



# A Nanotecnologia das Moléculas

Artigo dedicado a Henry Taube<sup>1</sup>,  
na passagem de seus 90 anos.

**Henrique E. Toma**

A tecnologia atual, que avança na escala nanométrica, está rompendo as barreiras do mundo clássico para ingressar no domínio quântico dos átomos e moléculas. Essa onda, que se anuncia como a maior revolução tecnológica de todos os tempos, poderá transcender a própria Química ao ir ao encontro dos sistemas organizados e nanomáquinas moleculares que sustentam a vida. Inspiradas nesses sistemas, novas estratégias em nanotecnologia já estão aflorando através da Química Supramolecular, permitindo vislumbrar uma enorme gama de aplicações, desde medicamentos e materiais inteligentes, até avançados dispositivos sensoriais, eletrônicos e de conversão de energia.

► nanotecnologia, nanociências, Química Supramolecular ◀

Recebido em 16/3/05, aceito em 25/4/05

Neste início de milênio, a atenção do mundo está voltada para os aspectos moleculares da Ciência, como pode ser visto desde a Biologia Molecular até a recente explosão da nanotecnologia. Assim, muito da inovação que tem acontecido tem algo familiar para quem lida com a Química.

Recentemente, Henry Taube, 90, Prêmio Nobel de Química de 1983 e membro da Academia Brasileira de Ciências, ao ser indagado sobre a sua visão do futuro, declarou: “Eu realmente aprecio o que está sendo feito na nanotecnologia. Os cientistas finalmente estão acreditando nos átomos... Se pudesse prosseguir na Química, eu escolheria essa área para fazer pesquisa”.

Qual o sentido dessa declaração, feita por um dos maiores químicos de todos os tempos, se os átomos e moléculas sempre estiveram no foco da Química?

De fato, a Química já consegue racionalizar grande parte do conhecimento sobre as substâncias, principalmente na escala macroscópica,

onde a unidade de contagem é o mol, quantidade de matéria que contém esse número imenso de entidades conhecido como *número de Avogadro* ( $6 \times 10^{23}$ ). Contudo, será que todo esse conhecimento se aplica a uma única molécula? Será que a cor de uma molécula é a mesma da substância a que dá origem? Com que velocidade um elétron ou um fóton transitarão pela molécula? Existiriam trilhas e armadilhas ao longo do percurso? Seria possível ar-

armazenar informações em sua estrutura e depois acessá-las? Poderíamos manipular suas propriedades intrínsecas, controlar seus movimentos e interações? Processá-las em conjunto, para obter arquiteturas planejadas e arranjos organizados? Depois disso, orquestrar suas ações de forma sinérgica, para realizar um trabalho harmonioso e inteligente? E, finalmente, por que não, fazer das moléculas ver-

dadeiras máquinas, ou utilizá-las para construir complexas máquinas moleculares? Realmente, quando começamos a pensar dessa forma, a Química ganha um novo sentido. Talvez muito mais puro, em sua essência, porém assimilando ao mesmo tempo novos conceitos tecnológicos. Nesse nível, a Química se confunde com a nanotecnologia molecular e passa a usar novas ferramentas capazes de lidar com objetos muito pequenos, numa escala onde os fenômenos clássicos e quânticos se misturam. Essa nova maneira de ver a Química é a mensagem embutida na declaração de Henry Taube.

A tecnologia atual caminha definitivamente para a escala nanométrica, tanto através da miniaturização na eletrônica (sentido descendente, *top-down*), como através da montagem nanoestrutural a partir de átomos e moléculas (sentido ascendente, *bottom-up*). Note que a dimensão expressa por 1 nanometro (1 nm) equivale a um bilionésimo do metro ( $10^{-9}$  m). Nessa

**Eu realmente aprecio o que está sendo feito na nanotecnologia. Os cientistas finalmente estão acreditando nos átomos... Se pudesse prosseguir na Química, eu escolheria essa área para fazer pesquisa**

*Henry Taube*

A seção “Atualidades em Química” procura apresentar assuntos que mostrem como a Química é uma ciência viva, seja com relação a novas descobertas, seja no que diz respeito à sempre necessária revisão de conceitos.

dimensão, a luz visível, em sua faixa de comprimento de onda característica (400 a 760 nm), já não pode ser usada para enxergar os objetos, pois as leis da Física limitam a resolução óptica à metade do comprimento de onda utilizado. Assim, literalmente, estamos entrando em um mundo invisível. Para visualizar as formas nanométricas, uma saída seria empregar minúsculas pontas ou sondas, capazes de atuar como se fossem dedos na leitura Braille, varrendo a superfície através de delicados movimentos com precisão atômica. Que tipo de máquina faria isso? Na prática, podemos usar um simples cristal piezelétrico, como aqueles existentes em aparelhos de som. Esse tipo de cristal converte a pressão (piezo) em impulsos elétricos e vice-versa, através de deslocamentos atômicos em sua estrutura. Assim, basta colar uma ponta ou agulha muito fina nesse cristal e programar no computador os estímulos elétricos a serem aplicados, para gerar movimentos muito precisos na escala nanométrica.

