

Nanotecnologia, nanociência e nanomateriais:
quando a distância entre presente e futuro não
é apenas questão de tempo

Oswaldo Luiz Alves

NANOTECNOLOGIA: PEQUENA CRONOLOGIA

O ser humano manifestou sempre vivo interesse pelas grandes descobertas científicas. Não poderia ser diferente, uma vez que muitos dos desenvolvimentos científicos acabaram por ter um grande impacto sobre as populações. A cada dia somos surpreendidos por um número admirável de novos acontecimentos que, não obstante o progresso gigantesco dos meios de comunicação, não há a menor possibilidade de acompanharmos a evolução das novas concepções e idéias, dada a profusão com que ocorrem e são veiculadas. Assim, uma visão histórica dos acontecimentos, identificação dos atores, avaliação das interconexões são tarefas das mais difíceis.

Neste cenário, falta-nos o distanciamento temporal, necessário e suficiente, que possibilita uma análise dos acontecimentos em maior profundidade. Muitas vezes, num primeiro momento, o que nos resta é descrevê-los e repertoriá-los para não “perdermos o passo”. Parece-nos ser bem esse o quadro em que se inserem as chamadas *novas tecnologias* e, dentre elas, a nanociência e a nanotecnologia.

Mesmo assim, vemo-nos frente ao desafio e confrontados com a necessidade de trabalharmos um grande número de dados e informações que, embora minimamente, venha permitir que chegue às pessoas uma compreensão sobre os paradigmas mais explícitos desta área do conhecimento, suas tendências, desafios e, certamente, seus impactos.

Poderíamos começar com uma pergunta: a nanotecnologia é um conhecimento totalmente novo, ou se trata de idéias que se constroem há muito tempo?

Uma resposta a essa questão aponta para o caráter sedimentar do conhecimento científico, para seu caráter cumulativo, já observado em várias outras situações. Certamente a nanotecnologia – embora não com este nome –, existia muito antes de fazer parte do atual e enorme espaço mediático. Há pelo menos 30 anos, vários grupos no mundo desenvolviam pesquisas na direção da miniaturização, sobretudo de sistemas eletrônicos, nanopartículas, sistemas nanoparticulados, etc. É importante mencionarmos que a eletrônica trazia já em seu arcabouço conceitual idéias para o tratamento do “muito pequeno”. Provavelmente o filme Viagem Fantástica (*Fantastic Voyage*), de 1966, baseado no livro de Isaac Asimov, tenha sido um dos primeiros a “revelar” tais idéias ao grande público.

Voltando à questão da eletrônica e, mais precisamente, da microeletrônica, não é difícil constatar que a mesma permitiu não só a construção do transistor, mas também de tudo o que se seguiu a ele: microprocessadores, chips e sistemas de controle, todos com base no disciplinamento do movimento dos elétrons no silício, hoje, a base dos equipamentos que processam informações. Atualmente, graças a esta tecnologia podem ser construídas estruturas com dimensões menores que 100 nanômetros (1 nanômetro = 10^{-9} metros). Não obstante tal miniaturização, trata-se de dimensões ainda muito grandes, quando se considera a escala dos átomos e moléculas. Richard Feynman, em 1959, chamava a atenção para o fato de que, na dimensão atômica, trabalha-se com leis diferentes e, assim, devem ser esperados eventos diferentes: novos tipos de efeitos e novas possibilidades.

Em 1974, Norio Taniguchi cunhou o termo “nanotecnologia”, que abarcava em seu significado máquinas que tivessem níveis de tolerância inferiores a um micron (1000 nm). Acontecimentos importantes, a nosso ver, permitiram a percepção da relevância da nanotecnologia: o trabalho de Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, criadores do microscópio eletrônico de tunelamento (*scanningtunnelingmicroscope*), aparelho que permitiu o imageamento de átomos individuais, em 1981; a descoberta dos fulerenos, por Robert Curl,

Harold Kroto e Richard Smalley, em 1985; a publicação do livro de Eric Drexler, *Engines of Creation*, que popularizou efetivamente a nanotecnologia. Seguiram-se a estes, o feito de Donald Eigler ao lograr escrever o nome IBM, em 1989, com átomos individuais do elemento xenônio e a descoberta dos nanotubos de carbono, feita por Sumio Iijima, no Japão, em 1991. Tais descobertas, aliadas às perspectivas que admitiam a nanotecnologia como “uma nova revolução científica”, foram os ingredientes que levaram a administração de Clinton, então presidente dos Estados Unidos, a lançar, em 2000, no California Institute of Technology, a *National Nanotechnology Initiative*, que proporcionou um volume de investimentos da ordem de US\$ 495 milhões, dando também uma visibilidade extraordinária a este campo de pesquisa fartamente explorado pela mídia. Na Tabela 1, resumimos aquilo que poderíamos chamar de uma pequena cronologia da nanotecnologia.

