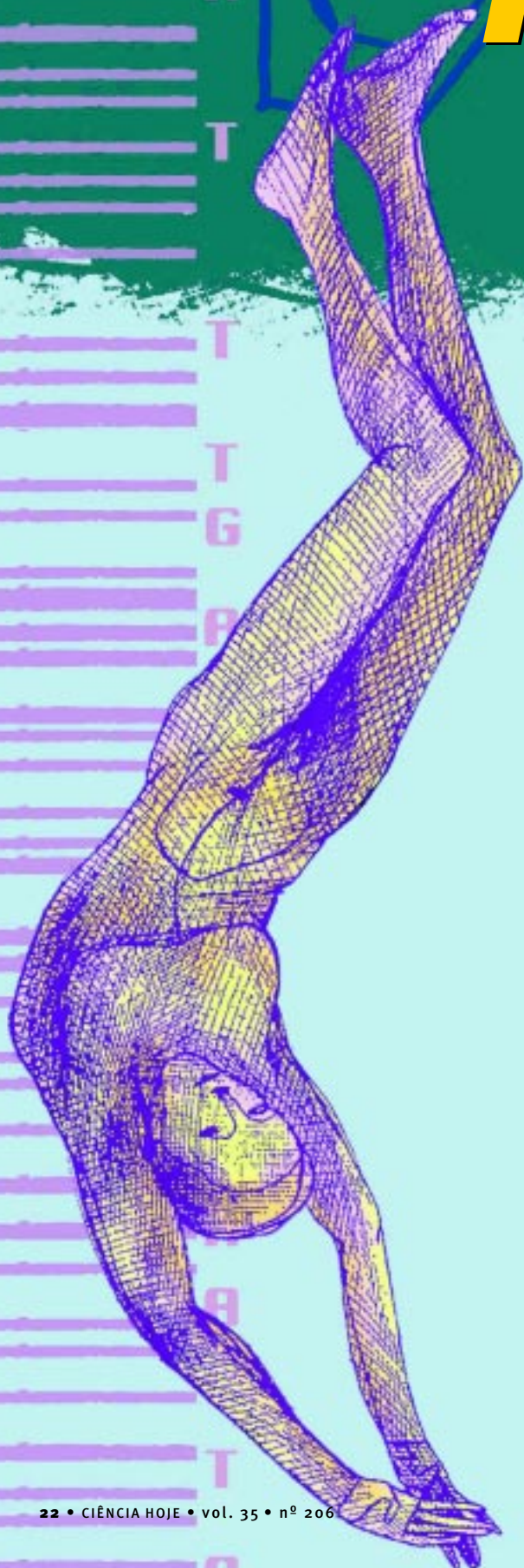


# Fronteiras

## ÉTICA



**Em princípio, todo trabalho científico** estabelece uma fronteira entre aquilo que é sabido e o que é desconhecido. Logo, o avanço do conhecimento produzido pelo trabalho científico é, em maior ou menor grau, sempre revolucionário.

O contingente de cientistas que empurra essas fronteiras é composto por uma rica variedade de indivíduos. Alguns vêm mais que outros. Uns trabalham duramente, outros nem tanto. Há cientistas experimentalistas e pesquisadores teóricos. Alguns têm sorte e tropeçam nas descobertas. Uns alinham e ordenam as coisas e outros são extremamente originais e intuitivos. O que importa é que todos têm em comum a pergunta que os motiva.

Difícilmente, um cientista ou filósofo pode prever as conseqüências de suas descobertas. Frequentemente, porém, a percepção pública do trabalho científico, sobretudo entre os políticos, implica um resultado prático. Isso leva à crença generalizada de que um trabalho é em geral considerado como sendo verdadeiramente de fronteira quando impacta a sociedade de maneira significativa. Uma anedota ilustra bem essa idéia. Quando o físico e químico britânico Michael Faraday (1791-1867) demonstrou o fenômeno recém-descoberto da indução eletromagnética, o então ministro das finanças da Inglaterra, William Gladstone (1809-1898), teria perguntado ao cientista: “Está tudo muito bem, mas para que serve a indução eletromagnética?” A resposta de Faraday: “Eu não sei, mas um dia o senhor poderá cobrar imposto sobre isso.” Em outra versão da mesma história, Faraday teria respondido: “Para que serve um bebê recém-nascido?”

Não obstante as aplicações práticas, a ciência de fronteira também é entendida como aquela que modifica o pensamento. Aquela que traz novas e-

# da ciência

## E DESENVOLVIMENTO

vidências e idéias, obrigando-nos a um salto qualitativo na maneira como enxergamos a natureza. Exemplos clássicos são o heliocentrismo e o evolucionismo. A força desses novos conceitos é tão subversiva que não raro guerras sobrevêm do embate entre reacionários e progressistas.

No entanto, compreensivelmente, é o aspecto aplicado, humanizador, da ciência que predomina como fronteiroço.

No contexto histórico, o acervo dos cientistas mais populares concentra aqueles envolvidos com trabalhos científicos desenvolvidos na área médica/biológica, que tiveram impacto imediato no tratamento ou na prevenção de certas doenças e que colaboraram para aumentar dramaticamente a expectativa de vida do homem. Esse é o caso da descoberta dos microrganismos infecciosos e do desenvolvimento das vacinas, dos antibióticos e dos transplantes. Mais recentemente temos os genomas e as células-tronco, que muito prometem. A agricultura, que no passado já havia sofrido várias revoluções, é novamente palco de acalorados debates, em função dos produtos transgênicos. Na física e na química ocorre o mesmo. Depois da física newtoniana, a radioatividade agitou tanto a comunidade dos físicos quanto a população em geral. As aplicações industriais e médicas desse conhecimento são, nos dias atuais, corriqueiras. A eletrônica também afetou nossa vida de modo dramático, principalmente no que diz respeito à comunicação e ao lazer. Em breve a nanotecnologia poderá realizar milagres dentro e fora do corpo humano.

O termo globalização, muito usado em economia, expressa agora uma realidade que inclui a comunicação quase instantânea e uma crescente mobilidade, cada vez mais democratizada. Em 2006, já estarão voando aeronaves que transporta-

rão cerca de 800 a mil passageiros, o que reflete uma tecnologia cada vez mais sofisticada. A química não fica atrás, tendo contribuído com fármacos, corantes, explosivos e com toda a sorte de polímeros sintéticos que exibem incríveis propriedades de elasticidade e de resistência mecânica.

Ninguém mais duvida da capacidade do homem de explorar o espaço, de aumentar sua expectativa de vida para além dos 100 anos. Os atuais textos de ficção científica já exigem de seus autores mais conhecimento básico de tecnologia do que imaginação propriamente dita. Já podemos gerar produtos agrícolas sob encomenda, com tamanho, aspecto, sabor e valor nutritivo de acordo com o gosto e necessidade do freguês.

Se o *Homo sapiens* não arruinar de vez o planeta Terra, viveremos em futuro não muito remoto uma era na qual o homem poderá clonar a si próprio e ter a sua disposição um banco de órgãos para os casos de acidentes e de doenças crônicas. A analogia com uma retífica de automóveis é inescapável. O mais excitante é que o cientista brasileiro já é e oxalá continue sendo parceiro nessas empreitadas.

É com esse espírito que a *Ciência Hoje* celebra neste número a contribuição de vários grupos de cientistas brasileiros para a pesquisa de fronteira. Eles demonstram diariamente que o problema de manter a população alimentada, vestida e com saúde não pode ser resolvido sem a ciência.

**Franklin Rumjanek**

Departamento de Bioquímica Médica,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

# Informação quântica

## DO TELETRANSPORTE AO COMPUTADOR

**Há 50 anos, muitos físicos nem mesmo ousariam mencionar a possibilidade de se fazerem experimentos com átomos ou partículas de luz individuais. Hoje, porém, essas diminutas entidades já são corriqueiramente isoladas em vários laboratórios do mundo, inclusive no Brasil. E mais: a exploração das estranhas propriedades desse microuniverso promete levar ao desenvolvimento de tecnologias que, havia pouco, só habitavam o cenário da ficção científica.**

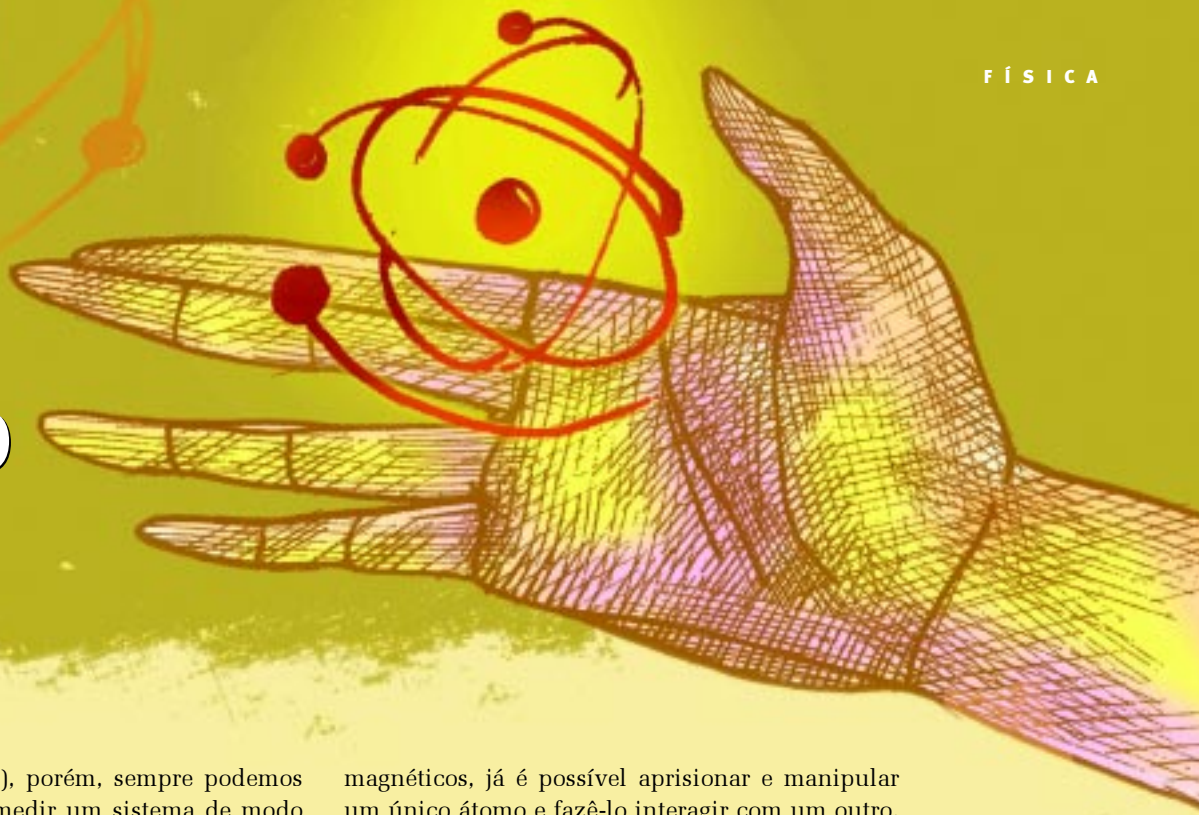
**Luiz Davidovich**  
Instituto de Física,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Para quem está acostumado a observar** os fenômenos naturais que se revelam no dia-a-dia, o diminuto universo das dimensões atômicas ou moleculares, regido pela chamada teoria quântica, pode parecer, no mínimo, estranho. Nele, entidades quânticas, como um elétron, podem ora se comportar como ondas, ora como corpúsculos, dependendo de como são observadas.

Segundo a física clássica, uma partícula tem seu estado bem determinado por sua posição e seu momento (o produto de sua massa por sua velocidade). Com base apenas nessas duas grandezas, é possível prever, em um determinado instante, os resultados de qualquer medida efetuada sobre ela. Mas, para uma entidade quântica (elétron, próton, nêutron, fóton etc.), não é possível prever com certeza o resultado de qualquer medida realizada sobre ela. Na verdade, o que se obtém são apenas probabilidades de a medida fornecer os vários valores possíveis para as grandezas relevantes. Essas probabilidades podem ser inferidas a partir de uma onda associada à entidade quântica, a mesma onda que descreve as suas propriedades ondulatórias. Por exemplo, se a onda associada à partícula tiver uma grande amplitude em uma certa região do espaço, isso significa que é grande a probabilidade de se encontrar a partícula nessa região.

Mais ainda: nem mesmo é possível medir o estado de uma única entidade quântica, pois as leis da física nos obrigam a ter um conjunto muito grande delas, idealmente infinito, preparadas da mesma forma para que o estado quântico possa ser medido. Isso tem relação com uma propriedade sutil: é proibido 'clonar' uma única entidade quântica. Se pudéssemos fazer isso, poderíamos produzir um conjunto muito grande de réplicas, todas com o mesmo estado, o que permitiria medir esse estado. Além disso, qualquer medida feita sobre um sistema quântico necessariamente perturba seu estado e, portanto, o altera. No mundo clás-

# QUÂNTICO



sico (ou macroscópico), porém, sempre podemos supor que é possível medir um sistema de modo que a perturbação causada seja desprezível.

Essas propriedades levaram muitos físicos a considerar, há apenas 50 anos, que a idéia de realizar experimentos com átomos ou fótons individuais era absurda, consistentemente com o fato de que a física quântica deveria ser aplicada sempre a conjuntos de sistemas – em virtude de envolver a idéia de probabilidade – e jamais a sistemas individuais. No entanto, hoje, isolar essas entidades e estudá-las individualmente passou a ser um experimento rotineiro em vários laboratórios de diversos países, inclusive do Brasil.

