experiências com raios X "monocromáticos", isto é, com uma só frequência ν , fazendo incidir o feixe num alvo de grafite que causava a sua dispersão. Analisando os raios dispersos nas várias direcções, verificou que havia neles não só raios com a frequência dos raios incidentes mas também outros com frequência

2.



aplicações na área da microelectrónica], o paradigma da abordagem bottom-up é-nos revelado pela Biologia. Por exemplo, os dispositivos que controlam as funções das células – como a síntese de novas proteínas pelos ribossomas de acordo com a codificação do ADN, a utilização e conversão de energia luminosa em energia química pelas cloroplastas, ou os motores moleculares que movem os diferentes componentes no interior das células, bem como as combinações destes que permitem o movimento não apenas das células individuais mas também dos organismos multicelulares – operam igualmente à nanoescala. Estas "máquinas" moleculares constituem uma prova irrefutável da possibilidade de construir dispositivos a esta escala, e a compreensão do seu processo evolutivo e dos mecanismos pelos quais operam será certamente uma fonte de inspiração para o projecto de novos nanodispositivos sintéticos e híbridos. As possibilidades e oportunidades associadas a esta ideia de "bionanotecnologias" são exploradas de uma forma original por Eric Drexler [Figura 5], no seu livro de 1986, *Engines of Creation*. A visão de Drexler inclui a criação pelo homem de dispositivos – por exemplo nanorobots – capazes de superar as capacidades dos organismos vivos realizando um número muito maior de funções a partir das mesmas matérias-primas e fontes energéticas, ou seja, dispositivos "superiores" à vida na perspectiva tradicional de evolução. Isto colocar-nos-ia perante um eventual cenário apocalíptico, caso estes dispositivos se multiplicassem de forma descontrolada, interferindo irreversivelmente com o ecossistema. Sobre este cenário, um estudo recente sobre oportunidades e incertezas das nanotecnologias elaborado pela secular Royal Society em conjunto com a, também britânica, Royal Academy of Engineering, conclui não existir "evidência a sugerir de que sejam desenvolvidas, num futuro previsível, nanomáquinas que se autocopiem, multiplicando-se descontroladamente" [2].

Como abaixo se ilustra, as áreas de aplicação das nanotecnologias e dos nanomateriais são bastante diversificadas. Existem no entanto duas, onde estas assumem um papel determinante e que, em certa medida, têm sido

a força motriz para o seu desenvolvimento nestes últimos anos:

- A electrónica, optoelectrónica e tecnologias de informação e comunicação;
- A biotecnologia e medicina.

Na primeira, ao nível da miniaturização contínua dos circuitos impressos (processadores e memórias), da conversão dos sinais ópticos utilizados na transmissão de dados (nas fibras ópticas) em sinais eléctricos, na introdução de computadores que funcionem por estímulos ópticos em lugar de eléctricos, sensores e actuadores mais eficientes, e na computação quântica. Na segunda, no diagnóstico rápido e efectivo de doenças através de chips de ADN, em melhorados procedimentos de imagiologia médica, na libertação controlada de fármacos e descoberta de novas substâncias activas para combater doenças nomeadamente do foro oncológico, e na produção de implantes e próteses biónicas, de interface entre a electrónica e os tecidos biológicos, por exemplo, com o sistema nervoso.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DOS NANOMATERIAIS

Sempre existiram nanomateriais pela simples razão de que aparecem na Natureza como resultado de processos naturais. Os Egípcios já os utilizavam como corantes, e o mesmo aconteceu na Idade Média com os vitrais de igrejas góticas. A orientação da andorinha é determinada pela variação do campo magnético terrestre, através de um nanomaterial de forma alongada existente no seu crânio. Foi, no entanto, necessário que a ciência e a

tecnologia atingissem o desenvolvimento dos últimos anos para que, com a possibilidade de manipulação controlada da matéria à nanoescala, fosse possível sintetizar nanomateriais, e assim explorar um novo mundo de possibilidades para a Humanidade.