Tabela 1. Pequena cronologia da nanotecnologia

1959	Conferência de Richard Feynman, na Reunião da Sociedade Americana de Física.
1966	Viagem Fantástica (<i>Fantastic Voyage</i>), filme baseado no livro de Isaac Asimov.
1974	Norio Taniguchi cunha o termo nanotecnologia.
1981	Trabalho de Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, criadores do microscópio eletrônico de tunelamento (<i>scanning tunneling microscope</i>).
1985	Descoberta dos fulerenos, por Robert Curl, Harold Kroto e Richard Smalley.
1986	Publicação do livro de Eric Drexler, “ <i>Engines of Creation</i> ”.
1989	Donald Eigler escreve o nome IBM com átomos de xenônio individuais.
1989	Descoberta dos nanotubos de carbono, por Sumio Iijima, no Japão.
2000	Administração Clinton lança no California Institute of Technology, a <i>National Nanotechnology Initiative</i>
2001	Cees Dekker, biofísico holandês, demonstrou que os nanotubos poderiam ser usados como transistores ou outros dispositivos eletrônicos.
2001	Equipe da IBM (EUA) constrói rede de transistores usando nanotubos, mostrando mais tarde o primeiro circuito lógico à base de nanotubos.
2002	Chad Mirkin, químico da Northwestern University (EUA), desenvolve plataforma, baseada em nanopartículas, para detecção de doenças contagiosas.

A firme disposição dos Estados Unidos de investir na área acabou por “catalisar” uma reação dos países da Comunidade Européia e do Japão, inicialmente, e, mais tarde, de outros países, levando à montagem de vários outros programas nacionais ambiciosos, baseados na aceitação de que a nanotecnologia seria da maior importância para as nações industrializadas, ou “em vias de”, dentro de um horizonte futuro próximo.

Atualmente, do ponto de vista da pesquisa e desenvolvimento (P&D), o mundo global tem investimentos reportados pelas agências governamentais da ordem de cinco vezes mais, se consideramos 1997 e 2002. No mínimo 30 países iniciaram atividades nacionais neste campo. Por outro lado, a indústria fica cada vez mais confiante com as possibilidades diferenciais desta tecnologia. Apenas para situar um pouco melhor, estima-se que em 10-15 anos a produção anual no setor de nanotecnologia deverá superar a casa de um trilhão de dólares, necessitando de cerca de 2 milhões de empregados (1).

Os investimentos em P&D, apresentados na Tabela 2, permitem que se tenha uma idéia de valores, considerando-se também os atores principais.

Tabela 2. Investimentos governamentais de P&D em nanotecnologia, 2000-2003. (Em milhões de dólares/ano.) (2)

Região	2000	2001	2002	2003
Europa	200	~ 225	~ 400	~ 600
Japão	245	~ 465	~ 700	~ 810
Estados Unidos	270	422	697	774
Outros	110	~ 380	~ 550	~ 800
Total	825	1 492	2 347	2 984
% de 1997	191%	346%	502%	690%

Como pode ser observado, o Japão é o país que mais investe em P&D em nanotecnologia, tendência que deve também se verificar no ano fiscal de 2004.

Alguns autores têm sublinhado que se, por um lado, o crescimento da nanotecnologia se dá num ambiente onde as interações internacionais aceleram a ciência, a formação e as atividades de P&D, por outro, a competitividade industrial se dá em níveis nacionais e de consórcios industriais (2).

A QUESTÃO DO TAMANHO E A DEFINIÇÃO DE NANOTECNOLOGIA E NANOCIÊNCIA

Na seção anterior, quando falamos do tamanho dos circuitos eletrônicos, mencionamos o fato de que a escala dos átomos e moléculas era ainda muito menor. Qual, realmente, o significado disso? O nanômetro (abreviado nm) é a bilionésima parte do metro, ou seja: 10^{-9} do metro, ou seja: o número $1/1.000.000.000$, ou, ainda: $0,000\ 000\ 001$ m, ou ainda que o nanômetro é nove ordens de grandeza menor que o metro.

Para se ter uma idéia destas grandezas, ou melhor – o senso da nanoescala –, vejamos alguns exemplos (3):

- um fio de cabelo humano tem cerca de 50.000 nanômetros;
- a célula de uma bactéria tem cerca de algumas centenas de nanômetros;
- os chips comercializados em 2004 têm padrões menores que 100 nanômetros;
- as menores coisas observáveis a olho nu têm cerca de 10.000 nm;
- 10 átomos de hidrogênio, alinhados, perfazem 1 nanômetro.