## Informação quântica

Na última década, foram desenvolvidas, em diversos laboratórios, técnicas que permitem a manipulação individual de átomos, moléculas e fótons (figura 1). Por exemplo, através de campos eletro-

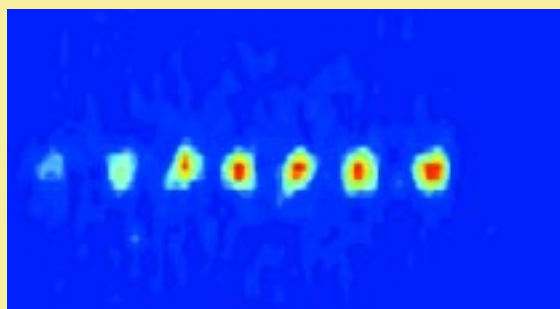
magnéticos, já é possível aprisionar e manipular um único átomo e fazê-lo interagir com um outro, também aprisionado, ou ainda com um único fóton, armazenado em uma 'armadilha' formada por espelhos de alta reflexão.

Esses avanços possibilitaram o desenvolvimento de uma nova área de pesquisa, a chamada informação quântica, que estuda métodos para caracterizar, transmitir, armazenar, compactar e utilizar computacionalmente a informação contida em estados quânticos. Trata-se de um tema amplo e multidisciplinar que teve um desenvolvimento acelerado nos últimos anos, motivado tanto pelo interesse fundamental dos fenômenos naturais que explora quanto pelas perspectivas de aplicação em computação quântica, telecomunicação e criptografia.

## Pinças e condensados

As técnicas de aprisionamento e manipulação têm permitido a investigação de propriedades sutis do mundo quântico e podem levar ao desenvolvimento de novos materiais, à construção de instrumentos de medida de altíssima sensibilidade, à implementação de computadores quânticos e à análise de moléculas biológicas. Em relação a esse último tema, feixes de *laser* – em configurações denominadas pinças ópticas – já permitem prender, mover e até mesmo esticar moléculas biológicas, como o DNA, e estudar suas propriedades mecânicas.

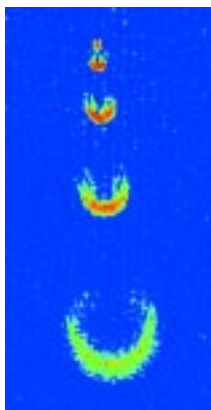
O aprisionamento de átomos em armadilhas eletromagnéticas levou recentemente à investigação detalhada de um fenômeno previsto ainda na ▶



**Figura 1.** Íons presos por campos magnéticos poderão ser usados no desenvolvimento da computação quântica

FOTO DE RAINER BLATT/UNIVERSIDADE DE INNSBRUCK (ÁUSTRIA)

**Figura 2. Pulsos de átomos oriundos de um condensado de Bose-Einstein formam o chamado 'laser de átomos'**



década de 1920 por Albert Einstein (1879-1955), que o desenvolveu com base nas idéias de seu colega indiano Satyendra Bose (1894-1974). O chamado condensado de Bose-Einstein é um aglomerado de átomos que ocupa um único estado quântico e, assim, se comporta como se fosse um 'átomo gigante'.

É interessante destacar que o condensado de Bose-Einstein, de certa forma, pertence aos dois mundos: é um sistema macroscópico que exhibe notáveis propriedades quânticas. Através da aplicação de feixes de ondas eletromagnéticas – na frequência de ondas de rádio –, força-se a saída ordenada dos átomos que formam o condensado da armadilha em que estão aprisionados, formando-se então um feixe com propriedades análogas às de um *laser* e que, por isso mesmo, tem sido chamado 'laser de átomos' (figura 2).

'Lasers de átomos' poderiam ser aplicados, por exemplo, em técnicas litográficas de altíssima resolução – a litografia consiste em imprimir informação sobre um substrato, resultando, por exemplo, naqueles intrincados desenhos vistos em circuitos impressos. Essa nova litografia levaria a um aumento substancial da capacidade de armazenamento de informação com relação àquela feita com luz ou com elétrons. Esse aumento resulta do fato de a onda associada aos átomos ter um comprimento de onda (distância entre dois máximos sucessivos da onda) muito menor que a quantidade correspondente para fótons de luz ou elétrons

que tenham a mesma velocidade dos átomos. Quanto menor o comprimento de onda, maior a resolução com a qual se pode 'escrever' sobre um substrato e, assim, maior a capacidade de armazenamento de informação.

Esses feixes atômicos poderiam também ser a base de funcionamento de um interferômetro de alta precisão. Interferômetros são aparelhos que dividem um feixe de luz em dois, reunindo os dois feixes resultantes depois que cada um deles percorre um dos 'braços' do equipamento. A divisão pode ser feita, por exemplo, com espelhos semi-transparentes, que deixam passar uma parte do feixe e refletem a outra, como as vitrines onde se vê o objeto exposto e ao mesmo tempo o reflexo do observador. Após serem reunidos, os feixes interferem entre si, dando origem a franjas claras e escuras. Se um dos feixes, por alguma razão, se atrasa em relação ao outro, essas franjas se deslocam. Esse atraso pode ser provocado, por exemplo, por um movimento de rotação do aparelho ou pela presença de um campo gravitacional, com valores diferentes nos dois braços do interferômetro, devido, por exemplo, a um dos braços estar mais alto que o outro. Interferômetros podem também ser construídos com corpúsculos. Nesse caso, é a onda associada ao corpúsculo que produz interferência.

A sensibilidade de um interferômetro é tanto maior quanto menor é o comprimento de onda. Por isso, o fato de ser o comprimento de onda associado a um átomo muito menor que o de um elétron permitiria a construção de interferômetros extremamente precisos, úteis para a navegação interestelar, para a medida de constantes fundamentais e para aplicações em prospecção geológica e mineral – por exemplo, um interferômetro desse tipo permitiria a medida do campo gravitacional na superfície da Terra com precisão suficiente para detectar poços de petróleo.

**Figura 3. Possível esquema para um chip atômico: o ponto luminoso é um condensado de Bose-Einstein, mantido por campos magnéticos a uma distância de alguns microns da superfície do circuito integrado – a mosca dá uma idéia do grau de miniaturização**



## Chips atômicos

Os recentes desenvolvimentos na área de informação quântica têm permitido que uma nova geração de *chips* comece a ser investigada em vários laboratórios. Nos chamados '*chips* atômicos', em vez de elétrons, têm-se átomos individuais ou mesmo condensados de Bose-Einstein sendo conduzidos através de um circuito integrado. Diferentemente

WOLFGANG KETTERLE/MIIT (ESTADOS UNIDOS)

TED HANSCH/UNIVERSIDADE DE MUNIQUE (ALEMANHA)

dos *chips* eletrônicos – em que os elétrons fluem através dos fios condutores impressos em uma placa de silício –, em um *chip* atômico os átomos são mantidos ‘flutuando’ a alguns microns de uma superfície de silício, por meio de campos magnéticos criados pelo circuito integrado (figura 3).

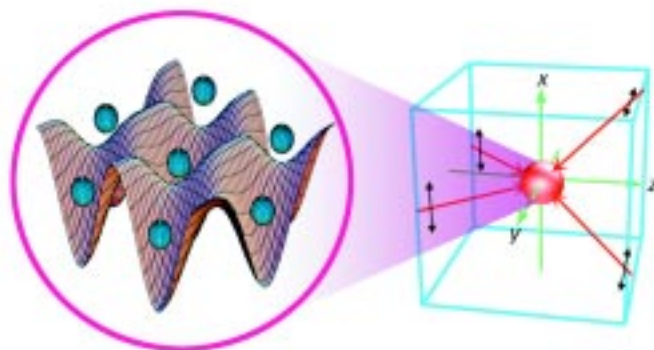
Quando se vibra uma corda – de violão, por exemplo –, formam-se nela vales e picos que se alternam espacialmente. Uma configuração análoga, porém feita com ondas eletromagnéticas estacionárias, tem sido usada para aprisionar átomos em uma estrutura tridimensional semelhante a uma caixa de ovos (figura 4). Essa técnica tem permitido a realização de ‘redes cristalinas ópticas’, bem como o estudo de um fenômeno típico – porém, difícil de se obter de forma controlada – das redes cristalinas convencionais: a chamada transição de fase quântica.

Ao contrário das transições de fase usuais – que dependem da temperatura, como, por exemplo, a transformação de água em gelo –, as transições de fase quânticas dependem do valor relativo de dois tipos de efeito: a) o de interação entre as partículas; b) um efeito essencialmente quântico, o ‘tunelamento’, que faz com que uma partícula possa atravessar, de um ‘vale’ (mínimo) para outro da ‘caixa de ovos’, a barreira que os separa. Se os campos eletromagnéticos são fracos, predomina o efeito de tunelamento, e os átomos circulam entre as várias regiões da rede. Por outro lado, para campos suficientemente fortes, os átomos ficam presos e localizados em mínimos da rede óptica. A transição de fase corresponde precisamente à transição entre esses dois tipos de comportamento dos átomos.

Aplicações desses sistemas têm sido consideradas para a computação quântica, da qual voltaremos a falar mais adiante.

## Criptografia quântica

A possibilidade de controlar individualmente cada fóton está na base da chamada criptografia quântica. A criptografia envolve a codificação de mensagens. Uma etapa essencial nesse processo é passar a ‘chave’ de decodificação para a pessoa que vai receber a mensagem. A manipulação de entidades quânticas isoladas permite que a transmissão dessas chaves seja feita fóton a fóton. Aliando isso à impossibilidade de clonagem, bem



**Figura 4. Esquema de uma rede óptica, com átomos aprisionados nos vales de ondas estacionárias produzidas por quatro feixes de laser**

como ao fato de que qualquer medida de uma entidade quântica transforma necessariamente seu estado, tem-se uma receita ideal para tornar a transmissão de mensagens 100% seguras: se um desses fótons for interceptado, ou seja, medido, seu estado se modifica, o que pode ser verificado posteriormente pelo emissor e receptor da mensagem através da comparação, por via pública, de um subconjunto dos fótons enviados.

Se houver alguma diferença entre os fótons enviados e os recebidos, isso indica que houve tentativa de interceptação da mensagem e, portanto, a chave criptográfica transmitida deve ser descartada. Qualquer tentativa do interceptador de reproduzir o fóton interceptado, enviando a cópia ao receptor final, para que ele não desconfie da interceptação, será fadada ao fracasso, devido à impossibilidade de clonagem quântica.

## Fótons gêmeos e teletransporte

Além do controle e da manipulação individual de átomos e moléculas, os pesquisadores da área de informação quântica já produzem um dos fenômenos mais intrigantes da natureza: os chamados estados emaranhados de fótons (ou ‘fótons gêmeos’).

Fótons gêmeos são produzidos quando se ilumina um cristal com um feixe de *laser* intenso. Existe uma certa probabilidade, que aumenta com a intensidade do *laser*, de que cada fóton do feixe incidente seja absorvido pelo cristal, ao mesmo tempo em que é produzido um par de fótons. Depois de formados, esses pares passam a ter suas propriedades fortemente correlacionadas, ou seja, qualquer medida efetuada em um deles altera as pro- ▶

priedades do outro, mesmo que o par esteja separado por milhares de quilômetros. Daí o nome de ‘fótons gêmeos’ para esses pares emaranhados.

Einstein chegou a dizer que entre dois fótons emaranhados agia “uma fantasmagórica ação a distância”. Porém, no início da década de 1980, foi mostrado experimentalmente que essa ‘estranha’ correlação existia de fato entre partículas gêmeas. Hoje, as propriedades desses estados emaranhados têm levado a aplicações em computação quântica e a demonstrações de novos processos quânticos, como o teletransporte.

Os estados emaranhados de fótons permitem uma nova forma de comunicação, baseada no envio de informação completa sobre o estado quântico de um sistema de um lugar para outro. Isso é notável, pois, para um único sistema quântico, já sabemos que não é possível medir seu estado quântico. Porém, é possível transmiti-lo, usando, para isso, um canal de comunicação quântico, formado por dois fótons gêmeos.