A Nanociência surge assim como um termo englobante dos conhecimentos oriundos da Física, da Química, da Ciência dos Materiais e da Biologia, necessários à caracterização e manipulação da matéria à nanoescala. A Nanotecnologia aplica os conhecimentos da Nanociência ao projecto, caracterização, produção e aplicação dos Nanomateriais, isto é, dos materiais em que pelo menos uma das suas três dimensões é da ordem do nanómetro [3]. As nanopartículas possuem as suas três dimensões à nanoescala, os nanofios e nanotubos possuem duas, e os nanofilmes ou nanopelículas apenas uma dimensão (a espessura) à nanoescala. Tal como à macroescala, também neste caso a relação entre Ciência e Tecnologia nem sempre é linear, ou seja, nem sempre os desenvolvimentos científicos precedem a aplicação tecnológica. Em verdade, os desenvolvimentos tecnológicos têm tido um papel fundamental no avanço da ciência e, curiosamente, as primeiras aplicações das nanotecnologias encontraram como principal mercado as nanociências. Este facto é bem ilustrado pela quase indispensabilidade de equipamentos como os microscópios de força atómica e do efeito de túnel na investigação em nanociências. Nestas técnicas, imagens do nanomundo são geradas electronicamente medindo as variações resultantes da interacção entre os

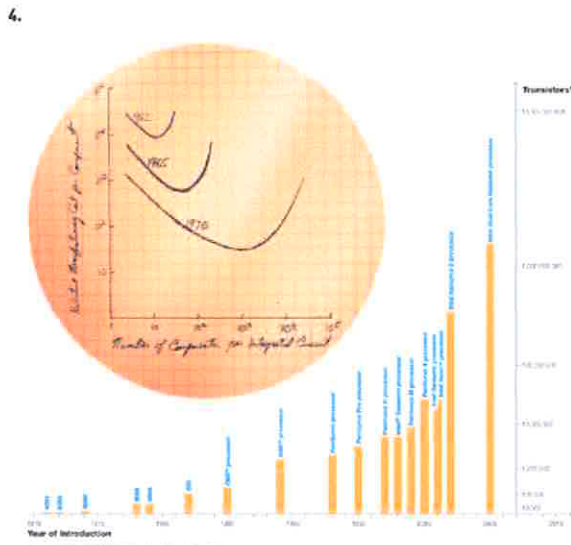
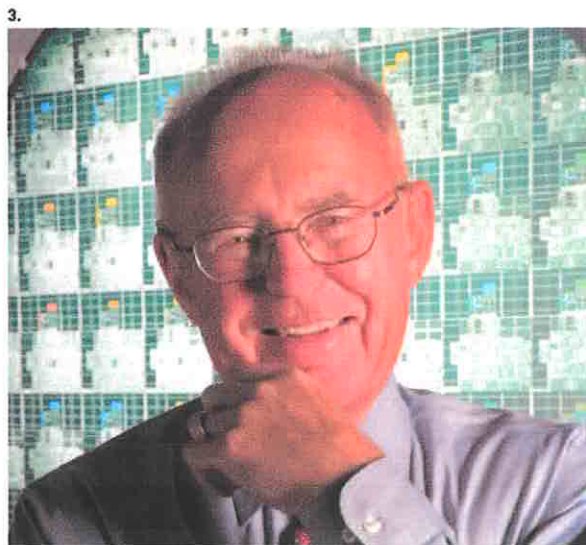
PUB

3. Em 1965, Gordon Moore, um dos fundadores da gigante de microprocessadores INTEL, postulou que o número de transistores em circuitos impressos aumentaria exponencialmente, fruto do desenvolvimento

das tecnologias de fotogração no registo de detalhes topográficos de dimensões progressivamente menores. Facto que tem vindo a verificar-se nos últimos 40 anos com o número de transistores por circuito impresso a

duplicar todos os 18 a 24 meses.