Partindo destas definições e das percepções comparativas das grandezas, podemos definir nanociência como sendo “a área do conhecimento que estuda os princípios fundamentais de moléculas e estruturas, nas quais pelo menos uma das dimensões está compreendida entre cerca de 1 e 100 nanômetros”. Estas estruturas são conhecidas como nanoestruturas. Por vez, nanotecnologia “seria a aplicação destas nanoestruturas em dispositivos nanoescalares utilizáveis”. Para Ratner, é importante ter-se em mente que “nanoescala não implica apenas uma questão de ser pequeno, trata-se, sim, de um tipo especial de pequeno” (4). Tal consideração é importante na medida em que nos leva ao entendimento de que existem propriedades fundamentais, químicas e físicas, dos materiais, que dependem do tamanho, ou, numa linguagem mais livre, que mantêm uma “cumplicidade” com ele, cumplicidade essa que se constitui na chave de toda a nanociência.

Um exemplo emblemático que ilustra sobremodo tal situação é o do vidro denominado *ruby gold glass* (5).

Pequenas partículas metálicas, dispersas no vidro, absorvem a luz e, desta maneira, podem apresentar cores vivas. Tal vidro é conhecido desde o século XVII (o que mostra que a nanotecnologia não é tão jovem!), sendo que o efeito ocasionado pela presença de partículas finamente divididas, em 1857, já fora reconhecido por Faraday (6). O tamanho das partículas de ouro (que, agora sabemos, são nanopartículas) influencia a absorção da luz. Partículas maiores que 20 nm de diâmetro deslocam a banda de absorção para comprimentos de onda maiores que 530 nm, ao passo que partículas menores geram um efeito contrário, ou seja: deslocam a absorção para menores comprimentos de onda. Assim, graças ao tamanho, é possível ter partículas com diferentes cores (laranja, púrpura, vermelho ou verdes), desde que seja capaz de controlar a distribuição do seu tamanho. A cor característica do vidro *ruby* é a vermelha, que corresponde a uma absorção de comprimento de onda por volta de 530 nm, logo com partículas da ordem de 20 nm. Neste exemplo fica evidente a questão das propriedades dependentes de tamanho, as quais, já assumindo o jargão da nanotecnologia, denominamos nanopartículas, pontos quânticos (*quantum dots*) ou nanopontos (*nanodots*) e o efeito, chamamos de efeito quântico de tamanho (*quantum size effect*). Na Figura 1, é apresentada a famosa peça romana, Taça de Licurgo, confeccionada com vidro *ruby* e bronze.



Figura 1. Taça de Licurgo: uma das mais famosas antiguidades romanas, data do século IV d.C. Fabricada com vidro contendo nanopartículas de ouro (7), pelos “velhos nanotecnologistas”. As partes escuras correspondem ao bronze e as claras onde se encontra o vidro *ruby*.

Uma definição que combina e enfatiza os dois aspectos abordados – tamanho e sua relação com a propriedade – foi dada por Roco, da National Science Foundation (NSF), em 2001, e tem sido reiteradamente apresentada em palestras e conferências que tratam da nano(ciência e tecnologia). Pode ser assim enunciada:

O nanômetro (um bilionésimo do metro) é um ponto mágico na escala dimensional. As nanoestruturas são a confluência do menor dispositivo feito pelo homem e a maior molécula das coisas vivas. A ciência e a engenharia da nanoescala referem-se aqui ao entendimento básico e aos resultados dos avanços tecnológicos, oriundos da exploração das novas propriedades físicas, químicas e biológicas dos sistemas que apresentam tamanho intermediário entre os átomos isolados, moléculas e materiais estendidos (bulk), no qual (tamanho) as propriedades de transição entre estes dois limites podem ser controladas.

O “tipo especial de ser pequeno” é, portanto, no contexto da nanotecnologia, um paradigma da maior importância, na medida em que nem tudo que tem dimensões nanométricas é, necessariamente, nanotecnológico.

3. CONCEPÇÕES E FERRAMENTAS PARA A NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA: NA DIREÇÃO DOS NANOMATERIAIS

Não obstante à vastidão do campo da nanotecnologia e nanociência, somada à questão das propriedades dependentes de tamanho, anteriormente discutida, há um certo consenso de que sua abordagem tem dois braços claramente identificados. O primeiro é o “de cima para baixo” (do inglês *top-down*), que diz respeito à fabricação de estruturas em nanoescala, fazendo-se uso de técnicas de *etching* ou feitas à máquina, enquanto que o “de baixo para cima” (*bottom-up*), às vezes chamado de “nanotecnologia molecular”, aplica-se à criação de estruturas orgânicas, inorgânicas e, mesmo híbridas, átomo por átomo, molécula por molécula.