É possível que os fãs de ficção científica notem uma certa semelhança entre a transmissão de estados quânticos e o teletransporte da série de ficção científica *Jornada nas estrelas*. Há, no entanto, diferenças importantes: no teletransporte que está sendo demonstrado atualmente em diversos laboratórios, não é a partícula que está sendo transportada, mas sim seu estado quântico. Essa ‘informação quântica’ não é transportada instantaneamente, mas respeita os limites impostos pela velocidade

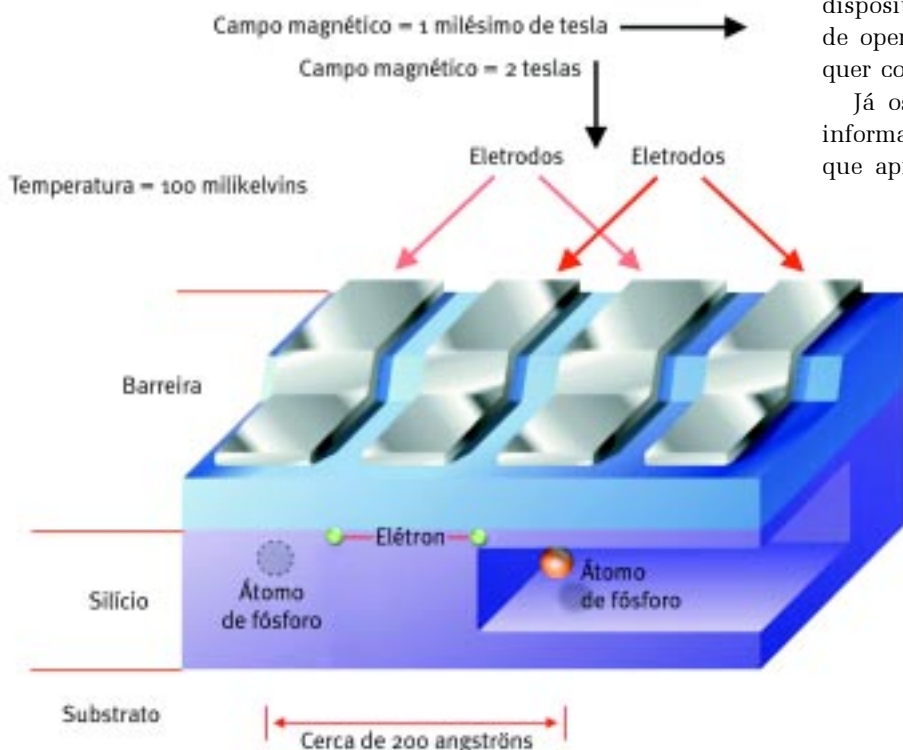
de da luz. Além disso, os cientistas só conseguem teletransportar, por enquanto, o estado de uma única partícula ou estados simples de campos eletromagnéticos, a distâncias pequenas se comparadas às espaciais.

## Computadores quânticos

Sem dúvida, a informação quântica tem encorajado novas idéias que, por sua vez, podem levar ao desenvolvimento de novas tecnologias. Talvez, entre essas promessas, a mais popular seja a do computador quântico. Essas máquinas, baseadas em uma arquitetura revolucionária de processamento de dados e no uso da física quântica para implementação de novos algoritmos, poderiam ser exponencialmente mais rápidas que os computadores atuais – podemos entender um algoritmo como um procedimento matemático para a realização de um cálculo. É um programa de computador (*software*) que executa um algoritmo, ou seja, torna prática essa idéia.

Os computadores ‘clássicos’, que utilizamos hoje em dia, codificam a informação através de uma seqüência de *bits* que assumem os valores 0 e 1. Esses dois dígitos formam a base binária, que permite expressar qualquer número inteiro. Esses *bits* – que podem ser associados fisicamente, por exemplo, a cargas de capacitores – são processados por dispositivos eletrônicos que permitem a realização de operações básicas, em termos das quais qualquer computação pode ser realizada.

Já os computadores quânticos codificariam a informação através de ‘*qbits*’ (ou *bits* quânticos) que apresentam uma propriedade extremamente sutil do mundo quântico: eles podem ser colocados em uma superposição de estados correspondentes aos valores 0 e 1 – no mundo macroscópico e ‘clássico’ dos computadores atuais, seria como se um *bit* pudesse



**Figura 5. Computação quântica com átomos de fósforo implantados em um substrato de silício, conforme proposta de Bruce Kane, da Universidade de Maryland (Estados Unidos). Esse esquema está sendo posto em prática na Austrália. Nele, os eletrodos permitem manipular os elétrons dos átomos de fósforo**

BRUCE KANE/UNIVERSIDADE DE MARYLAND (ESTADOS UNIDOS)

representar, simultaneamente, os valores 0 e 1. Essa superposição poderia ser materializada através, por exemplo, de um átomo que poderia estar em uma superposição de dois de seus estados.

Um conjunto de  $N$  *qbits* pode ser colocado, da mesma forma, em uma superposição de  $2^N$  estados, cada um desses estados correspondendo a certos *qbits* no estado 0 e outros no estado 1: (000... 0), (100... 0), (010... 0), (111... 0), ... (111... 1). Esses estados codificam todos os números passíveis de serem representados por  $N$  *bits*. Isso permite aplicar uma operação física – que corresponderia a um cálculo computacional – simultaneamente a todos as entradas possíveis, realizando-se, assim, uma computação em paralelo, em vez de se calcular seqüencialmente o resultado para cada uma das entradas.

## Duas motivações

São duas as motivações para o desenvolvimento de computadores quânticos. Em primeiro lugar, uma observação feita, já na década de 1960, por Gordon Moore, um dos fundadores da empresa norte-americana Intel. Segundo o que ficou conhecido como ‘lei de Moore’, o número de transistores na unidade central de processamento (microprocessador), bem como a velocidade de processamento, dobram a cada 18 meses. Ao mesmo tempo, cai à metade o número de átomos necessários para codificar um *bit* de informação. Nessa progressão, chegaríamos ao limite de um átomo por *bit* em torno de 2015, o que implicaria a saturação da lei de Moore. Torna-se, então, natural pensar na utilização das propriedades quânticas dos átomos para a implementação de algoritmos computacionais que permitissem aumentar a velocidade de processamento, apesar da saturação dessa lei.

A segunda motivação veio precisamente da descoberta feita, em 1994, por Peter Shor, então pesquisador da empresa AT&T (Estados Unidos), de um algoritmo quântico – para a decomposição de um número em fatores primos – exponencialmente mais rápido que o melhor algoritmo clássico conhecido. A decomposição em fatores primos (ou simplesmente fatoração) é uma operação simples para um computador – dois exemplos de decomposição em fatores primos são  $18 = 2 \times 3^2$  e  $30 = 2 \times 3 \times 5$ . Porém, se o número for grande, o tempo consumido pelo computador para fatorar aumenta muito.

Essa dificuldade para fatorar números grandes é a base de um método criptográfico bastante utilizado hoje em dia, o método RSA – a sigla vem

das iniciais de seus idealizadores, os pesquisadores Ron Rivest, Adi Shamir e Len Adleman. Porém, um computador quântico poderia fatorar um número grande – e, nesse caso, quebrar uma mensagem criptografada – em um tempo exponencialmente menor que o necessário para um computador clássico. Em outras palavras: um computador quântico poderia fazer em segundos o que o mais veloz computador atual levaria milhares de anos.

Mais tarde, outros algoritmos quânticos foram descobertos. Atualmente, há vários sistemas – ver figura 5, por exemplo – tidos como bons candidatos para tornar a computação quântica realidade. Entre esses candidatos, estão: i) íons em armadilhas magnéticas; ii) átomos e fótons em cavidades supercondutoras; iii) redes cristalinas ópticas; iv) moléculas em soluções líquidas manipuladas por ressonância nuclear magnética, a mesma técnica que permite fazer imagens do corpo humano; v) pontos quânticos (um conjunto de elétrons confinados, com poucos bilionésimos de metro de diâmetro) e impurezas em semicondutores.

## No Brasil

Já há no Brasil laboratórios que realizam experiências com átomos aprisionados a baixíssimas temperaturas, fótons emaranhados, pinças ópticas, pontos quânticos e ressonância magnética nuclear. Grupos teóricos investigam propostas para a realização de operações elementares de computação quântica em diversos sistemas físicos, bem como propriedades de estados emaranhados, efeitos do ambiente em sistemas quânticos, algoritmos computacionais.

O Instituto do Milênio de Informação Quântica (IMIQ), criado no final de 2001, reúne diversos desses grupos, apoiando esforços experimentais e promovendo reuniões de trabalho e escolas sobre o tema. Procura-se, assim, realizar o potencial interdisciplinar de uma área que, em outros países, reúne físicos, químicos, matemáticos, engenheiros e cientistas da área de computação.

A complementação e modernização dos equipamentos dos laboratórios existentes, além da formação de novos grupos, aumentarão a competitividade do Brasil nessa área, na qual a inovação tecnológica é ainda incipiente, o que abre a possibilidade de ocupação de nichos por parte de países que se iniciam nesse tipo de atividade.

Na página <http://omnis.if.ufrj.br/~infoquan/>, podem-se obter mais informações sobre o IMIQ, incluindo a relação completa das instituições e dos pesquisadores. ■

### SUGESTÕES PARA LEITURA

- DAVIDOVICH, L.  
‘Teletransporte: uma solução em busca de um problema’ (entrevista a Cássio Leite Vieira) in *Ciência Hoje* n. 137, abril de 1998.
- DAVIDOVICH, L.  
‘O Gato de Schrödinger: do mundo quântico ao mundo clássico’ in *Ciência Hoje* n. 143, outubro de 1998.
- OLIVEIRA, I. S. *et al.*  
‘Computação Quântica – manipulando a informação oculta do mundo quântico’ in *Ciência Hoje* n. 193, maio de 2003.
- JOHNSON, G. A.  
*Shortcut through Time: The Path to the Quantum Computer* (Knopf, Random House, New York, 2003).



# Pequenos RNAs

## UM MUNDO NOVO E REVOLUCIONÁRIO

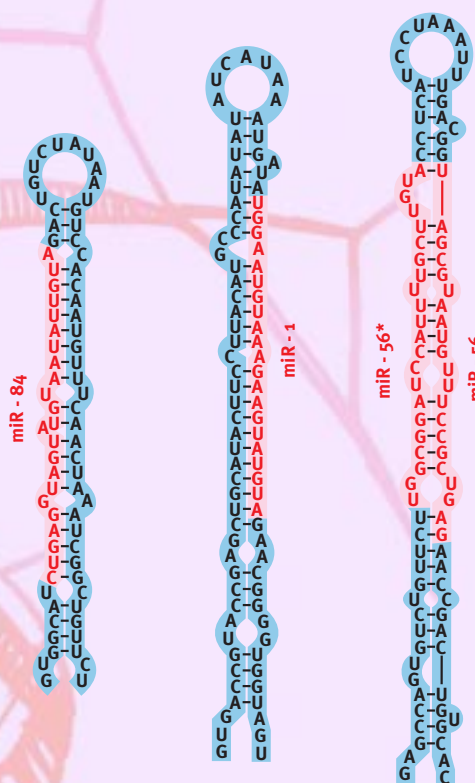
**A descoberta de mecanismos de controle de expressão de genes antes nunca imaginados abriu, há pouco menos de uma década, um novo mundo a pesquisadores de diversas áreas. É o mundo dos pequenos RNAs, ou seja, fragmentos curtos de ácido ribonucléico. Tais RNAs ativam e direcionam um mecanismo que impede que RNAs mensageiros sejam traduzidos em proteínas. Esse mundo recém-desvendado traz ainda novas ferramentas de estudo e muitas aplicações biotecnológicas.**

**Maité Vaslin de Freitas Silva**

Departamento de Virologia,  
Instituto de Microbiologia  
Professor Paulo de Goes,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Há pouco menos de uma década um novo e inesperado mundo começou a ser desvendando por perplexos geneticistas, biólogos celulares e biólogos moleculares: o dos pequenos RNAs. O mais instigante é que, a cada artigo publicado, elucidando um ou outro aspecto, surgem mais e mais perguntas e possibilidades, acrescentando novas peças a esse complexo quebra-cabeças. Além disso, a pesquisa nesse campo vem induzindo o desenvolvimento de potentes ferramentas de estudo da função de genes, de terapia gênica e de aplicações biotecnológicas baseadas nesses pequenos RNAs. O potencial dessas ferramentas é quase incalculável.

Até a descoberta da atividade enzimática de alguns tipos especiais de RNA, as ribozimas, há cerca de 20 anos, o RNA era visto como um mero intermediário entre o ácido desoxirribonucléico (DNA – a molécula que contém toda a informação genética) e as proteínas (que determinam a estrutura e as funções biológicas). Uma década depois, inesperadas funções são descobertas: pequenos RNAs atuam também como re-



**Figura 1. Exemplos de alguns precursores de microRNAs mostrando sua estrutura secundária – esta é reconhecida e ‘cortada’ pela enzima Dicer, gerando esses pequenos fragmentos (seqüência em vermelho) descobertos na última década**



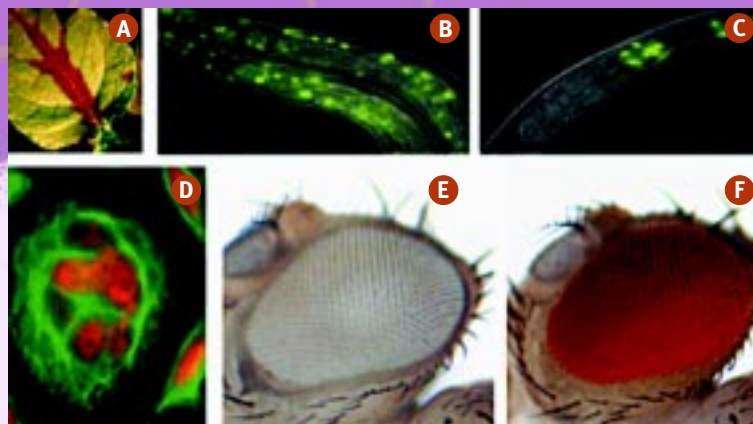
FONTE: NATURE, V. 418, JULHO DE 2002

guladores ativos da expressão dos genes, de forma complexa e coordenada.

Quem são e o que fazem esses pequenos RNAs? Como apareceram de uma hora para outra? Como não os enxergamos antes?