Essas idéias foram colocadas em prática no início dos anos 1980 por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, na IBM (Suíça). Eles utilizaram uma agulha metálica movimentada por um cristal piezelétrico para sondar uma superfície condutora, através das diminutas correntes elétricas que começam a fluir quando as distâncias de aproximação entram na escala nanométrica. Tais correntes são denominadas de tunelamento, pois os elétrons conseguem vencer o espaço vazio (barreira isolante) que separa a ponta da sonda e a superfície condutora, como se passassem através de um túnel. Na realidade, o tunelamento é um fato característico do mundo quântico e está associado à natureza ondulatória do elétron. Medindo as correntes de tunelamento, Binnig e Rohrer obtiveram uma imagem topográfica da superfície, com resolução atômica. O novo microscópio (*STM = scanning tunneling microscope*), que deveria ser chamado de nanoscópio (Figura 1), permitiu visualizar os átomos sobre uma superfície! Por essa invenção, esses cientistas receberam o Prêmio Nobel de Física de 1986.

O nanoscópio foi e continua sendo

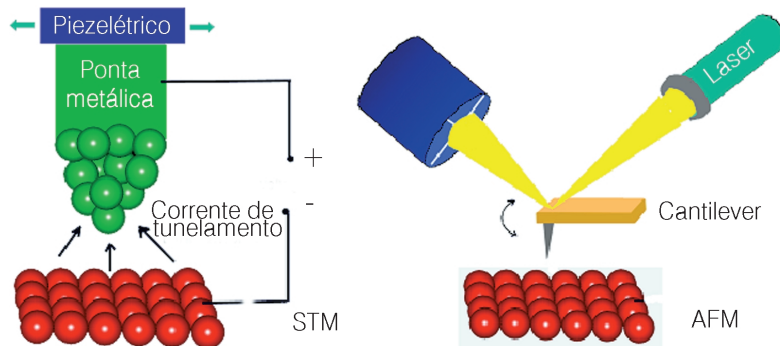


Figura 1: Representação didática dos microscópios de varredura de tunelamento (STM) e de força atômica (AFM).

trabalhado de modo a utilizar não apenas as correntes de tunelamento, como também as vibrações e outros efeitos produzidos nas sondas, à medida que interagem com a superfície. A modalidade conhecida como *AFM (atomic force microscopy)* utiliza um laser que, ao refletir sobre a base da sonda, reproduz seus movimentos com grande precisão. Da mesma forma que um dedo consegue indicar se a superfície é mole ou dura, uma sonda de AFM também fornece muito mais informações do que simplesmente a imagem da superfície e das moléculas nela depositadas. Também é possível ter informações sobre a natureza e homogeneidade do material e sobre suas propriedades elétricas ou magnéticas. Por outro lado, através de modificações químicas, as sondas também podem ser usadas como ferramentas analíticas para monitorar átomos e moléculas específicas sobre uma superfície. Imitando as canetas-tinteiro, as sondas já vêm sendo empregadas para escrever com átomos ou moléculas, deslocando-os ou depositando-as sobre superfícies metálicas de planaridade atômica. Esse processo de gravação foi inicialmente demonstrado por Don Eigler na IBM, que surpreendeu o mundo ao escrever a sigla da empresa com átomos de xenônio. Em 2001, Chad Mirkin introduziu a nanolitografia de ponta de pena, utilizando as sondas para compor imagens com resolução nanométrica, ou como uma nanoimpressora capaz de escrever dezenas de páginas completas no espaço da largura de um fio de cabelo. No final de 2003, a IBM anun-

ciou um novo processo de gravação e leitura em CDs empregando milhares de pontas de microscopia de varredura de sonda. Essa nova ferramenta, denominada Milliped, ampliará em várias ordens de grandeza a capacidade de memória dos atuais CDs.