Na primeira abordagem, fica clara a influência do substrato teórico e experimental que vem da microeletrônica, da engenharia e da física, por exemplo. No segundo caso, grande parte do arcabouço vem do terreno da química e biologia, de onde emergem diferentes estratégias para tratar a complexidade, controlar a auto-organização e os efeitos supramoleculares. Tais colocações, por si só, fazem emergir a natureza interdisciplinar,

colocando-nos, desde o primeiro momento, frente a uma característica cada vez mais presente nas chamadas novas tecnologias que, de resto, vale para a nanotecnologia, qual seja: a necessidade da concorrência de diversas *expertises* e de sistemas cooperativos de facilidades laboratoriais e instrumentais.

Parece-nos oportuno fazer ainda um comentário adicional sobre a questão da construção, átomo-por-átomo, o que implica dominar as técnicas de manipulação. Este capítulo da nanotecnologia, certamente, por si só, já se constitui num enorme desafio. Como resultado deste desenvolvimento se esperaria, por exemplo, uma nova forma de sintetizar compostos (e mesmo suas nanoestruturas) que tem sido denominada “Mecanosíntese”. Comparada com a síntese em fase-solução, ela seria realizada sem o concurso dos fenômenos de difusão, pois os átomos seriam transportados para posições precisas, mecanicamente e no vácuo (8). Apesar de se constituir num modo absolutamente atraente de se vir a fazer moléculas e agregados de moléculas, como já mencionamos, os desafios são enormes, uma vez que, qualquer produto, para ser usado no dia-a-dia, necessita de miligramas, gramas e, mesmo exagerando, quilos. Forçosamente, temos que passar pelo número de Avogadro (número de átomos ou moléculas em um mol de substância; com o valor de $6,022 \times 10^{23}$), o que torna o desafio ainda maior!

É bem verdade que, de modo geral, o que tem sido observado na literatura corrente sobre a obtenção de nanoestruturas e materiais nanoestruturados é o uso, mais e mais crescente, dos chamados “métodos químicos”, sobretudo daqueles que tiram partido dos fenômenos de auto-organização e automontagem (9, 10).

O domínio e aplicação destes fundamentos têm permitido um avanço simplesmente fantástico no que diz respeito à síntese de novos materiais, diretamente embricados com as concepções aqui colocadas, com as mais diferentes morfologias: nanopartículas, nanotubos, nanofios, nanofitas, nanobastões, nano-X. Ficando apenas em dois exemplos verdadeiramente emblemáticos, citamos o fulereno e os nanotubos (ilustrados na Figura 2), que se constituem na terceira e quarta novas formas do carbono. Já existe a quinta: as chamadas nanoesponjas (11).

São muitas as ferramentas necessárias para o desenvolvimento da nanociência e da nanotecnologia. No caso da primeira, do ponto de vista

laboratorial, além das facilidades normais de um laboratório de pesquisa de materiais (fornos, capelas de alta sucção, sistemas de vácuo, vidraria especial, câmaras secas etc), uma facilidade importante é a “sala limpa”. No que diz respeito aos instrumentos, além dos convencionais (espectrômetros para diferentes regiões espectrais, técnicas de difração como as térmicas, elétricas e de superfícies etc) o quadro se completa com as indispensáveis novas gerações de microscópios de alta resolução (transmissão, varredura, força-atômica, tunelamento) e as espectroscopias/microscopias ópticas confocais, que utilizam métodos fluorescentes e de ótica não-linear. Com relação a estas últimas, por se tratarem de técnicas desenvolvidas muito recentemente, para detalhes, consulte a referência (14).

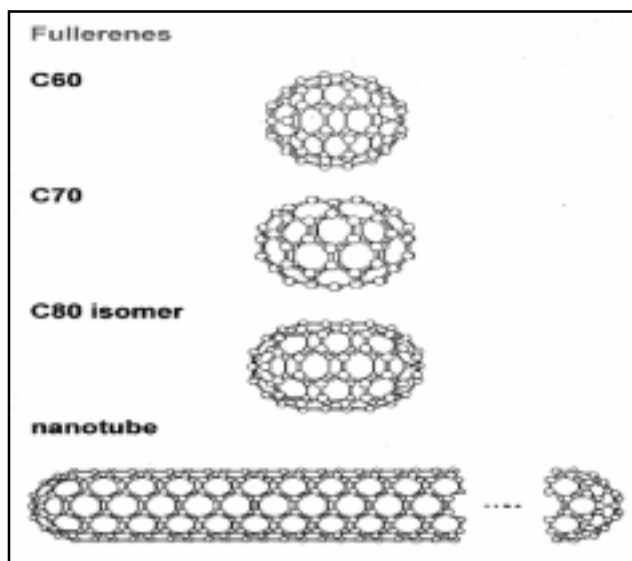


Figura 2. Diferentes tipos de fulerenos (C_{60} , C_{70} e o isômero C_{80}) e nanotubo (12,13).