Os pequenos RNAs estão presentes no citoplasma celular aparentemente desde o início da evolução de organismos eucariontes (aqueles cujas células têm núcleo isolado por membrana própria) e têm tamanhos entre 21 e 26 nucleotídeos (os 'tijolos' básicos dos ácidos nucleicos). Eles sempre estiveram lá, mas não eram vistos, por causa das limitações dos métodos de pesquisa, ou, quando encontrados por acaso, eram considerados sem importância biológica. Dentro dessa classe antes ignorada encontramos pelos menos dois grupos, com funções biológicas aparentemente distintas: os microRNAs (miRNAs) e os RNAs interferentes (siRNAs).

Os miRNAs são RNAs endógenos (que pertencem ao organismo), têm cerca de 25 nucleotídeos e exibem importantes papéis regulatórios em animais e plantas: induzem a destruição de RNAs mensageiros ou impedem (ou reprimem) sua tradução. Embora tenham passado despercebidos até recentemente, os miRNAs formam uma das mais abundantes classes de moléculas regulatórias de genes em organismos multicelulares e parecem influenciar a produção de vários genes que codificam proteínas. Muitos miRNAs apenas previnem que RNAs mensageiros gerem proteínas, sem promover sua destruição. Suprimir a tradução, em lugar de destruir as moléculas transcritas, parece ser um modo melhor de modular a expressão gênica, pois deixa em aberto a possibilidade de voltar a realizar a tradução, quando houver interesse.



**Figura 2. Exemplos de silenciamento por RNA: plantas de tabaco (A) e o nematóide *C. elegans* (B e C) nos quais foi silenciado o transgene marcador GFP, observando-se a ausência da coloração verde-amarelada nos tecidos afetados; células humanas nas quais um gene do ciclo celular foi desligado (D); e moscas *Drosophila melanogaster* transgênicas silenciadas (E) e não-silenciadas (F) para um dos genes responsáveis pela cor do olho**

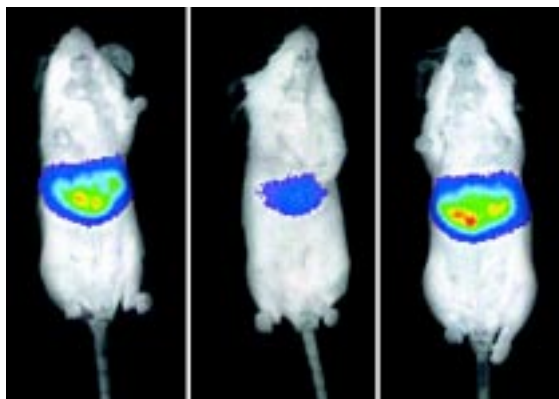
Os miRNAs são produzidos quando uma enzima, denominada Dicer, digere fitas duplas de RNA (dsRNA) imperfeitas, nas quais o pareamento dos nucleotídeos não é total. Esses precursores têm entre 70 e 200 nucleotídeos e são codificados em regiões intergênicas de genomas de plantas e animais, ou seja, são produtos da transcrição de uma parte do genoma que se julgava sem função e era muitas vezes citada como 'lixo'. Os genes que os miRNAs regulam, porém, são codificados em outras regiões do genoma. Além disso, tem sido observado que vários miRNAs mantiveram-se inalterados em diferentes espécies, o que sugere a conservação, ao longo da evolução, de seu papel na regulação gênica. Em plantas, onde está mais caracterizada a atuação desses fragmentos na regulação de genes associados ao desenvolvimento, constatou-se que qualquer alteração que interrompa a atividade dos miRNAs leva a um desenvolvimento anormal.

**Figura 3. Nematódeos apresentando silenciamento por RNA: consegue-se silenciar facilmente genes desses animais colocando siRNAs em seu alimento ou apenas agitando-os em tubos de ensaio com os siRNAs**

Análises do genoma humano mostraram que o conteúdo de RNAs não codantes (RNAs mensageiros que não são traduzidos em proteína) é muito maior do que os biólogos podiam supor. Experimentos feitos nos Estados Unidos, visando analisar os RNAs transcritos a partir de cromossomos humanos já seqüenciados, mostraram que o número de genes transcritos foi pelo menos 10 vezes maior do que o previsto pela identificação das regiões codantes desses cromossomos.

Outra importante classe de pequenos RNAs é a dos RNAs interferentes – os siRNAs. Eles foram descobertos em plantas que exibiam silenciamento (desativação de genes) por RNA cuja produção foi induzida por transgenes inseridos no vegetal ou por vírus. Caracterização bioquímica mostrou que os siRNAs são RNAs de fita dupla com características específicas em suas extremidades, e estas permitiram identificar que enzima realizou sua clivagem (corte): a enzima RNaseIII – que pode ser a mesma Dicer citada acima (também uma RNaseIII) ou uma variante.

Tanto miRNAs quanto siRNAs silenciam ou calam genes depois que estes foram transcritos, ou seja, após gerarem RNAs mensageiros. Para isso, os pequenos RNAs pareiam-se a RNAs mensageiros que apresentem bases complementares às suas. Os alvos do ‘desligamento’ são reconhecidos e degradados no citoplasma celular tão logo deixam o núcleo. Os siRNAs agem associados a um complexo protéico capaz de clivar ácidos ribonucléicos chamado de RISC (sigla, em inglês, de ‘com-



plexo de silenciamento induzido de RNA’).

Esse mecanismo de silenciamento, identificado pela primeira vez em 1992 em plantas transgênicas, foi denominado silenciamento gênico pós-transcricional (PTGS, na sigla em inglês). Observou-se nessas plantas um desligamento do transgene e do gene endógeno correlato. Dois anos depois, diversos pesquisadores mostraram que a forte resistência a vírus – que muitas vezes chegava à imunidade – em plantas transgênicas

que continham seqüências virais se devia também ao silenciamento de genes, ativado involuntariamente nas linhagens resistentes. A resistência ao vírus funcionava do seguinte modo: a introdução na planta da seqüência viral ativava de modo involuntário o PTGS. Uma vez ativado o silenciamento contra o transgene, qualquer seqüência análoga é também reconhecida como alvo e degradada. Por isso, se um vírus contiver uma seqüência semelhante à do transgene, ela será reconhecida e degradada assim que ele perder seu invólucro (capsídeo) e expor seu genoma, na fase inicial da infecção, e isso gerará forte resistência ou imunidade nessas plantas.

Em 1998, foi demonstrado que um mecanismo parecido ocorria em animais. A introdução em suas células de fitas duplas de RNA homólogos a genes endógenos fazia com que estes fossem desligados. A descoberta ganhou o nome de interferência pelo RNA (RNAi), que passou a ser utilizado para referir-se ao PTGS em animais. Estudos com fungos mostraram a ocorrência de mecanismo análogo com o nome de *quelling* (‘submissão’). Hoje, após se constatar a forte conservação das proteínas associadas ao silenciamento nos três reinos (fungos, plantas e animais), adota-se o nome ‘silenciamento por RNA’ para esse mecanismo comum.

Sabe-se agora que o silenciamento por RNA mediado por siRNAs atua como um ‘sistema imune’ e tem a função de proteger o genoma da ação deletéria de ácidos nucleicos invasores (de vírus, transposons ou transgenes). Há várias evidências

**Figura 4. Cobaia (à esquerda) com o gene do vírus da hepatite C; cobaia (no centro) tratada com siRNA correspondente a esse gene, observando-se nítida redução do efeito desse gene no fígado (áreas em amarelo); e cobaia (à direita) tratada com um siRNA sem nenhuma semelhança com o gene do vírus da hepatite C**

**Figura 5. Esquema do modo de ação dos pequenos RNAs – microRNAs (setas em roxo) e RNAs interferentes (setas em laranja e pontilhada verde) – dentro das células, impedindo a produção de proteínas por RNAs mensageiros ou interferindo na replicação de um vírus invasor**

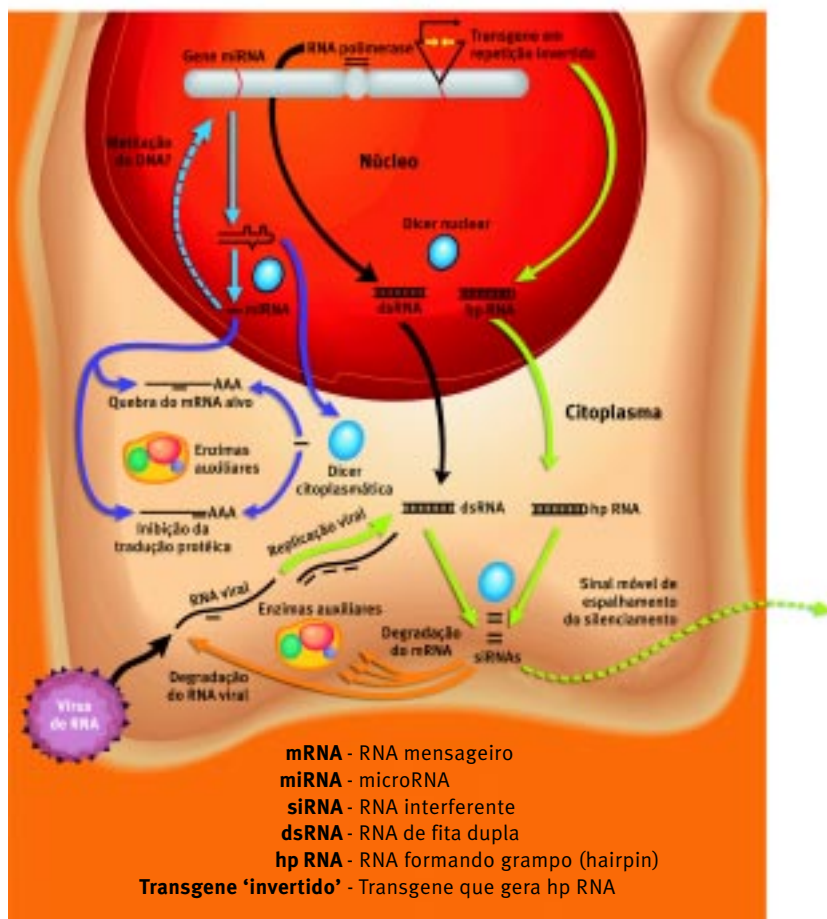
de que também teria a função de estabilizar diferentes estágios da cromatina (o conjunto formado pelo DNA e proteínas associadas).

## Usos do silenciamento por RNA

A capacidade de silenciar uma seqüência de nucleotídeos de forma específica, associada à simplicidade da técnica, torna a interferência por RNA uma ferramenta muito poderosa no importante campo da genética reversa. Nessa área, o objetivo é desvendar a função biológica de um suposto gene a partir de sua seqüência de nucleotídeos. Assim, induzir o silenciamento de seqüências de nucleotídeos capazes de gerar proteínas com função desconhecida permite definir o papel biológico de inúmeras dessas seqüências, geradas pelos projetos genomas. No final de 2002, todo o genoma funcional (a parte do genoma que origina proteínas com função biológica) de um verme, o *Caenorhabditis elegans*, foi desvendada através da produção em laboratório de mutantes silenciados (por RNAi) para cada provável gene. Isso permite de fato compreender o significado do código genético – o seqüenciamento do genoma de nada servirá se a função dos genes não for determinada.

O uso dessa técnica vem produzindo resultados em ritmo cada vez mais rápido. Uma das possibilidades já testadas com sucesso foi o bloqueio da replicação viral pela indução de silenciamento de genes virais em animais. Isso tornou possível eliminar vírus como os da Aids (HIV) e da hepatite em culturas de células humanas e vírus como os da dengue e da febre amarela em mosquitos. Importantes estudos têm sido feitos também no controle de genes e proteínas associados ao câncer e a doenças degenerativas, mas esses trabalhos estão ainda em fase experimental.

Nesses experimentos, pequenos RNAs de dupla fita, sintéticos ou produzidos em plasmídeos, são usados para gerar o silenciamento de genes altamente homólogos a eles. Com isso, tais genes são ‘desligados’ e as proteínas que eles codificariam não são mais produzidas. Entre as vantagens do uso dos chamados vetores de siRNA está o baixo



custo e a enorme economia de tempo para obter mutantes ‘nocauteados’ (com algum gene desativado) em comparação com os métodos de recombinação homóloga usados tradicionalmente. Além disso, a nova técnica permite o estudo de genes letais em organismos mutantes que os contenham (que não sobrevivem se o gene letal não for silenciado) e o estudo das diferentes fases do desenvolvimento de seres vivos (silenciando genes que atuam nessas fases).

O silenciamento por RNA constitui uma importante ferramenta biotecnológica também na agricultura: já foram produzidas plantas de café com baixíssimos teores de cafeína e plantas de algodão com redução no teor de óleos graxos, por exemplo.

Espera-se ainda que o melhor conhecimento desse novo mundo ajude a ciência a compreender fenômenos como apoptose, metástase e diferenciação, já que muitos genes associados a esses processos cruciais da biologia mostram-se dependentes da regulação mediada pelos pequenos RNAs. Portanto, o futuro da investigação desse mundo agora revelado certamente trará respostas há muito esperadas por toda a comunidade científica e terá conseqüências benéficas para a sociedade. ■

### SUGESTÕES PARA LEITURA

- BARTEL, D.P. 'MicroRNA: genomics, biogenesis, mechanism and function', in *Cell*, v. 116, p. 281, 2004.
- MALLORY, A. & VAUCHERET, H. 'MicroRNAs: something important between the genes', in *Current Opinion in Plant Biology*, v. 7, p.120, 2004.
- HANNON, G. 'RNA interference', in *Nature*, v. 418 (11), p. 244, 2002.
- KAWASAKI, H.; WADHWA, R. & TAIRA, K. 'World of small RNAs: ribozymes to siRNA and miRNA', in *Differentiation*, v. 72, p. 58, 2004.