4. ererererer



átomos ou moléculas presentes à superfície de uma amostra, e uma ponta muito fina que varre essa mesma superfície. Estes microscópios permitem não só visualizar mas também manipular a matéria à nanoescala. Talvez o exemplo mais conhecido deste facto seja o logótipo da gigante norte-americana IBM, escrito átomo a átomo [Figura 6], em 1989, por Don Eigler [4]. Em 1985, uma equipa da Universidade de Rice, Texas, utilizando um laser de alta potência com a intenção de criar, a partir da vaporização da grafite, moléculas de carbono pouco comuns que se admitia existirem no espaço interestelar, descobriu uma molécula esférica com cerca de um nanómetro de diâmetro que sugere a forma de uma bola de futebol [Figura 7.a)]. A utilização deste tipo de configuração molecular está a ser investigada para a lubrificação de superfícies uma vez que podem actuar como nanorolamentos. Posteriormente, em 1991, um investigador japonês [Sumio Iijima] sintetizou nanotubos em carbono [Figura 7.c)] de diâmetros também nanométricos, mas com comprimentos entre mil a dez milhões de vezes maiores que o seu diâmetro. Estes nanotubos apresentam propriedades surpreendentes, como a de possuírem um módulo de elasticidade cerca de dez vezes superior ao dos aços, e poderem comportar-se como condutores ou semicondutores dependendo da forma como os átomos de carbono se encontram estruturados nas paredes dos tubos. As já conhecidas vantagens das tradicionais fibras de carbono inseridas em materiais compósitos para melhorar o comportamento mecânico poderão vir a ser substancialmente aumentadas utilizando estes nanotubos. Uma aplicação em exploração por outra gigante da electrónica, a NEC Japonesa, consiste na utilização de nanotubos individuais como emissores de electrões para geração de imagem em ecrãs planos. A sua utilização em larga escala depende todavia da resolução de alguns problemas como o alinhamento individual dos tubos de forma controlada e, em materiais compósitos, o aumento da sua aderência à matriz em que estão embebidos, aderência que é baixa devido à sua fraca reactividade.

A utilização de nanopartículas é já prática corrente nalgumas aplicações. O segredo das superfícies "sempre limpas" reside na inclusão de

nanopartículas de dióxido de titânio altamente activado que as torna repelentes da água [hidrofóbicas] e antibacterianas. Em protectores solares são utilizadas nanopartículas de dióxido de titânio e óxido de zinco, pois absorvem e reflectem os raios ultravioletas mas são transparentes ao visível, e portanto incolores, logo com vantagens estéticas na sua aplicação. Nanopartículas de prata são também utilizadas em ligaduras para queimaduras, devido à sua acção antimicrobiana. Nanopartículas de materiais semicondutores designados por pontos quânticos [quantum dots], e que exibem propriedades ópticas dependentes do seu tamanho devido aos efeitos quânticos [ver caixa], são utilizadas em células solares e como "rótulos" fluorescentes para a identificação de moléculas biológicas específicas.

A utilização futura de nanopartículas como pigmentos de tintas permitirá que estas sejam mais leves, reduzam as perdas térmicas, alterem a cor em função da temperatura ou do ambiente químico, e ainda reduzir o teor de solventes utilizados com as inerentes vantagens ecológicas.

Algumas das técnicas e equipamentos necessários à prossecução das nanotecnologias servem também à concepção e caracterização de materiais nanoestruturados, isto é, materiais macroscópicos internamente estruturados (ou organizados) à nanoescala. Estes tiram proveito dos efeitos acima descritos e do aumento significativo da importância das superfícies e interfaces relativamente ao seu volume, para exibirem propriedades invulgares e/ou proporcionarem melhorias significativas no seu desempenho. Por exemplo, os materiais cerâmicos cristalinos são tradicionalmente duros e frágeis, fruto das ligações interatómicas e arranjos cristalográficos dos cristais [vulgo grãos] que os constituem. A possibilidade de fabricar cerâmicos com tamanhos de grão nanométricos confere-lhes um carácter ductil, permitindo a sua maquinabilidade. A zircónia [óxido de zircónio] nanocristalina associa esta capacidade de enformação à biocompatibilidade, sendo por isso uma alternativa vantajosa para o fabrico de implantes ortopédicos de maior duração que os existentes. A incorporação de materiais nanocristalinos em baterias portáteis [por exemplo, de telemóveis e