Quando migramos para o contexto industrial – além da utilização *in loco* e/ou compartilhada das facilidades mencionadas –, depara-se com necessidades intrínsecas do ambiente industrial, tais como: máquinas e instrumentação para fabricação, montagem, teste e controle de qualidade.

Finalmente, falando ainda das ferramentas, vale mencionar o importante papel dos poderosos computadores que hoje não só permitem a modelagem e o *design* de novos materiais, como também a simulação de suas propriedades.

EM PRINCÍPIO, O QUE É PRECISO SABER?

No que diz respeito aos conhecimentos necessários para se trabalhar com nanociência e nanotecnologia, certamente várias pistas já foram apresentadas para o caso do enfoque de nanomateriais. Contudo, um escopo mais abrangente pode ser apresentado (15):

- conhecimentos de química e física do estado sólido (dependência das propriedades com o tamanho, (dependência das propriedades com o tamanho) estruturas cristalinas, vibrações de rede);
- bandas de energia (isolantes, semicondutores e condutores, energia das ligações, superfícies de Fermi);
- partículas localizadas (doadores e receptores, *traps*);
- métodos e propriedades de medidas (estrutura atômica, cristalografia, determinação de tamanho de partícula, estrutura das superfícies);
- microscopia (microscopia eletrônica de transmissão, microscopia eletrônica de varredura, microscopias de força-atômica e tunelamento);
- espectroscopia (infravermelho e Raman, fotoemissão e espectroscopia de raios-X, ressonância magnética);
- propriedades de nanopartículas individuais (*nanoclusters* metálicos, nanopartículas semicondutoras, métodos de síntese – plasma, métodos químicos, termólise e ablação laser);
- estruturas do carbono (moléculas de carbono, *dusters* de carbono, nanotubos de carbono, aplicações de nanotubos);
- materiais nanoestruturados (nanoestruturas sólidas desordenadas, cristais desordenados);
- materiais magnéticos nanoestruturados (magnetoresistência gigante e colossal, ferrofluidos);
- espectroscopia óptica e vibracional (região do infravermelho, luminescência, nanoestrutura em cavidades zeolíticas);
- poços, fios e pontos quânticos (preparação de nanoestruturas quânticas, efeitos de tamanho e dimensionalidade, excitons, tunelamento, aplicações, supercondutividade);

- automontagem (processos, monocamadas);
- catálise (superfície e área de nanopartículas, materiais porosos, argilas pilarizadas, colóides);
- compostos orgânicos e polímeros (formação e caracterização de polímeros, nanocristais, polímeros condutores, blendas, estruturas supramoleculares – moléculas dendríticas, dendrímeros supramoleculares, micelas).

Caso a vertente esteja dirigida para materiais biológicos, destacamos:

- “blocos de construção” biológicos (tamanhos dos blocos e nanoestruturas, nanofios de peptídeos e nanopartículas de proteínas);
- ácidos nucleicos (nanofios de DNA, código genético, síntese de proteínas),
- nanoestruturas biológicas (proteínas, micelas e vesículas, filmes multicamadas),

e, para o caso de nanodispositivos:

- sistemas microeletromecânicos (MEMs);
- sistemas nanoeletromecânicos (NEMs) (fabricação, e nanodispositivos),
- chaveamento molecular e supramolecular.

Muitos dos pontos tratados nesta lista-tentativa estão na intersecção entre química, física, biologia e engenharia, o que, uma vez mais, reforça o carácter altamente interdisciplinar da nanociência e da nanotecnologia.

À PROCURA DAS TENDÊNCIAS: O QUE SE ESTÁ ESTUDANDO, E PRECISANDO...

No início deste texto, chamamos atenção para a questão da dificuldade que traz, aos pesquisadores e interessados, a enorme quantidade de trabalhos que são realizados sob o olhar da nanociência e da nanotecnologia. As preliminares de um estudo de prospecção, para vários países, que está sendo realizado pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), considerando cerca de 25 palavras-chave, apontam para um número de cerca de 130 mil artigos científicos, a partir de 1994 (16).

Sendo assim, muitos dos aspectos que aqui serão colocados têm por base a análise de tendências avaliadas, levantadas por meio de diferentes documentos disponíveis (17, 18) e de contato com a literatura científica

necessária à atuação na área. Fique claro que o exercício de se elaborar uma lista-tentativa de saberes, apresentada no item anterior, passou também por análise semelhante.