# Passeando pela fronteira

**O estudo da organização e do funcionamento do cérebro, que reúne cientistas de diferentes áreas do conhecimento, vem apresentando avanços surpreendentes nos últimos tempos. Um resultado bastante promissor nesse campo foi a criação, a partir de um novo modelo de registro da atividade elétrica dos neurônios, da primeira interface cérebro-máquina, que utiliza apenas sinais elétricos neurais para controlar movimentos de braços mecânicos. A ampliação do conhecimento sobre a mente pode, em futuro próximo, trazer benefícios para pacientes com distúrbios neurológicos.**

**Miguel A. L. Nicolelis**

Departamento de Neurobiologia,  
Universidade Duke  
(Durham, Carolina do Norte, Estados Unidos)

Uma série de trabalhos realizados na última década demonstra categoricamente que a neurociência, disciplina que estuda os princípios de organização e funcionamento do sistema nervoso, tornou-se uma das mais prósperas áreas de pesquisa multidisciplinar dos nossos tempos. Com avanços significativos em vários campos, o estudo do cérebro tem atraído mais e mais profissionais de outras áreas, como físicos, matemáticos, engenheiros e outros, os quais, junto com biólogos, médicos e demais profissionais envolvidos com pesquisa biomédica, compõem a comunidade atual de neurocientistas.

Esse engajamento multidisciplinar foi uma consequência natural da tomada de consciência, por parte de laboratórios de todo o mundo, de que para entender algo tão complexo como o cérebro não basta uma boa idéia, lápis, papel e uma formação clássica em biologia. Na realidade, cada vez mais neurocientistas se dão conta de que o desafio de desvendar os muitos mistérios ocultos nos vastos circuitos neurais, formados por dezenas de milhões de células, requer criatividade, aliada à aplicação de tecnologias de ponta, que possam gerar e analisar formidáveis quantidades de informação sobre a estrutura e o funcionamento do cérebro. Evidentemente, acima de tudo, é preciso formar uma nova geração de neurocientistas que tenham não só a capacidade de navegar naturalmente por múltiplas áreas do conhecimento, mas também, e principalmente, uma mente aberta e criativa para explorar as inúmeras possibilidades que o futuro trará.

De certa forma, é possível afirmar que a fronteira da pesquisa contemporânea em neurociência demonstra claramente os possíveis benefícios, tanto em nível de conhecimento básico quanto em termos de aplicações clínicas, de um modelo de pesquisa baseado na colaboração de profissionais de múltiplas áreas, munidos de novas técnicas e paradigmas experimentais. A experiência vivida no laboratório da Universidade Duke nos últimos 10 anos ilustra bem essa tendência.

# da **neurociência**

Nesse período, o desenvolvimento de um novo método eletrofisiológico, que permite registrar por meses ou mesmo anos, simultaneamente, a atividade elétrica de centenas de células cerebrais em animais despertos, abriu a possibilidade de criar um novo paradigma experimental, que hoje atrai a atenção não só de neurocientistas, mas também de toda a comunidade clínica envolvida em esforços para reabilitar pacientes que sofrem com severas moléstias neurológicas.

A utilização desse novo método, conhecido como registro de múltiplos eletrodos, combinado com modernas tecnologias de microeletrônica, ciência da computação e robótica, permitiu a criação da primeira interface cérebro-máquina que utiliza sinais elétricos neurais para controlar os movimentos de braços mecânicos. Funcionando na mesma velocidade de processamento dos circuitos motores neurais, essa interface permite que animais (e no futuro pacientes) controlem os movimentos tridimensionais de braços mecânicos diretamente, apenas usando padrões de atividade elétrica neural para solucionar uma série de tarefas motoras.

O princípio de funcionamento dessa interface – também conhecida como neuroprótese – é simples, mas depende de vários estágios. Inicialmente, centenas de filamentos metálicos, cada um mais fino e tão flexível quanto um fio de cabelo, são cirurgicamente implantados em múltiplas áreas do cérebro que fazem parte do circuito neural gerador dos comandos motores utilizados pela medula espinhal para o controle de músculos dos membros superiores de animais de experimentação, como ratos e macacos. Os eletrodos são implantados cuidadosamente, apenas alguns milímetros dentro do cérebro, de tal forma que possam permanecer no mesmo local, sem causar qualquer trauma ou

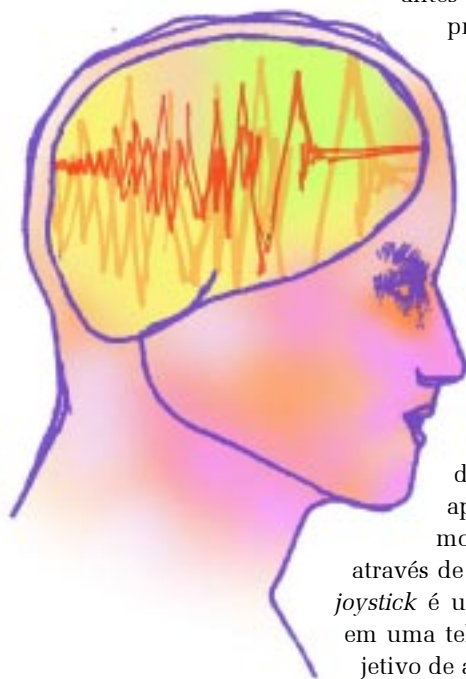
efeito colateral, por vários anos. Descobrimos, ao longo dos últimos 16 anos, que esses implantes crônicos de matrizes de eletrodos podem ser usados para registrar por longos períodos de tempo (meses ou anos) as minúsculas correntes elétricas produzidas por neurônios (as principais células cerebrais) em múltiplas regiões do cérebro de roedores e macacos.

A combinação de sinais elétricos dos milhões de neurônios de cada circuito neural é responsável por todas as funções do sistema nervoso central. Nossos sonhos e planos para o futuro, nossa habilidade de falar, correr, pensar, chorar, amar, todas as funções e comportamentos que definem nossa interação com o ambiente têm como origem as grandes tempestades elétricas que varrem nossos cérebros, continuamente, desde que nascemos e até o final da vida. Portanto, o desenvolvimento de um método que possa registrar a atividade elétrica de centenas ou mesmo milhares de neurônios é de grande relevância para a pesquisa neurofisiológica moderna.

Algumas semanas após a neurocirurgia de implante dos eletrodos, pequenos *microchips* são acoplados aos conectores que mantêm esses filamentos em posição no cérebro. Os *microchips* representam o primeiro nível de amplificação e filtragem das correntes elétricas produzidas pelos neurônios e registradas pelos eletrodos. Em seguida, após passarem por um supercomputador dedicado exclusivamente a isolar as correntes elétricas de centenas de neurônios, é possível vislumbrar, na tela de um monitor, os padrões elétricos gerados em diversas ▶



regiões do cérebro envolvidas na geração de comandos motores (que, nos animais, controlam com grande perícia os movimentos de braços e mãos). Na vida profissional de um neurocientista, poucos eventos são tão emocionantes e tão comoventes quanto passar uma tarde observando as tempestades elétricas que varrem o cérebro de um animal



antes da execução de movimentos precisos e coordenados. Nas tempestades semelhantes que varrem o nosso sistema nervoso está o grande mistério, a resposta para uma das perguntas mais fascinantes da ciência moderna: como o cérebro determina os comportamentos que nos definem como seres humanos.

Uma vez que todos os neurônios ligados a eletrodos tenham sido identificados, os animais começam a aprender uma série de tarefas motoras – no caso de macacos, através de vários *videogames*, onde um *joystick* é usado para mover um cursor em uma tela de computador com o objetivo de alcançar um alvo (uma esfera que surge em locais aleatórios da tela) e segurá-lo (pois a esfera tem um peso virtual). Durante esse ‘aprendizado’ nos *videogames*, as descargas elétricas produzidas por centenas de neurônios dos animais são registradas, amplificadas pelos *microchips* e conduzidas a outro computador, onde um modelo matemático passa a aprender como extrair desses sinais os comandos motores que direcionam a mão do animal ao controlar o *joystick*. Nesse período, esses comandos motores também começam a ser transferidos a um braço robótico, visando reproduzir neste a mesma seqüência de movimentos que ocorre na mão do animal. Nessa fase, vários modelos matemáticos são usados simultaneamente, em tempo real, para extrair informações sobre parâmetros como posição, velocidade e força da mão, entre outros.

Quando o aprendizado, tanto dos animais quanto dos modelos matemáticos, atinge um nível aceitável, o *joystick* usado inicialmente é removido e o controle dos movimentos do cursor na tela, para perseguir e agarrar o alvo, é transferido para o braço robótico da interface cérebro-máquina. Agora, para jogar o *videogame* e ser bem-sucedido, o animal precisa aprender a interagir com a interface cérebro-máquina usando apenas a atividade cerebral e não mais os movimentos da própria mão. De

modo surpreendente, em alguns dias os macacos aprendem a movimentar o braço robótico como se este fosse um de seus braços naturais. Portanto, os animais aprendem a produzir os padrões de atividade neural que permitem aos modelos matemáticos extrair os comandos motores necessários para fazer o braço robótico se mover de forma a dirigir o cursor, na tela, para não só alcançar o alvo, mas também o segurar por algumas centenas de milissegundos. O cursor controlado pelo braço robótico move-se em uma tela colocada na frente do animal, fornecendo um reforço visual importantíssimo para que o animal quantifique os erros cometidos e melhore sua performance. A recompensa por essa façanha toda é um contínuo fluxo do suco de fruta preferido pelo macaco (cada um tem sua preferência, que é religiosamente observada).

Esses estudos revelaram não só que os animais aprendem a utilizar a interface cérebro-máquina, mas também que, com alguma prática, eles são capazes de utilizar o braço robótico sem fazer ao mesmo tempo qualquer outro tipo de movimento corporal. Ou seja, usando informação direta do seu circuito neural motor, os animais conseguem substituir os próprios braços por um robô. Tal resultado é importantíssimo por trazer a esperança de que, em futuro não muito distante, pacientes portadores de graves níveis de paralisia corpórea possam usufruir dessa tecnologia, usando sinais elétricos de partes não comprometidas de seus cérebros para controlar próteses capazes de restaurar parte dos movimentos perdidos. Essa esperança foi reforçada recentemente quando neurocirurgiões do hospital da Universidade Duke comprovaram (por curtos períodos, durante neurocirurgias de implantação de estimuladores profundos para combater sintomas do mal de Parkinson) que essa mesma interface cérebro-máquina é capaz de reproduzir os movimentos das mãos desses pacientes.

A construção, a implementação e o teste dessa interface cérebro-máquina só foram possíveis graças à contínua colaboração de uma equipe de profissionais que inclui jovens neurofisiologistas, engenheiros elétricos, engenheiros mecânicos, etólogos, psicólogos e neurocirurgiões. Esse pequeno exemplo indica que a neurociência terá um futuro esplêndido, recheado de grandes descobertas, surpresas e contribuições que certamente levarão não só a uma compreensão mais precisa dos princípios que regem a mente humana, mas também ao desenvolvimento de novas tecnologias capazes de melhorar a vida de milhões de pessoas acometidas por graves distúrbios neurológicos. Passeando pela fronteira da neurociência hoje, esse é o horizonte otimista e excitante que se vislumbra. ■

#### SUGESTÕES PARA LEITURA

NICOLELIS, M. e CHAPIN, J.K., ‘Controlando robôs com a mente’, *in Scientific American Brasil*, nº 6, novembro/2002.

NICOLELIS, M.A.L., ‘Brain-machine interfaces to restore motor function and probe neural circuits’, *Nature Reviews Neuroscience*, v. 4, p. 417, 2003.

NICOLELIS, M.A.L., ‘Actions from thoughts’, *Nature*, nº 409, p. 403, 2001.

Na Internet: <http://www.nicolelislabs.net/NLNet/Load/index.htm>

# Terapias celulares

## PROMESSAS E REALIDADES



**A esperança de cura para distúrbios e doenças vem atraindo a atenção da mídia e da população para as chamadas células-tronco, apesar das controvérsias sobre sua obtenção em embriões ou através da clonagem. Capazes de se diferenciar em todos os tipos de célula de um organismo, elas poderiam, em tese, ser utilizadas para regenerar qualquer tecido lesionado ou degenerado. Cientistas e médicos, porém, precisam resistir às tentações que o tema oferece, levando em conta que a adoção, na prática médica, das terapias celulares dependerá de maior conhecimento das complexas interações entre as células e os tecidos, do tipo de lesão ou processo patológico envolvido e da análise criteriosa de cada paciente com essa indicação.**

### **Radovan Borojevic**

Instituto de Ciências Biomédicas,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
e Programa Avançado de Biologia Celular  
Aplicada à Medicina,  
Hospital Universitário Clementino Fraga Filho, UFRJ

**No objetivo e desejo de diminuir o sofrimento** e, quando possível, afastar a morte, a medicina descobre novas propostas de procedimentos terapêuticos em momentos inovadores da evolução das ciências. Quanta esperança para os que necessitam curar a doença, diminuir a dor, voltar a uma vida normal! Quanta esperança para os que desejam ultrapassar os limites do tempo, do envelhecimento e da perda de qualidade da vida, da morte física inexorável! As terapias celulares estão na moda. Elas prometem, pelo menos parcialmente, propor soluções para esses desafios.