5. a) Molécula C₆₀, formada por 60 átomos de carbono interligados em 20 hexágonos e 12 pentágonos e com 0,7 nanómetros de diâmetro. Esta molécula foi inicialmente designada por "Buckminsterfullerene" em

homenagem ao arquitecto Buckminster Fuller, conhecido construtor de cúpulas geodésicas. b) Passaram mais tarde a designar-se por Fullerenos esta e outras moléculas de carbono em forma de gaiola,

entretanto descobertas. As suas potenciais aplicações incluem lubrificantes, transportadores de medicamentos dentro do corpo e circuitos electrónicos. c) Nanotubos de carbono que consistem em folhas de

grafite enroladas numa forma tubular.

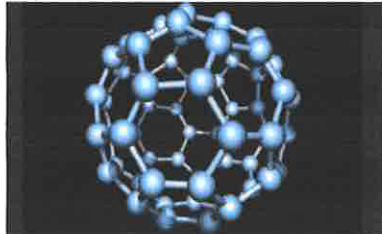
5. b)



5. c)



5. a)



computadores] aumentará a capacidade de armazenagem de energia e diminuirá a frequência de recarga, devido ao aumento significativo da superfície reactiva. Também os materiais magnéticos, de uso corrente em imagiologia médica, em motores e microssores, aumentarão a coercividade, não desmagnetizando tão facilmente se forem produzidos com grãos nanocristalinos. As membranas catalíticas de elevada superfície reactiva podem vir a aumentar a sua eficiência e diminuir o seu tamanho recorrendo ao controlo efectivo da porosidade à nanoescala. Um exemplo de aplicação são as pilhas (ou células) de combustível, nas quais o hidrogénio é utilizado na produção directa e "limpa" de electricidade. O hidrogénio pode ser obtido a partir de hidrocarbonetos por processos catalíticos em pequenos módulos directamente associados às células.

O controlo da porosidade e rugosidade à nanoescala é também determinante no desempenho dos têxteis à prova de água, antinódos, ou que permitem uma melhor respiração do corpo (entrada e saída de vapor de água).

Inclusivamente, já se pensa em projectar uniformes militares com nanoporos activos que se fecham quando expostos a determinados agentes biológicos e químicos considerados perigosos.

O potencial económico de todos estes exemplos, quer dos nanomateriais quer dos materiais nanoestruturados, justifica claramente o seu desenvolvimento tecnológico. Existem, no entanto, receios fundados de que as nanopartículas e nanotubos sintéticos possam vir a colocar sérios riscos para o Ambiente e para a Saúde Pública. Este novo tipo de poluição – o nanolixo – encontra alguns paralelos em preocupações bem conhecidas da sociedade, como a das fibras de amianto ou dos produtos de combustão. De um modo geral, as nanopartículas e os nanotubos deverão ser manipulados com a prudência necessária sempre que possam vir a entrar no "ciclo da vida". Isto exige uma regulamentação rigorosa. Apesar dos receios e das necessárias cautelas, organizações pró-ambientais, como a Greenpeace e a Environmental Defence, reconhecem vantagens na utilização das nanotecnologias, como, por exemplo, na redução dos custos das células solares, tornando mais atractiva a sua exploração comercial. Estão também

mais baixa, e, portanto, com menor energia. Ora, na teoria electromagnética clássica, as ondas electromagnéticas incidentes provocam a oscilação dos electrões com a mesma frequência n dessas ondas, não deveriam assim aparecer ondas com n mais baixo. Compton interpretou com êxito os resultados admitindo que o feixe incidente era constituído por quanta (fótons) de energia $E=h\nu$ e "quantidade de movimento" ou momento $p=E/c$, que ao chocarem com os electrões (tal como no choque de bolas de bilhar) se desviavam, diminuindo a sua energia e portanto a frequência. Estava assim confirmado que os fótons se comportam como corpúsculos.