De um ponto de vista geral, considerando-se que os materiais são fundamentais para a grande maioria das aplicações da nanotecnologia, fica evidente a necessidade de matérias-primas (materiais de partida), tais como óxidos, semicondutores e especialidades químicas orgânicas e inorgânicas. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tendências e comentários sobre os materiais em nanociência e nanotecnologia

Tendência	Comentário
Nanopartículas	A produção controlada de partículas na faixa de 1-100 nm é crucial; seu manuseio certamente é um problema-chave.
Estruturas quânticas	A pureza dos materiais é fundamental para a obtenção destas estruturas e também a realização de pesquisas na direção das metodologias de produção.
Filmes finos multicamadas	As necessidades passam pela presença de salas e ambientes “limpos”, uma vez que as impurezas e defeitos comprometem a performance dos filmes. Materiais de alta pureza serão necessários para fontes de <i>sputtering</i> e uso em métodos de deposição química (CVD).
Dispositivos nanomecânicos	Materiais com integridade física, que permitam a produção de dispositivos, serão de grande importância, dado que serão submetidos a tensões e esforços mecânicos.
Materiais “nanoprobes”	Materiais necessários para a produção de pontas-de-prova para microscópios de imageamento com varredura, uma das ferramentas fundamentais da nanotecnologia. Necessidade de materiais que sejam quimicamente inertes e fisicamente estáveis, a ponto de poderem ser usados como pontas-de-prova atômicas.
Biosensores e transdutores	Capacidade de síntese de especialidades químicas orgânicas ultrapuras, contendo grupos terminais para uma aplicação determinada, e capazes de ligar-se, de modo reprodutível, a superfícies de semicondutores e óxidos.

Finalizando, e sem a pretensão de sermos exaustivos, não poderíamos deixar de considerar neste texto algumas áreas e aplicações perspectivadas para a nanotecnologia. Valemo-nos para isto de informações veiculadas na referência (19).

- **Indústria automotiva e aeronáutica:** materiais mais leves, reforçados por nanopartículas; pneus que durem muito mais tempo e que sejam recicláveis; tintas que não sofram os efeitos da salinidade marinha; plásticos não-inflamáveis e mais baratos, tecidos e materiais de recobrimento com poder de auto-reparação.
- **Indústria eletrônica e de comunicação:** registro de dados por meio de meios que utilizem nanocamadas e pontos quânticos (*quantum-dots*); telas planas; tecnologias sem-fio; novos aparelhos e processos dentro de todos os aspectos das tecnologias de informação e comunicação; aumento das velocidades de tratamento de dados e das capacidades de armazenamento, que sejam ao mesmo tempo menos caras que as atuais.
- **Indústria química e de materiais:** catalisadores que aumentem a eficiência energética das plantas de transformação química e que aumentem a eficiência da combustão dos veículos motores (diminuindo assim a poluição); ferramentas de corte extremamente duras e resistentes, fluidos magnéticos inteligentes para uso como lubrificantes; nanocompósitos que combinam propriedades de materiais díspares, tais como, polímeros e argilas.
- **Indústria farmacêutica, biotecnológica e biomédica:** novos medicamentos baseados em nanoestruturas, sistemas de difusão de medicamentos que atinjam pontos específicos no corpo humano; materiais de substituição (próteses) biocompatíveis com órgãos e fluidos humanos; kits de autodiagnóstico que possam ser utilizados em casa; sensores laboratoriais construídos sobre chips; materiais para a regeneração de ossos e tecidos.
- **Setor de instrumentação:** engenharia de precisão, visando à produção de novas gerações de microscópios e de instrumentação para medida, para novos processos e desenvolvimento de novas ferramentas para manipular a matéria em nível atômico; incorporação de nanopós, com propriedades especiais em materiais a granel, tais como os sensores que detectam e corrigem fraturas

iminentes; automontagem de estruturas a partir de moléculas; materiais inspirados pela biologia, bioestruturas.

- **Setor de energia:** novos tipos de baterias; fotossíntese artificial que permita a produção de energia de modo ecológico; armazenagem segura de hidrogênio para utilização como combustível limpo; economia de energia, resultante da utilização de materiais mais leves e de circuitos cada vez menores.

- **Exploração espacial:** construção de veículos espaciais mais leves.

- **Meio ambiente:** membranas seletivas que possam filtrar contaminantes ou ainda eliminar o sal da água; dispositivos nanoestruturados, capazes de retirar os poluentes dos efluentes industriais; caracterização dos efeitos das nanoestruturas sobre o meio ambiente; redução significativa na utilização de materiais e energia; redução das fontes de poluição; novas possibilidades para a reciclagem.