A medicina regenerativa propõe o reparo e/ou substituição de tecidos que sofreram lesão ou degeneração. A engenharia médica trabalha há décadas na construção de substitutos artificiais de tecidos perdidos, como válvulas cardíacas mecânicas, próteses ortopédicas construídas de metal, cerâmica e plástico, ou dentes de porcelana. A bioengenharia procura associar biomateriais com células, mobilizadas do tecido adjacente para o implante ou introduzidas com este, buscando a integração permanente da nova estrutura ao tecido restaurado. O recente conceito do uso terapêutico de células-tronco, derivadas de embriões humanos ou residentes no próprio organismo do paciente, traz uma nova perspectiva: tais células, quase onipotentes, permitiriam, potencialmente, recriar tecidos e repetir a sua geração, o que normalmente só ocorre durante a embriogênese. Propõe-se, assim, utilizá-las para regenerar ou rejuvenescer uma parte ou o conjunto do nosso efêmero corpo.

Quanta tentação! O mito de Ícaro, que se perdeu ao tentar alcançar o Sol, nos ensina a prudência. A tentação é ainda mais intensa diante de um paciente e dos familiares que compartilham seu sofrimento, induzida pelo desejo de aliviar imediatamente a dor. Induzida ainda pela pressão das instituições acadêmicas ou hospitalares, que vislumbram uma projeção (e um lucro) além dos limites atuais, e pela chance de aten-



der a máquina de produtos e serviços associada à medicina. E também – por que não ser sincero? – pela perspectiva de alcançar a glória da mídia, as páginas das revistas científicas e o amplo reconhecimento do valor pessoal para os médicos e cientistas envolvidos.

Não é difícil achar as referências para controlar os excessos, sem perder a coragem de avançar. A ética médica e científica tradicional, formulada ainda nos tempos de Hipócrates (460?-370 a.C.), continua sendo a referência universal que pode nos guiar.

## A ciência

O conhecimento e a compreensão das bases científicas dos procedimentos é obviamente indispensável para evitar o charlatanismo médico. Nas últimas décadas, avanços de métodos analíticos bioquímicos e moleculares permitiram gerar uma base de conhecimento dos componentes que sustentam a vida. O genoma humano foi dimensionado e amplamente seqüenciado. Os genes ligados ao desenvolvimento de uma série de doenças são conhecidos. Estudos de genoma, transcriptoma e proteoma humanos estão avançando rapidamente, graças ao avanço dos métodos capazes de caracterizar simultaneamente milhares de moléculas do organismo.

A imensa soma desses conhecimentos nos impõe uma tarefa hercúlea: integrar os dados analíticos em um conjunto operacional, abrangendo os sistemas extremamente complexos de células, tecidos e órgãos. A interatividade de moléculas, células e tecidos gera uma infinidade de parâmetros variáveis, que devem ser integrados. Compreender a diferenciação celular, a sua plasticidade e a potencial incorporação (em estruturas teciduais normais) de células exógenas introduzidas em terapias celulares exige uma abordagem sintética de dados moleculares ou ultra-estruturais.

Desde os trabalhos do patologista alemão Rudolf Virchow (1821-1902) e de seus seguidores, aprendemos a compreender os processos patológicos em termos celulares, integrando-os na alteração global da função tecidual. Virchow definiu claramente a característica *functio laesa* (perda de função) que acompanha a lesão tecidual em um processo inflamatório. Trata-se da resposta global a uma injúria celular e tecidual, integrando a lesão de suas unidades, as células, com a função dos tecidos. Ela só pode ser entendida se as informações analíticas forem incorporadas em um conceito global de 'unidades interativas'. Tais unidades (moléculas, células) devem ser estudadas no contexto do seu ambiente, o qual só pode ser compreendido em ter-

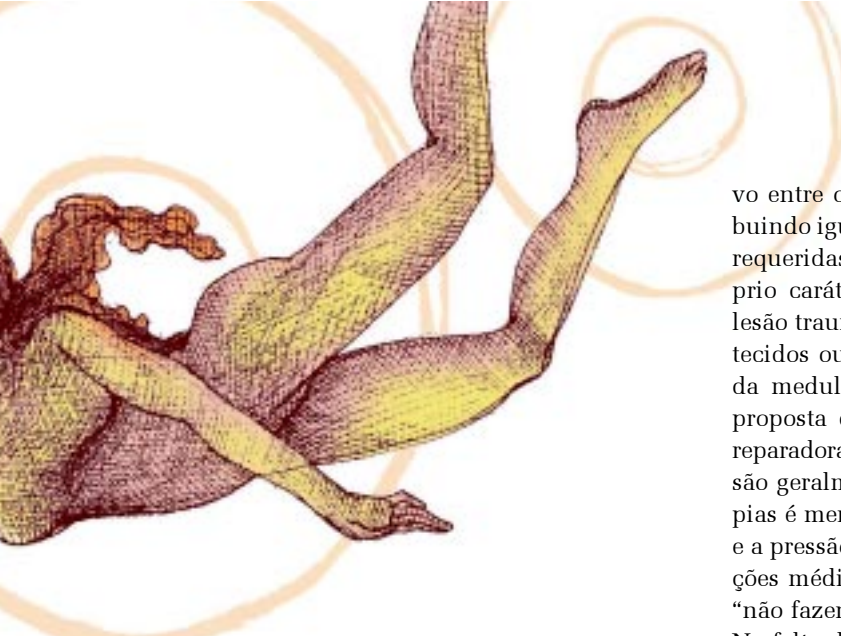
mos estruturais. Portanto, o foco de estudos relevantes para a medicina regenerativa está situado na compreensão de estruturas complexas.

Podemos salientar, como exemplo, que o conceito de célula-tronco só é operacional dentro do contexto de tecido. As mesmas células terão comportamento e capacidade de diferenciação distintos em leitos teciduais diversos. As células-tronco da medula óssea (hoje a principal fonte dessas células para terapias) podem ser úteis para gerar novos vasos sanguíneos no tratamento de patologias decorrentes de isquemias, onde a capacidade de regeneração vascular ou tecidual é insuficiente. Mas as mesmas células podem ser indesejáveis na terapia da cirrose hepática, causada pela regeneração excessiva e desorganizada do parênquima hepático e não pela falta desta.

A capacidade das células-tronco de regenerar *in situ* estruturas teciduais complexas e funcionais é crítica para seu uso em terapia regenerativa. O experimento – em laboratório – de indução da expressão da proteína marcadora de um tecido diferenciado (que, em tese, revela a possibilidade de gerar exclusivamente células de um determinado tipo) é útil, mas não conclusivo (ou seja, serve como um marcador do 'caminho' para essa geração, mas não é uma prova de que o caminho esteja certo). Já a demonstração da capacidade dessas células de gerar ou participar na geração de um tecido funcional é uma informação conclusiva. Estudos em laboratório caminham hoje para modelos tridimensionais, onde a interação entre as células e entre estas e a matriz tecidual podem ser estudadas. Ainda mais porque algumas terapias regenerativas visam construir, em laboratório, verdadeiros tecidos a serem implantados já prontos em áreas de lesão.

Ao mesmo tempo, as ciências morfológicas tradicionais – anatomia, histologia e anatomia patológica – passam por uma renovação. De ciências tradicionalmente descritivas, que analisavam es-





truturas normais ou patológicas de biópsias ou autópsias, elas se tornaram operantes, propondo soluções estruturais para as patologias estudadas. Relegadas a segundo plano pelos cientistas e por instituições acadêmicas e financiadoras de pesquisas científicas, elas não mantiveram sempre um ritmo de formação de recursos humanos comparável com o das ciências moleculares. Não é surpreendente que a manutenção, notadamente na Itália, na Alemanha e na França, da tradição de estudos que visam compreender a função tecidual global garante hoje a posição de vanguarda desses países em terapias celulares. A renovação da ciência da estrutura, forma e desenvolvimento do organismo (a morfogênese), integrada com a compreensão das funções teciduais, será fundamental para o avanço de um país em terapias celulares.

## Diálogo ciência-medicina

O padrão-ouro de qualquer proposta de terapia celular é a demonstração da sua funcionalidade *in vivo*. Quando possíveis experimentos em animais de maior porte, com tecidos e órgãos de geometria e estrutura similares às de tecidos e órgãos humanos, poderão fornecer informações que validem uma terapia regenerativa. Mas sempre haverá uma decisão final sobre o momento apropriado de aplicar a terapia ao homem. Medicina regenerativa é individual: a decisão de indicação para essa terapia depende de uma avaliação criteriosa do estado de cada paciente. Quando o potencial benefício compensa amplamente o risco, no quadro clínico do paciente, e quando não existem outros tratamentos, o uso de terapias celulares regenerativas poderá ser indicado.

Essa decisão dependerá de um diálogo exausti-

vo entre os cientistas e médicos, cada um contribuindo igualmente para o conjunto de informações requeridas. Um dos problemas frequentes é o próprio caráter das doenças a serem tratadas. Uma lesão traumática que envolve a perda definitiva de tecidos ou órgãos, ou impede sua função (a lesão da medula espinhal, por exemplo), suscita uma proposta de bioengenharia ou de terapia celular reparadora. Por outro lado, as doenças degenerativas são geralmente progressivas, e a maioria das terapias é meramente paliativa. A falta de alternativas e a pressão do paciente, de familiares e de instituições médicas podem induzir o raciocínio de que, “não fazendo mal, qualquer tentativa se justifica”. Na falta de bases científicas sólidas e da comprovação da exequibilidade, viabilidade e utilidade da proposta, a razão deve vir antes das considerações emocionais e do desejo justificável de tentar ajudar a qualquer custo. Essa decisão nem sempre é fácil, para o cientista ou para o médico.

## Diálogo ciência-medicina-mídia

A medicina regenerativa e as células-tronco, incluindo a questão de células embrionárias e de clonagem (terapêutica ou reprodutiva), mereceram uma atenção particular da mídia. Sua relação com a violência da vida moderna é uma das razões. E sua relação com as preocupações humanas mais fundamentais, como a doença grave, a perda de qualidade de vida, o envelhecimento e a morte, é outra. Qual entre nós não se preocupa com pelo menos uma dessas questões?

A exposição pública pode ser desejável, já que a mobilização da opinião é capaz de influir nas prioridades de geração de conhecimento, formação de recursos humanos, transferência de conhecimentos científicos para aplicação médica e melhora da qualidade de vida da população. Pode também ser perigosa, por gerar esperança exacerbada e injustificada, criando expectativas desproporcionais e mobilizando a sociedade a trilhar caminhos nem sempre justos ou seguir propostas nem sempre honestas. Enquanto o uso de células-tronco do próprio paciente não gera objeções, o uso de células embrionárias pode gerar, e deve ser delimitado. Do mesmo modo, deve ser delimitado o fluxo da informação, não para obstruí-lo, mas para assegurar sua qualidade, gerando a esperança quando justificada e criando as novas oportunidades de aliviar a dor e afastar a morte somente quando realmente factível. ■

### SUGESTÕES PARA LEITURA

CARVALHO, A.C.C.  
‘Células-tronco: a medicina do futuro’, in *Ciência Hoje*, v. 29, nº 172, 2001.  
MIR, L. (Org.)  
*Genômica*,  
Atheneu, São Paulo/Rio de Janeiro, 2004.

# As mudanças climáticas

**Entre as questões que concentram o interesse da ciência, na atualidade, merecem destaque as mudanças do clima causadas pela emissão excessiva de gases e partículas poluentes por atividades humanas.**

**Um aspecto relevante desses estudos é a influência da floresta amazônica (e dos desmatamentos e queimadas) em processos climáticos, como a absorção ou liberação de carbono na atmosfera e os mecanismos de formação de chuvas. Compreender a fundo tais processos é imprescindível para a adoção de medidas que reduzam ou previnam seus efeitos e, no caso do Brasil, para a definição de políticas mais adequadas de aproveitamento dos recursos naturais amazônicos.**



**A humanidade vai ter que lidar**, neste século, com uma séria questão ambiental, causada pela capacidade humana de alterar a composição atmosférica global, adquirida a partir da Revolução Industrial. As alterações climáticas globais decorrentes das emissões de gases que aumentam o chamado 'efeito estufa' representam uma questão científica das mais complexas e importantes da atualidade. Tais alterações podem ter importantes impactos socioeconômicos para toda a humanidade ao longo deste século.

O clima terrestre é fruto de um intrincado sistema dinâmico, altamente complexo e não-linear, e cujos processos, mecanismos e interações a ciência ainda desconhece. A influência mútua entre a física do clima, a química atmosférica, as emissões oriundas de atividades humanas e os processos biológicos marinhos e terrestres determinam a composição da atmosfera. A concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que antes de 1850 era de 280 partes por milhão (ppm), atinge hoje 370 ppm, e pode subir para mil ppm no final deste século. Com isso, o balanço de radiação terrestre vem sendo alterado, resultando no aumento global da temperatura, na elevação do nível dos oceanos e na alteração no ciclo hidrológico que regula o regime de chuvas.

Uma abordagem científica envolvendo os aspectos biológicos, físicos, químicos e socioeconômicos é necessária, e para isso modelos integrados do 'sistema terrestre' estão sendo elaborados, embora a ciência conheça uma fração pequena dos processos envolvidos. A complexidade desse sistema, onde o homem joga um dos principais papéis, é enorme, e uma força-tarefa científica global será necessária para que a humanidade possa desenhar estratégias de mitigação dos efeitos e minimizar os danos socioeconômicos das alterações climáticas globais.