### Moléculas processando informações

Os CDs e DVDs constituem atualmente a forma mais prática de guardar e reproduzir informações. A gravação dos bits nesses discos plásticos faz uso de um fino filme de moléculas como as ftalocianinas, com alto poder de absorção de luz acima de 600 nm. Esse filme é depositado sobre uma superfície refletora e protegido por um revestimento de polímero transparente. Usando um feixe de laser focalizado, a concentração de fótons torna-se muito alta e, ao serem absorvidos pelas moléculas, esses fótons acabam provocando alterações químicas e físicas na interface refletora que podem ser facilmente monitoradas pelo detector óptico. Isto permite gravar bits num espaço submicrométrico, conferindo enorme capacidade de memória a esses discos.

Utilizando transformações fotoquímicas reversíveis é possível gravar e apagar informações no nível molecular. Um exemplo notável é a espécie conhecida como quiroptoceno (Figura 2), que foi patenteada pela empresa California Molecular Electronics (CME). Essa molécula apresenta um centro quiral (contendo um átomo de carbono assimétrico, ou com quatro ligações distintas), ligado a grupos que podem sofrer ciclicação induzida por

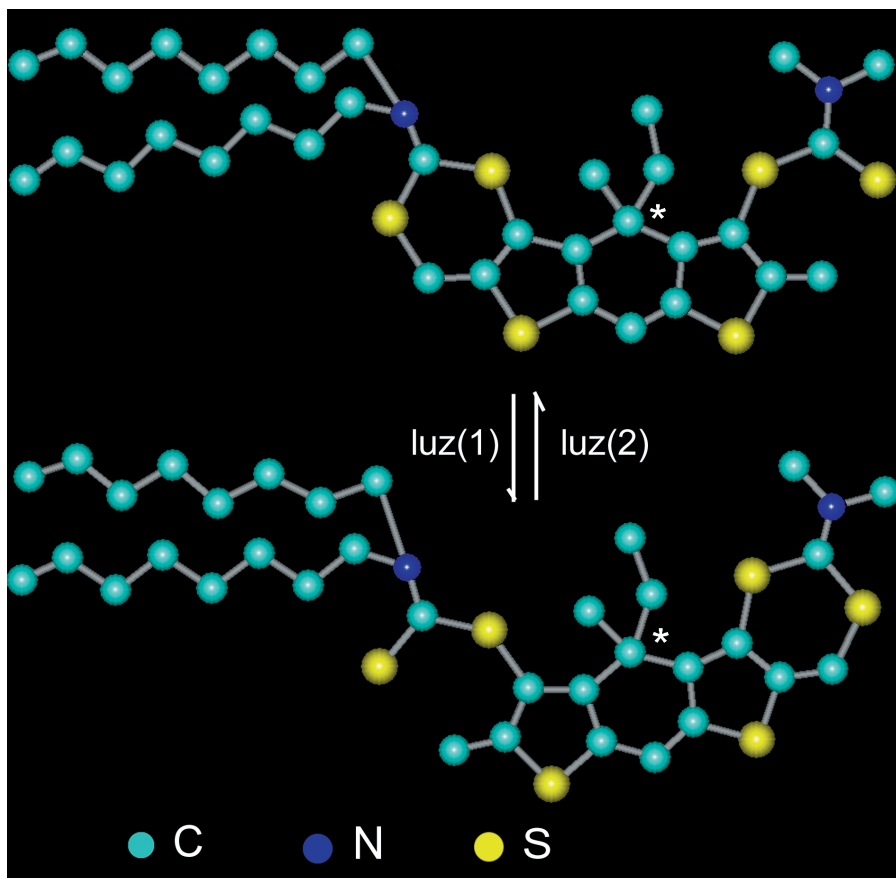


Figura 2: Molécula de quiroptoceno, capaz de armazenar informações através de mudanças em sua atividade óptica, promovida pela luz.

luz, de forma reversível. Quando isto ocorre a atividade óptica do centro quiral é afetada e a informação transmitida pela luz incidente fica gravada. Com o auxílio de uma luz polarizada é possível monitorar esse fenômeno e fazer a leitura da informação gravada. Segundo a CME, esse dispositivo, do tamanho de um pequeno dado, é capaz de armazenar o equivalente a 34 HDs de 60 Gb de memória!