Niels Bohr.

Em 1913, Bohr já tinha interpretado os espectros discretos da luz emitida pelos átomos dos diversos elementos químicos, com base na hipótese de os electrões orbitarem por atracção electrostática em volta dos núcleos atómicos, em órbitas circulares de momento angular múltiplo inteiro de $h/2\pi$. Era a "Velha Teoria Quântica", que explicava razoavelmente os espectros

observados em ensaios de espectrografia, muito utilizados em análise química, e que já era um misto de Física Clássica e Teoria dos Quanta.



Louis de Broglie.

Em 1924, apresentou a hipótese de a natureza dual das ondas electromagnéticas também ser partilhada pelas "partículas materiais" (electrões, etc.). Essa hipótese veio a ser verificada experimentalmente pouco depois por difracção de feixes de electrões incidindo sobre cristais, fenómeno que só é explicável pela sua natureza simultaneamente

corpúscular e ondulatória (e que é o princípio do funcionamento dos microscópios electrónicos, em que o feixe de electrões tem associado um comprimento de onda $\lambda=h/mv$ sendo m a massa do electrão e v a sua velocidade). Experiências posteriores mostraram que tal comportamento dual é, de facto, geral para todo o Universo material (átomos, moléculas, etc.).



Schrödinger.

Foi em 1926 que propôs, finalmente, a sua famosa "equação de onda" (equação diferencial), guiado heurísticamente pela matemática das ondas electromagnéticas e das relações propostas por de Broglie, cujos resultados da sua integração concordam excelentemente com a experiência em todos os estudos que desde então têm vindo a ser

efectuados com electrões, átomos, moléculas. Fundou assim a Mecânica Ondulatória, base matemática da Física Quântica, mostrando também que ela é equivalente à "Mecânica Matricial" ou

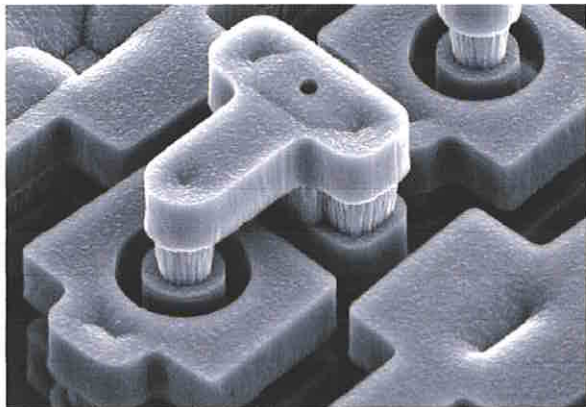
6. Exemplo de um sistema microelectromecânico (MEMS - Micro ElectroMechanical System). Uma aplicação de sucesso destes dispositivos foi a sua introdução

em grande escala, desde a década de 1990, nos sistemas disparadores de airbags, o que permitiu integrar a electrónica com as funções de detecção e actuação num chip único, de maior sensibilidade, mais rápida resposta, e a

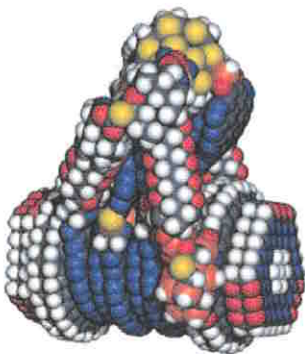
custos inferiores às tecnologias convencionais.

7. Eric Drexler
8. Logótipo da IBM, escrito átomo a átomo por Don Eigler

6.