**Paulo Artaxo**

Instituto de Física,  
Universidade de São Paulo

# globais e a **Amazônia**

Entre os processos críticos que devem ser estudados na questão das mudanças climáticas globais está o papel dos aerossóis (microscópicas partículas de diferentes substâncias em suspensão na atmosfera) na absorção e no espalhamento da radiação solar, e ainda na nucleação de nuvens e formação das chuvas. Outra tarefa importante diz respeito ao monitoramento ambiental dos parâmetros críticos dessas alterações globais, usando-se instrumentos em solo e em satélites para obter um diagnóstico preciso da saúde de nosso planeta. Modelos que representem em escala global as propriedades físico-químicas dos diferentes componentes da atmosfera (gases, partículas e nuvens), como os obtidos através de estudos de transferência radiativa, e permitam compreender

seus efeitos sobre as radiações solar e térmica, ainda estão em fase de infância.

Com ou sem a implantação do protocolo de Kyoto (acordo internacional que tenta limitar as emissões de gases causadores do efeito estufa), as mudanças globais vieram para ficar. E nosso planeta, com uma população de sete a oito bilhões de habitantes, pode não ter como garantir as necessidades básicas de seus habitantes até o final deste século. O sistema terrestre sentirá um estresse importante em áreas críticas. Cabe à ciência realizar um esforço concentrado nas próximas décadas para conhecer melhor esse sistema e ajudar a minimizar os impactos socioeconômicos, que parecem cada vez mais próximos.

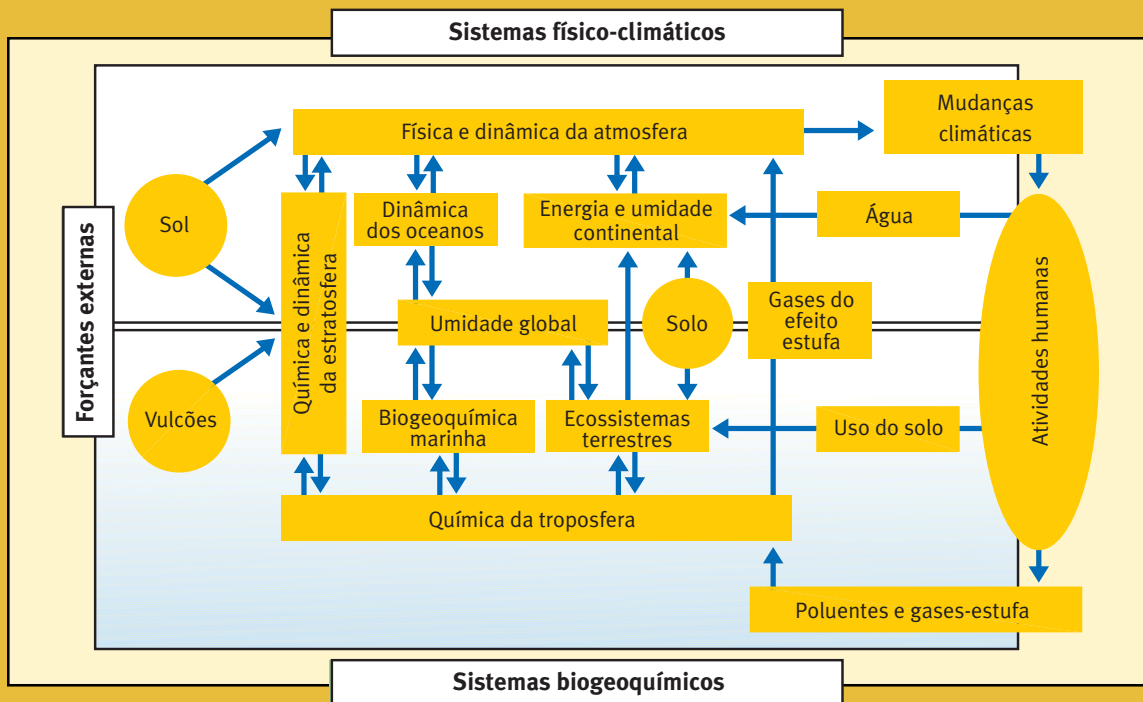


Diagrama do sistema terrestre e das interações entre os vários componentes que afetam as mudanças globais



### Quadro conceitual do mecanismo de interação climática entre a floresta e a atmosfera amazônica

alteram drasticamente essa estrutura, provocando forte supressão da formação de nuvens e da precipitação, fenômeno que pode estar afetando o balanço hídrico em vastas áreas amazônicas e mesmo no sul do país durante a estação de queimadas (agosto a outubro).

Da mesma forma, as alterações no balanço de radiação causadas pelas partículas de aerossóis emitidos em queimadas são profundas: tais partículas absorvem até 60% da radiação solar incidente em algumas áreas. Essa forte redução da radiação disponível para fotossíntese afeta

a produtividade primária da floresta de maneira ainda desconhecida. As altas taxas de concentração de ozônio (de até 100 partes por bilhão) obtidas em medições em Rondônia são comparáveis às de áreas urbanas como São Paulo, e esse ozônio é tóxico para os vegetais, danificando a floresta não queimada.

A dimensão dos danos ambientais decorrentes dessas alterações atmosféricas ainda está para ser avaliada para a bacia amazônica como um todo. Além disso, há a questão do uso do solo. O desenvolvimento de modelos que integrem as mudanças verificadas no uso do solo na região e os efeitos de outros fatores ambientais no clima amazônico é estratégico para o país, e uma grande quantidade de pesquisadores brasileiros estuda hoje processos e mecanismos essenciais para o entendimento do significado do chamado 'desenvolvimento sustentável' na Amazônia.

As estratégias de desenvolvimento sustentável para a região amazônica ainda estão por ser formuladas – e essa é uma questão crítica para o país. O pior uso que o país poderia fazer dos enormes recursos naturais da Amazônia seria queimá-los, o que apenas aumentaria o efeito estufa global, sem trazer benefícios significativos para a população local ou para o país como um todo. O estabelecimento de políticas públicas voltadas para a preservação da floresta amazônica é imprescindível para o Brasil, e a ciência é um poderoso auxiliar nesse processo. ■

## Mudanças globais na Amazônia

Em relação à Amazônia, as questões científicas mais importantes versam sobre o balanço de carbono da floresta, os mecanismos de formação de nuvens e da precipitação e as implicações de mudanças no uso do solo. O desflorestamento e as queimadas emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa para a atmosfera. Ao mesmo tempo, há indícios de que a floresta esteja seqüestrando quantidades pequenas de CO<sub>2</sub> da atmosfera e fixando esse carbono em sua biomassa. Esse balanço de carbono deve ser distinto em áreas com diferentes quantidades de nutrientes, taxas de precipitação e radiação solar. Assim, precisam ser construídos modelos de balanço de carbono válidos para a bacia amazônica como um todo.

O complexo papel que as partículas emitidas naturalmente pela floresta têm sobre o clima também é muito relevante, e resultados recentes indicam uma espécie de simbiose entre as emissões de compostos orgânicos pela floresta e os mecanismos de formação de nuvens e precipitação na Amazônia. Comparando com o observado em outras áreas continentais do planeta, a estrutura de nuvens na Amazônia é muito particular, com um sistema eficiente de aproveitamento regional do vapor d'água emitido. As emissões de queimadas, na região,

### SUGESTÕES PARA LEITURA

TRIGUEIRO, A. *Meio ambiente no século 21 – 21 especialistas falam da questão ambiental nas suas áreas de conhecimento*, Editora Sextante, Rio de Janeiro, 2003.

FIORAVANTI, C. 'Os senhores da chuva', in *Pesquisa Fapesp*, nº 97, p. 39, 2004.

FEARNSIDE, P. A. *A floresta amazônica nas mudanças globais*, Setor de editoração do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 2003.

Na internet:  
Homepage do Experimento de Grande Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia (LBA): <http://lba.cptec.inpe.br/lba/index.html>

# Nanotecnologia

## MANIPULANDO A MATÉRIA NA ESCALA ATÔMICA



**Nanotecnologia virou uma expressão da moda. Cada vez mais gente fala nela, mas poucos sabem exatamente do que se trata. Para os pesquisadores, nanotecnologia é algo que eles já vêm fazendo há muito tempo e que, repentinamente, ganhou um nome novo e muita visibilidade. Para empresários e investidores, é um tema muito novo a ser examinado com cautela, pelas oportunidades e ameaças que representa para praticamente todos os setores da indústria contemporânea. Para ambientalistas e filósofos – ironias à parte, já se fala em uma nanoética –, nanotecnologia pode representar uma ameaça de extinção da espécie humana, opinião que será reforçada, junto ao público geral, pelo romance-catástrofe pseudocientífico *Presa* (Prey, em inglês), de Michael Crichton – em breve, nas telas de um cinema perto de você. Mas, afinal, o que é nanotecnologia?**

**Cylon Gonçalves da Silva\***

Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento, Ministério da Ciência e Tecnologia

\* Professor emérito da Universidade Estadual de Campinas e ex-diretor do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP)

**A resposta mais simples para a pergunta** que finaliza a abertura deste artigo é que nanotecnologia é, frequentemente, aquilo que quem a enuncia deseja que ela represente, como as palavras no romance *Alice no país das maravilhas*, de Lewis Carroll – pseudônimo do matemático inglês Charles Dodgson (1832-1898). No caso deste artigo, nanotecnologia significa integrar as propriedades estruturais e funcionais dos materiais, desde a escala de tamanho de átomos e moléculas até a escala humana, a fim de obter produtos e processos úteis para nós.

A escala de tamanho de átomos e moléculas mede-se em bilionésimos de metro, ou nanômetros (*nanos*, do grego, que significa ‘anão’). O antropocentrismo explicitado na expressão ‘escala humana’ em nossa definição de nanotecnologia não visa complicar uma questão que já é complexa. Indica apenas que a tecnologia se destina ao uso de seres humanos e, portanto, que nossa escala de tamanho – ou próxima a ela – é importante para o resultado final de qualquer tecnologia.

Não é fácil ter uma concepção intuitiva de um bilionésimo de metro. E, mesmo que a tivéssemos, nos depararíamos com outro problema: as leis da natureza que governam o comportamento dos ob- ▶



**Figura 1. Vista aérea do campus do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron ([www.lnls.br](http://www.lnls.br)), em Campinas (SP), um dos principais centros de pesquisa em nanotecnologia no Brasil**

LNLS

biliza para a comunidade científica uma das principais infraestruturas para pesquisa nessa área (figura 1).

## Nanofebre

Mas tudo isso já é relativamente bem conhecido. O que talvez

seja menos conhecido é quão interessante nanotecnologia é sob, ao menos, três aspectos distintos: a) pesquisa, desenvolvimento e comercialização; b) visão cultural; c) políticas nacionais.

Quanto à pesquisa, ao desenvolvimento e à comercialização, não é preciso dizer muito. Esse é o aspecto mais familiar da nanotecnologia e aquele que a coloca mais em evidência. As promessas de uma cornucópia de inovações baseadas na exploração de propriedades estruturais e funcionais de materiais e dispositivos estruturados a partir de átomos e moléculas constituem a principal justificativa para os maciços investimentos que vêm sendo feitos por governos e empresas dos países desenvolvidos. Em números redondos, os governos dos Estados Unidos e do Japão, bem como a Comunidade Européia, investirão cerca de US\$ 1 bilhão cada em pesquisa e desenvolvimento em nanotecnologia neste ano. Esse número impressionante não inclui os investimentos privados.

Até o final de 2003, uma estimativa da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos indicava que o mundo já contabilizava cerca de US\$ 10 bilhões de investimentos públicos em nanociência e nanotecnologia desde 1997, ainda que o início oficial da 'nanofebre' seja o ano de 2000, quando o então presidente norte-americano, Bill Clinton, anunciou a Iniciativa Nacional de Nanotecnologia.

## Cinco áreas

Obviamente, quando se investe tanto dinheiro em pesquisa, alguns resultados ao menos são espera-

jetos nessas escalas de comprimento são diferentes daquelas com as quais nos acostumamos neste mundo gigante, onde passamos nossas vidas. Portanto, vamos deixar, para nossos fins imediatos, o nanometro como uma simples unidade de medida e passar a outros problemas.

## De baixo para cima e vice-versa

Existe nanotecnologia? Tal qual definida acima, exceto pelo seu aspecto antropocêntrico, o exemplo mais marcante de nanotecnologia são os próprios organismos vivos. Eles se estruturam a partir da escala do DNA (átomos e moléculas) até produzir civilizações inteiras. Eles são o paradigma da nanotecnologia praticada 'de baixo para cima'.

Existem outros tipos de nanotecnologias praticadas 'de cima para baixo', como, por exemplo, um microprocessador de última geração, cujo desempenho depende da capacidade tecnológica de organizar a matéria na escala nanométrica. É verdade que ainda não chegamos nos microprocessadores atuais à escala de manipulação de átomos e moléculas, nem está claro como e quando chegaremos lá, mas estamos perto, pois as dimensões críticas de seus transistores já estão abaixo de 100 nanômetros.

No Brasil, há muitos centros de pesquisa fazendo pesquisa em nanotecnologia. Em Campinas (SP), o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), do Ministério da Ciência e Tecnologia, disponi-

dos como retorno pela sociedade. Esses resultados estão começando a aparecer agora sob a forma de produtos no mercado, que vão desde meias 'antiodor' até sofisticados detectores de DNA que permitem identificar se a carne de seu hambúrguer favorito é de lebre ou de gato. As meias antiodor empregam nanopartículas de prata para catalisar a decomposição de componentes químicos 'odoríficos' em produtos menos ofensivos a nosso olfato. Já os detectores de DNA empregam uma combinação de nanopartículas semicondutoras emisoras de luz e a capacidade de reconhecimento molecular para identificar seqüências específicas de cadeias de DNA e seus complementos.