Alem de armazenar informações, as moléculas também podem ser utilizadas em processamento, através da computação molecular. Na eletrônica, todo o processamento é feito através das portas lógicas conhecidas pelas siglas *AND*, *NAND* (*not and*), *OR*, *NOR* (*not or*), *XOR* (*exclusive OR*) etc., as quais fazem uso de uma ou duas entradas de sinal (*input*), para gerar respostas (*output*) binárias, do tipo sim ou não (0 ou 1). Nesse sentido, devemos lembrar que as moléculas são genuínos dispositivos sensoriais e a grande diversidade de estímulos e respostas moleculares pode ser explorada como *inputs* e *outputs* para

codificar e processar informações. Por exemplo, indicadores como a fenolftaleína sinalizam através de mudanças de cor se o meio tem caráter ácido ou básico. Se pensarmos na adição de prótons como *input* e na cor vermelha como *output*, a fenolftaleína irá comportar-se como uma porta lógica molecular semelhante aos análogos de silício usados na eletrônica. De fato, a fenolftaleína na presença de prótons (*input* 1) não produz cor (*output* 0); ao contrário, na sua falta (*input* 0), a cor será vermelha (*output* 1). Essa porta é do tipo *NOT*. Evidentemente, a porta mais simples é a do tipo *YES*, exemplificada por uma molécula incolor que se torna colorida na presença de prótons. Da mesma forma, através da exploração racional dos estímulos e respostas, é possível gerar todos os tipos de portas lógicas com moléculas e realizar computação molecular. Atualmente, até o DNA vem sendo utilizado para essa finalidade.

Embora a computação molecular esteja em seus primórdios, não podemos esquecer que o melhor compu-

tador existente é molecular. Trata-se do cérebro. Ele atua com moléculas, em meio líquido, e é muito mais complicado do que qualquer dispositivo que possamos imaginar! O neurônio é uma complexa porta lógica dotada de um grande número de terminais receptores, capazes de reconhecer moléculas de neurotransmissores como a dopamina (*input*), gerando impulsos elétricos (*output*) que se propagam por longas distâncias através de um filamento de axônio. Este termina em ramificações sinápticas, que fazem a conexão com outras células neurais. Quando os impulsos elétricos chegam às regiões sinápticas, novas moléculas de neurotransmissores que ficam armazenadas no local são liberadas para estabelecer a comunicação com outro neurônio. Ao contrário do computador, que utiliza portas lógicas binárias, o cérebro atua de outra forma, processando em paralelo um número imenso de informações. Assim, consegue executar  $10^{17}$  operações por segundo, cerca de 1000 vezes mais rápido que o Blue Gene/L da IBM, que é o supercomputador mais possante conhecido atualmente. Podemos dizer que, além de um “hardware” químico imbatível, o cérebro também faz uso do melhor “software” existente, que é a consciência. Essas considerações começam a ganhar destaque neste início de milênio, tendo em vista a previsão de que o processo da miniaturização dos dispositivos de silício chegará ao seu limite quando atingir a escala nanométrica, em decorrência dos problemas de natureza térmica e quântica. E isto já está bastante próximo.

### Moléculas e máquinas moleculares

As moléculas são dotadas de movimentos vibracionais, rotacionais e translacionais intrínsecos, acionados pela energia térmica. Entretanto, esses movimentos não respondem diretamente pelos mecanismos de deslocamento, locomoção e transporte observados no mundo macroscópico. Na realidade, realizar movimentos controlados por transformações moleculares ainda é um grande desafio, apesar de ser um ato trivial nos sistemas biológicos. Neles, o movimento é conduzido pelas miosinas, dineínas e quinesinas,

que são sistemas constituídos por uma cabeça protéica globular ligada a uma cadeia fibrosa. A cabeça é ativada pela molécula de ATP, cuja hidrólise provoca uma mudança conformacional que se propaga ao longo da cadeia fibrosa responsável pelo movimento. Fazer algo semelhante utilizando sistemas químicos não é nada fácil e ainda está longe da realidade.

Mesmo assim, os progressos alcançados na produção de movimentos moleculares já contam com vários exemplos notáveis. Um deles são os rotaxanos, constituídos por uma cadeia linear que atua como eixo, em torno do qual uma molécula cíclica gira livremente. Se a cadeia for construída com grupos adequados, eletroquimicamente ativos, e o anel tiver cargas elétricas, a posição do mesmo poderá ser controlada mediante aplicação de potencial. O anel irá se deslocar sobre o eixo condutor, como se fosse um bonde molecular, atraído para a região dotada de cargas opostas. Utilizando uma rede de rotaxanos, é possível montar um dispositivo parecido com um ábaco, para armazenar informações (dígitos) através da simples movimentação dos anéis, mediante aplicação de potenciais elétricos. Esse dispositivo foi recentemente expandido, utilizando redes de nanofios metálicos interligados por rotaxanos, e mostrou ser capaz de processar informações complexas, em nível molecular.