7.



em curso estudos-piloto para tirar proveito da alta reactividade superficial das nanopartículas de ferro, com a finalidade de transformar hidrocarbonetos clorados potencialmente cancerígenos, existentes nas águas subterrâneas, em produtos finais menos perigosos. Outra possibilidade de impacto ambiental positivo consiste na utilização de nanopartículas para transformar metais pesados, como o chumbo e o mercúrio, em formas insolúveis, que não sejam biologicamente assimiláveis.

Crê-se que é fundamental desenvolver em Portugal o conhecimento destes novos assuntos, introduzindo os temas nos planos de curso de Engenharia, criando um diálogo público, não só para o seu aproveitamento económico, mas principalmente e, desde já, para analisar as suas implicações sociais, ambientais e éticas. A Academia de Engenharia tenciona actuar como um possível ponto de encontro para uma abordagem destes temas..

António de Pádua Loureiro é professor catedrático aposentado do Instituto Superior Técnico. Nuno Reis é professor auxiliar convidado da Universidade da Beira Interior e investigador do Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies.

Notas

- [1] Deriva do prefixo nano utilizado para designar um milésimo de milionésimo [10⁻⁹] de uma dada quantidade, neste caso, do metro.
- [2] Segundo Drexler.
- [3] Na prática, inferior a 100 nanómetros, embora este limite seja um pouco arbitrário.
- [4] Tal como Feynman havia antecipado 30 anos antes.

"Mecânica das Matrizes", estabelecida por Heisenberg no ano anterior, com o mesmo objectivo, mas mais trabalhosa. A integração da equação em cada caso particular conduz à "função de onda", tradicionalmente designada por Ψ , que se admite descrever completamente o comportamento do sistema em estudo. Tem uma parte "real" e uma parte "imaginária" no sentido matemático dos números complexos. Era, no entanto, a princípio, considerada um simples instrumento matemático para o cálculo dos "valores próprios" das grandezas físicas de um sistema quântico e nada mais. Todavia, ainda em 1926, Max Born propôs que Ψ fosse considerada como uma "amplitude de probabilidade", o que veio a tornar fisicamente transparente a equação de Schrödinger. Essa "amplitude de probabilidade", Ψ , é tal que o produto de Ψ pelo seu "complexo conjugado" Ψ^* [produto desse que é um número "real", sempre positivo ou zero] é igual à probabilidade de, numa observação experimental efectuada no sistema em estudo, este ser encontrado no estado descrito por Ψ . Esta interpretação funciona sempre, efectivamente!

A aplicação da equação de onda de Schrödinger ao caso mais simples de um electrão livre a mover-se numa região limitada de comprimento L conduz a que a sua energia cinética fique confinada a certos níveis de energia, "valores próprios" da função de onda, dados por $E = n^2 h^2 / 8mL^2$, com $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ (números quânticos). Vê-se portanto que os níveis de energia dos electrões dependem do comprimento L . Isto dá origem, por exemplo, a que a frequência (e portanto a cor) da luz reemitida por um nanomaterial que esteja a ser irradiado, e que está relacionada com os "saltos" de energia dos electrões, dependa do seu tamanho físico [***Ver Figura - Revue du Palais de la Découverte, p. 30***]. É possível, portanto, controlar "por medida" as propriedades ópticas e opto-electrónicas de dispositivos, controlando as dimensões físicas dos mesmos.

Um outro efeito previsto pela mecânica quântica e de fundamental importância no desenvolvimento das nanotecnologias é o chamado "efeito de túnel", que consiste no seguinte: se um electrão no seu movimento encontrar uma barreira de potencial maior que a sua energia cinética, a teoria mostra que há uma probabilidade maior que zero de o electrão ser detectado do outro lado dessa "barreira". Este efeito tem aplicação corrente em electrónica e é actualmente utilizado nos microscópios de "efeito de túnel", cuja invenção valeu a Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, do Laboratório de Investigação da IBM - Zurique, o prémio Nobel da Física em 1986 [conjuntamente com Ernst Ruska da Max-Planck-Gesellschaft - Berlim, "Pai" do microscópio electrónico].

8.