Na área biomédica, a combinação bio e nano promete ser explosiva em termos de avanços tecnológicos. Um estudo prospectivo recente de um grupo da Universidade de Toronto (Canadá) identificou como as cinco mais promissoras áreas de aplicação da nanotecnologia para países em desenvolvimento:

- armazenamento, produção e conversão de energia;
- aumento da produtividade da agricultura;
- tratamento de água;
- diagnóstico e prevenção de doenças;
- sistemas de direcionamento de medicamentos.

Vemos assim que, entre essas cinco áreas, ao menos quatro têm tudo a ver com qualidade de vida. E elas vão requerer, em maior ou menor grau, a conjunção de técnicas de biotecnologia com as de engenharia de materiais em escala atômica. Assim, não é apenas em produtos e processos voltados para o mercado de massa que a nanotecnologia pode produzir resultados práticos, mas, também, para a solução de graves problemas de saneamento e saúde pública.

Para se fazer nanotecnologia, é necessário dispor de instrumentos que nos permitam ver e manipular átomos. Um desses instrumentos é o microscópio eletrônico de alta resolução. Na figura 2, mostramos como os átomos aparecem quando vistos por esse tipo de instrumento.

## Revoluções conceituais

Nanotecnologia, entretanto, não é apenas uma revolução potencial na forma como se produzem materiais e se projetam processos industriais, explorando a crescente capacidade de ver e manipular átomos e moléculas. Nanotecnologia tem, igualmente, uma dimensão cultural fascinante, como nos referimos no item *b* dos três aspectos distintos.

O paleontólogo norte-americano Stephen Jay Gould (1941-2002) costumava enumerar três grandes revoluções conceituais que mudaram a maneira de a humanidade – ou, de uma fração da humanidade – perceber o universo e o lugar da espécie dentro dele.

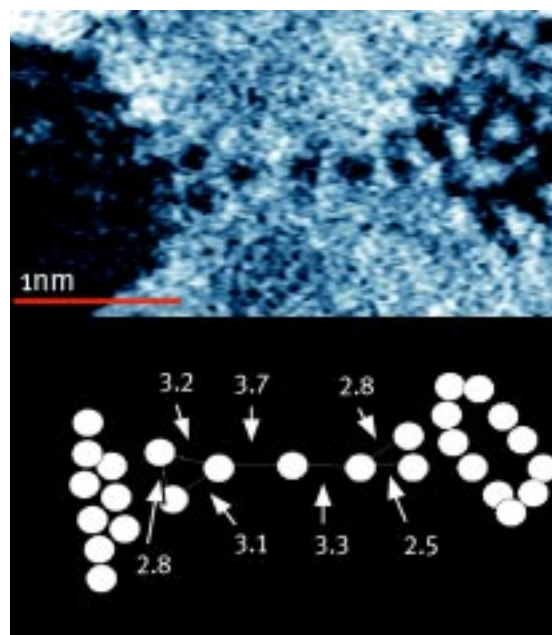
a) a revolução copernicana (1543), que removeu a Terra do centro do que se supunha ser o universo;

b) a revolução darwiniana, que colocou em xeque a noção de criação bíblica e mostrou uma evolução das espécies por descendência;

c) a revolução freudiana, que mostrou que os seres humanos são movidos por instintos, espertamente acobertados por um fino verniz de 'razão'.

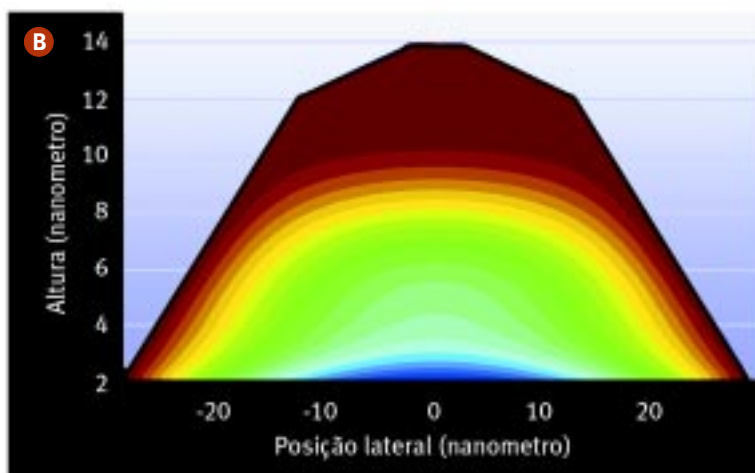
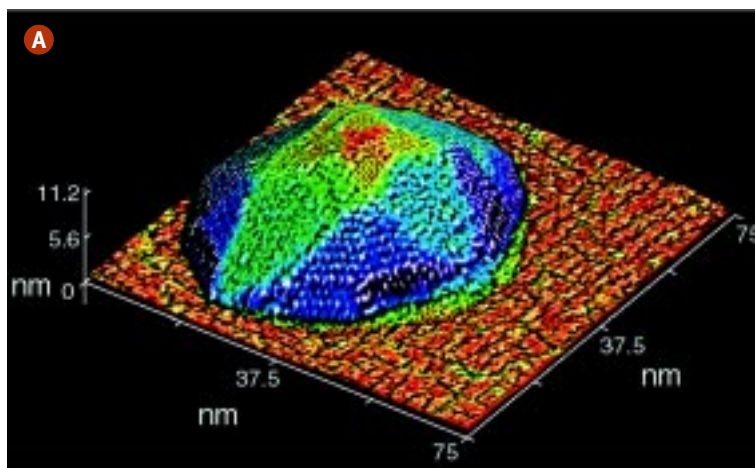
É fascinante especular sobre o impacto que a nanotecnologia poderá vir a ter sobre a visão que a sociedade do futuro terá de nosso lugar no universo. A noção de que tudo é feito de átomos viria a completar o ciclo de redução do ego da espécie? Poderia a nanotecnologia ser a quarta revolução conceitual, no paradigma de Gould, a revelação de que tudo, de um grão de areia a um ser humano, é feito da mesma matéria-prima?

No fundo, o que essa revolução traz é uma mensagem que pode ser resumida pela expressão 'o espírito se faz matéria'. A nossa civilização está pronta para aceitar e incorporar em suas normas e seus padrões de conduta essa conclusão tão radical? ▶



**Figura 2. Fotografia em resolução atômica de uma cadeia de átomos de ouro. O diagrama indica as distâncias interatômicas em nanômetros**





**Figura 3. Em A, imagem de domo de germânio sobre uma superfície de silício, obtida por microscópio de força atômica.**

**Em B, composição atômica desses domos determinada, no LNLS, por difração de raios X de incidência rasante. A cor vermelha representa o germânio puro; o azul, o silício puro**

GILBERTO MEBEROS-ABRERO (LNLS) / ROGERIO PANIAGO (UNMG)

lítica de governo no Brasil. Nanotecnologia aparece, entre as prioridades da PITCE, como uma área 'portadora de futuro', isto é, como uma tecnologia emergente que irá ter impacto sobre a produção industrial do país. Essa decisão se dá na sequência de investimentos já realizados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), desde 2001, em redes de pesquisa em nanotecnologia, as quais incluem vários Institutos do Milênio (institutos virtuais de pesquisa cooperativa, envolvendo universidades, centros de pesquisa e empresas).

O MCT é, igualmente, responsável pelo LNLS, que abriga o mais completo conjunto de instrumentos de pesquisa para nanotecnologia no Brasil. Várias

FAPs (Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa) estão apoiando a pesquisa em nanotecnologia e organizando suas redes locais, com focos muito variados, desde a pesquisa básica até a busca da inovação nanotecnológica em empresas.

Com a PITCE, esses investimentos do MCT e dos estados, realizados e previstos, que hoje já somam várias centenas de milhões de reais – apenas no LNLS, cerca de US\$ 100 milhões – deverão ser incrementados, inclusive com a criação de um novo laboratório nacional voltado para as micro e nanotecnologias.

A política a ser seguida nos próximos anos é clara e pode ser resumida assim: durante a segunda metade do século passado, o Brasil construiu um sistema de pesquisa e ensino superior capaz de transformar investimentos públicos em conhecimento competitivo em nível internacional. O desafio que se coloca para os próximos 50 anos é

## Políticas nacionais

Finalmente, discutiremos brevemente o impacto da nanotecnologia sobre políticas nacionais. Já mencionamos aqui as questões de energia, saneamento e saúde (vegetal, animal e humana) que, claramente, terão um reflexo sobre as políticas públicas nacionais. Do lado da educação, por sua vez, temos o imenso desafio de modernizar nossos currículos, da escola primária à pós-graduação, para incorporar, o quanto antes, os avanços de uma ciência e tecnologia crescentemente multi, inter e transdisciplinares.

O lançamento recente da Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior (PITCE) foi a primeira sinalização de que a nanotecnologia deixou de ser o domínio exclusivo da ciência e tecnologia e passou a ser considerada uma questão po-

o de aprender a transformar conhecimento em riqueza nacional. Isto é, o de construir o círculo virtuoso da ciência e tecnologia na sociedade moderna, que é a sistemática geração de conhecimento levando à criação de riqueza, a qual financia a produção de mais conhecimento, para criar mais riqueza para a nação.

Em nanotecnologia ainda estamos nos primeiros estágios desse processo. É muito promissor, entretanto, que tenhamos, por um lado, uma boa infra-estrutura para pesquisa e, por outro, várias empresas interessadas em inovações baseadas em nanotecnologia. São empresas do setor de fármacos, da indústria química, do setor de materiais, bem como empresas nascentes nesses e em outros setores, em várias regiões do país.

Semicondutores também estão entre os setores prioritários da PITCE. No Brasil, já se fazem pesquisas com semicondutores estruturados em escala nanométrica, como mostram as figuras 3 e 4. O grande desafio é o de começar a empregar esses materiais para a construção de dispositivos nanoeletrônicos.

## Outro elemento

Mas há outro elemento a ser considerado: aplicações militares da nanotecnologia. Os exemplos são vários. Desde a possibilidade de interfaces homem/máquina altamente sofisticadas até novos materiais inteligentes para o uniforme e a proteção pessoal do soldado, mas com evidentes aplicações civis, por exemplo, no monitoramento remoto de pacientes crônicos ou idosos.

Por outro lado, o espectro do desenvolvimento de novas armas de destruição em massa, de controle de multidões ou de imobilização individual está sempre presente quanto se trata de novas tecnologias tão poderosas. Com o aumento das ameaças terroristas, crescem também as 'contramedidas' tecnológicas cada vez mais avançadas que poderão ser incorporadas ao arsenal dos Estados dominantes e virem a ser empregadas contra terceiros países que 'não se comportem bem' na visão dessas potências.

É sempre mais atraente desenvolver novas tecnologias contra o inimigo do que resolver os



**Figura 4.** Em A, nanofios de fosfeto de índio (material semiconductor) crescidos pelo método vapor-líquido-sólido. Em B, fotografia em resolução atômica do nanofio. Observar a escala de comprimento de cinco nanômetros (barra inferior esquerda) e a grande ordem cristalina dos átomos no nanofio

conflitos pela eliminação de suas raízes sociais, políticas e econômicas. O mundo sempre foi muito perigoso, e tudo indica que corre o risco de ficar ainda um pouco mais perigoso neste século. É preciso, portanto, prestar atenção nesses de-

envolvimentos, na medida em que possam tornar mais vulneráveis a capacidade de defesa, já bastante reduzida, de países em desenvolvimento. Uma discussão internacional sobre o controle dessas novas potencialidades é algo que precisa ser considerado seriamente.

## Belo e tentador cardápio

Assim, nanotecnologia é um conjunto de possibilidades que se abrem para a evolução – ou retrocesso, depende de seu ponto de vista – de nossa civilização. O aumento de nossa capacidade de ver e manipular a matéria em sua escala atômica está levando à convergência de disciplinas antes vistas como inteiramente distintas, como engenharia de materiais e biologia.

Mencionamos ainda o crescente papel das técnicas de modelagem e simulação possibilitadas por computadores cada vez mais poderosos, que nos permitem 'experimentar' teoricamente antes de manipular realmente os materiais, algo que também faz parte da convergência: inorgânico, orgânico, digital.

Em resumo, para qualquer jovem que hoje contempla uma carreira científica ou tecnológica, a nanotecnologia oferece um belo e tentador cardápio de opções: da pesquisa à inovação; da nanoeletrônica à engenharia biomédica e saúde pública; da agricultura à indústria aeronáutica. Quem se candidata? ■

### SUGESTÕES PARA LEITURA

- SILVA, C. G. da. 'Rumo ao nanomundo' (entrevista a Vera Rita Costa) in *Ciência Hoje* n. 193, maio de 2003
- CAPAZ, R. B. e CHACAN, H. 'Nanotubos e a nova era do carbono' in *Ciência Hoje* n. 198, outubro de 2003
- CBPF. *Nanociência e Nanotecnologia – Modelando o futuro átomo por átomo*. Disponível em [www.cbpf.br/nano](http://www.cbpf.br/nano), em formato .pdf
- Na Internet:  
Comciência [www.comciencia.br/reportagens/ framereport.htm](http://www.comciencia.br/reportagens/framereport.htm)  
Instituto Foresight (em inglês) [www.foresight.org](http://www.foresight.org)  
Nanodot (em inglês) [www.nanodot.org](http://www.nanodot.org)