- **Defesa:** detectores e remediadores de agentes químicos e biológicos; circuitos eletrônicos cada vez mais eficientes; materiais e recobrimentos nanoestruturados muito mais resistentes; tecidos mais leves e com propriedades de auto-reparação; novos substituintes para o sangue; sistemas de segurança miniaturizados.

Não obstante este vasto “menu de idéias”, estas, e seguramente outras diferentes escolhas possíveis estão ligadas a imperativos econômicos e vantagens diferenciais e competitivas, fazendo, cada vez mais, parte das estratégias e dos objetivos nacionais permanentes de países e blocos. Muitas realizações estão em curso. Um significativo inventário delas a partir de 2001 pode ser consultado na referência (20).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Não há a menor dúvida de que a nanociência e a nanotecnologia estão prenunciando e promovendo a emergência de uma nova revolução no conhecimento e na maneira como moléculas e estruturas são fabricadas. Isto certamente levará a importantes rupturas tecnológicas e implicações sociais. Algumas vezes, em países industrializados, centrando o foco das discussões

exclusivamente sobre os riscos da nanotecnologia, podem indiretamente estar contribuindo para diminuir as oportunidades desta tecnologia para os países em desenvolvimento. Como contraponto – também em países industrializados –, outros há que têm advogado a favor da nanotecnologia, afirmando que a mesma “oferece uma gama de benefícios para os países em desenvolvimento”, especialmente na área da saúde e do meio ambiente (21). O importante nestas considerações é que o debate envolvendo nanotecnologia e desenvolvimento está aberto e, à medida que os países em desenvolvimento forem organizando seus programas, e, sobretudo, obtendo resultados palpáveis, a temperatura destas questões tende a subir, certamente.

Por fim, esperamos que com este texto tenhamos dado um panorama geral, uma contribuição inicial para o conhecimento dessa fascinante área da ciência e das novas tecnologias.

REFERÊNCIAS E NOTAS

- 1 ROCO, M. C.; BAINBRIDGE, W. (Ed.). *Societal implications of nanoscience and nanotechnology*. [S. l.] : National Science Foundation, 2001. Disponível em: <<http://www.researchandmarkets.com/reports/37902/>>.
- 2 _____. Broader societal issues of nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research*, v. 5, n. 181, 2003.
- 3 *Outros*, inclui: Austrália, Canadá, China, Europa do Leste, Israel, Coreia, Singapura, Taiwan e demais países com programas de C&T, em Nanotecnologia.
- 4 RATNER, M.; RATNER, D. *Nanotechnology*. Prentice Hall : Upper Saddle River, New Jersey, 2003.
- 5 Disponível em: <<http://www.glass-time.com/Encyclopedia/goldrubyglass.htm>>.
- 6 FARADAY, M. *Philosophical Magazine*, v. 14, p. 401-512, 1857.
- 7 Disponível em: <<http://www.thebritishmuseum.ac.uk/science/text/lycurgus/sr-lycurgus-p1-t.html>>.

8 DREXLER, K. E. *Nanosystems*. New York : John Wiley, 1992.

9 HALL, Nina. (Org.). *Neoquímica*. Tradução de P. S. Santos; O. L. Alves; C. Pasquini; G. C. Azzellini. Porto Alegre : Bookman, 2004.

10 Segundo Lehn, J-M. e Ball, P., apresentada na ref. 9 (Cap.12), *Auto-organização* é ordenamento espontâneo de unidades moleculares ou supramoleculares numa estrutura não-covalente de maior ordem, caracterizada por algum grau de ordem temporal e/ou espacial ou, ainda, *design* – por meio de correlações entre regiões distantes. Um sistema auto-organizado pode estar no equilíbrio ou no estado dinâmico caracterizado por diversas configurações estáveis, apresentando comportamento coletivo (e em geral não-linear). Tal definição não exclui (e não precisa excluir) a cristalização e outros fenômenos de ordenamento relacionados, tais como o comportamento líquido-cristalino. *Automontagem*, por sua vez, é a associação espontânea de diversos (mais do que dois) componentes moleculares para formar um agregado discreto, não covalentemente ligado e com uma estrutura bem-definida. Isso irá envolver, geralmente, mais do que um passo cineticamente distinto. A automontagem envolve processos de reconhecimento molecular – eventos de ligação, mas não mera ligação. Mais do que isso podemos dizer que o reconhecimento é a ligação com uma finalidade.