Outra forma de produzir movimen-

tos moleculares é através da isomerização *cis-trans* induzida pela luz. Em moléculas como a diazobenzeno (Figura 3), a fotoisomerização pode ser feita reversivelmente, usando dois comprimentos de onda de irradiação. A forma *cis* é mais compacta que a *trans*. Utilizando um polímero de diazobenzeno ligado a uma lâmina delgada de silício e um material suporte, foi possível realizar movimentos de flexão através da aplicação de luz, por meio da fotoisomerização reversível da cadeia. Se lembrarmos que deslocamentos de dimensões atômicas permitiram o desenvolvimento da microscopia de varredura de sonda, esse tipo de movimento induzido por luz poderá ter aplicações em tecnologias futuras, substituindo micromotores, sem a necessidade de componentes mecânicos.

No nível molecular, mudanças de conformação induzidas por estímulos químicos ou físicos vêm sendo utilizadas no desenvolvimento de sistemas alostéricos. O alosterismo é um mecanismo pelo qual as moléculas, como as enzimas, conseguem controlar sua própria atividade mediante estímulo externo, tornando mais ou menos acessível os sítios ativos, onde se processam as transformações. Na falta do produto, a enzima é ativada alostericamente, de forma a atuar com maior rendimento; quando este se acumula, um mecanismo semelhante provoca sua perda de atividade. O alosterismo

já está sendo aplicado a sistemas químicos, especialmente projetados de forma que a atividade de um determinado sítio possa ser controlada por outro, mais remoto, como ilustrado na Figura 4. A ampliação desse conceito pode ser importante para o desenvolvimento de sistemas moleculares autorreguláveis e inteligentes para uso como liberadores de drogas no organismo, controle hormonal etc.

## A organização molecular

Uma característica importante dos sistemas biológicos é a organização estrutural, que vai desde a montagem das biomoléculas com vários componentes até a disposição das mesmas ao longo das membranas celulares e a compartimentalização dos processos. A associação de vários componentes nas biomoléculas permite que eles atuem de forma cooperativa ou sinérgica, na qual a ação de cada constituinte extrapola o seu limite individual, passando para o plano supramolecular (além da molécula). Este é o conceito de Química Supramolecular estabelecido por Jean-Marie Lehn, Prêmio Nobel de Química de 1987. Os vários níveis de organização representam extensões desse conceito,

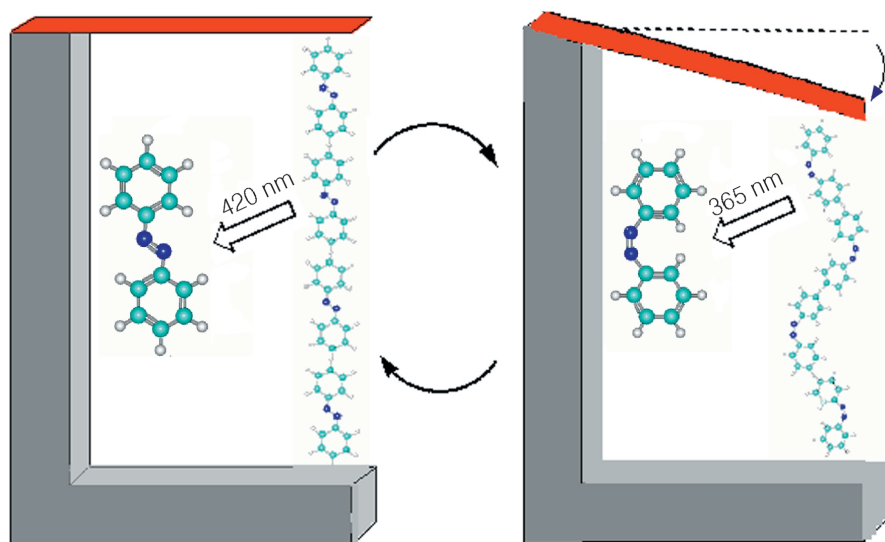


Figura 3: Flexão em uma lâmina delgada de silício produzida pela fotoisomerização reversível do poliazobenzeno em dois comprimentos de onda.