11 Disponível em: <http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/em_pauta/em_pauta_novidades_386.html>.

12 Disponível em: < http://online.itp.ucsb.edu/online/qhall_c98/dekker/oh/04.html>.

13 O C_{60} é primariamente constituído de hexágonos e heptágonos, cujas arestas são formadas por ligações carbono-carbono. É composto de hexágonos e pentágonos, da mesma forma que as faces de uma bola de futebol. Os *nanotubos* receberam este nome pelo fato de aparentarem terem sido formados através de uma rede perfeita de grafite hexagonal, enrolada sobre si mesma para formar um tubo oco. Com apenas alguns nanômetros de diâmetro, a relação comprimento/largura é extremamente alta. Maiores detalhes veja em: Saito, R., Dresselhaus, G. and Dresselhaus, M. S., *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London (2001) e Taylor, R., *Lecture Notes on Fullerene Chemistry*, Imperial College Press, London 1999.

14 O Instituto do Milênio de Materiais Complexos, sediado no Instituto de

Química da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) realizou, em abril de 2004, Colóquio que tratou deste assunto. Para assistir a este Colóquio, acesse <http://www.cameraweb.unicamp.br/acervo/acervo.html> e identifique o arquivo pelo título “*Quantum Dots para Dispositivos Ópticos e Microscopias Ópticas Confocais não Lineares*”.

15 A presente lista foi elaborada tendo por base: i) a experiência pessoal, decorrente de atividades de pesquisa realizadas na área; ii) as extensas discussões com vários pesquisadores brasileiros e estrangeiros e, iii) o forte envolvimento com a literatura internacional e com as tendências da pesquisa. Nem por isso deixa de ser uma lista menos arbitrária. Sua intenção é ser um ponto de partida. Grande parte destes tópicos é tratada no livro: *Introduction to Nanotechnology*, de Poole Jr., C. P e Owens, F. J., editado pela Wiley & Sons, Hoboken, no final de 2003.

16 O trabalho de Prospecção da Nanotecnologia no Mundo está sendo feito sob a coordenação do autor deste texto.

17 MATERIALS panel. Disponível em: <<http://www foresight.gov.uk>>.

18 OPPORTUNITIES for industry in the application of nanotechnology. Disponível em: <<http://www foresight.gov.uk>>.

19 Disponível em: <<http://www.ostp.gov/NSTC/html/iwgn/IWGN.Research.Directions/toc.htm>>.

20 Disponível em: <http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/em_pauta/em_foco_nanotecnologia.html#>

21 Disponível em: <<http://www.telegraph.co.uk/connected/main.jhtml?xml=/connected/2003/06/05/ecnsano05.xml>>; <<http://www.etcgroup.org/documents/TheBigDown.pdf>>.

Resumo

O presente artigo trata da nanociência e da nanotecnologia em seu senso largo. Mostra uma pequena cronologia da área, ressaltando, segundo opinião do autor, as principais contribuições e implicações. Apresenta, ainda, dados dos investimentos globais feitos na área, abarcando o período 2000-2003. A definição de nanotecnologia é comentada, sobretudo visando ao entendimento das relações entre propriedades e tamanho nanométrico, fazendo-se valer, como exemplo, do vidro ruby. Procurou-se apresentar quais as ferramentas conceituais e o arcabouço teórico-experimental para se trabalhar na área, o que leva a um “menu” de possíveis aplicações. Um comentário final sobre as relações entre nanotecnologia e desenvolvimento sugere a emergência da discussão desta temática.

Abstract

This article provides an overview of nanoscience and nanotechnology as well as an outline of its possible applications. It highlights some milestones of both fields, taking into account the author's opinion on their relevance, implications and impact of nanotechnology on our way of life. World Government investments in nanotech for the period 2000-2003 are presented. Arguments on nanotechnology's definition are based on understanding the relationship between properties and nanometric size, pointing out the “gold ruby glass” as an example that illustrates these concepts. There are comments on conceptual tools and the necessary theoretical-experimental backgrounds as prerequisites to work in these fields of knowledge. A final comment on the relationship between nanotechnology and development suggests the need of further discussion on this matter.

O Autor

OSWALDO LUIZ ALVES. Doutor em Química pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Pós-doutoramento no Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman (CNRS/França). Professor titular de Química, no Instituto de Química da Unicamp, foi o fundador e coordenador científico do Laboratório de Química do Estado Sólido (LQES). Seu interesse está centrado em Química de Sólidos e Materiais, trabalhando com vidros especiais, filmes finos, vitrocerâmicas porosas, *quantum-dots*, nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono e inorgânicos. Possui mais de 120 trabalhos publicados e 12 patentes depositadas. É vice-coordenador do Instituto do Milênio de Materiais Complexos (IMMC). Em 2001, tornou-se membro titular da Academia Brasileira de Ciências e, em 2002, foi agraciado com a Comenda da Ordem Nacional do Mérito Científico.