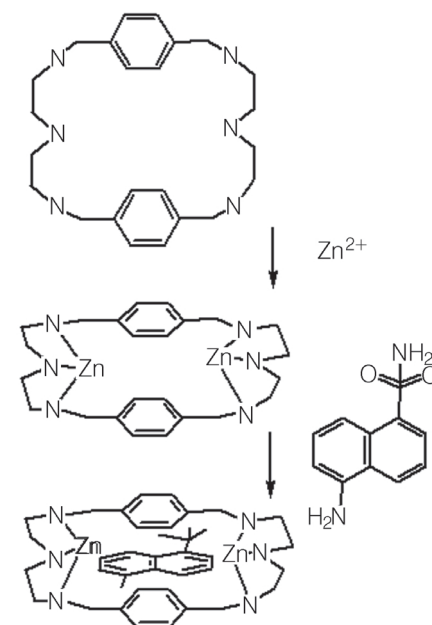


Figura 4: Ilustração do efeito alostérico provocado pela coordenação de íons de zinco aos grupos amina, levando à aproximação dos anéis benzênicos da molécula cíclica original, com um aumento de 100 vezes na eficiência de inclusão da sulfonamida orgânica na cavidade formada.

em outras hierarquias supramoleculares. A compartimentalização, por sua vez, como ocorre nas organelas como as mitocôndrias e cloroplastos, é uma forma de possibilitar que as transformações se processem sem interferências externas, ao longo da cadeia supramolecular.

A associação molecular através de grupos que se reconhecem quimicamente é uma forma eficiente de promover a automontagem de sistemas organizados. Se tivermos que produzir dispositivos moleculares em escala comercial, não será possível montá-los um a um, mesmo com as máquinas construtoras imaginadas por Eric Drexler nos anos 1980. Basta lembrar que no mundo macroscópico a escala de contagem é o mol. Produzir um mol de dispositivos moleculares, um de cada vez, demandaria um tempo infinito. Entretanto, montagens supramoleculares são perfeitamente possíveis e os sistemas biológicos são reflexo disso. Por isso, a Química Supramolecular é considerada estratégica na nanotecnologia do futuro.

Por exemplo, moléculas de polipiridinas lineares se associam espontaneamente na presença de íons cobre(I) formando fios e redes moleculares perfeitamente organizados (Figura 5). Da mesma forma, modificando moléculas com derivados de bases nucleicas é possível realizar sua associação es-

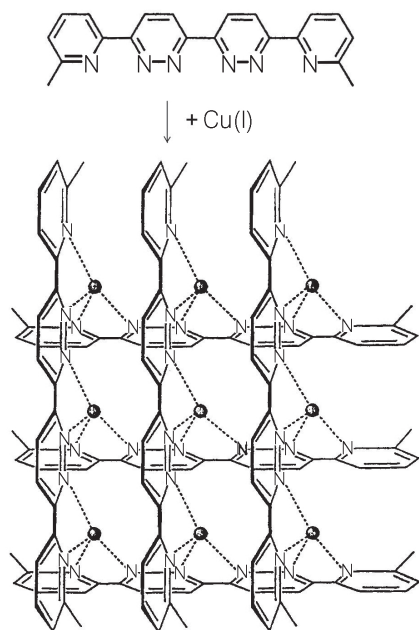


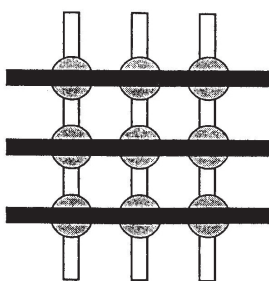
Figura 5: Grades automontadas através da coordenação de polipiridilpiridinas a íons cobre(I).

pontânea para gerar rosetas que se auto-organizam gerando nanotubos (Figura 6). Filmes organizados podem ser convenientemente obtidos através de técnicas como a de Langmuir-Blodget. Para isto, as moléculas são inicialmente dispersas sobre a superfície de um líquido no qual elas são parcialmente miscíveis e compactadas mediante aplicação de uma ligeira pressão lateral. Depois, são transferidas para o substrato de interesse por meio de imersão e remoção controlada. Esse processo é semelhante ao que ocorre quando retiramos o braço de uma tina de água coberta de óleo. O óleo acaba aderindo ao braço, inevitavelmente!

### Dispositivos moleculares

As moléculas apresentam uma grande diversidade de propriedades que podem ser aproveitadas na produção de dispositivos sensoriais, eletrônicos e de conversão de energia, conforme pode ser visto na Figura 7.

Os mais conhecidos são as telas de cristais líquidos usadas nos monitores de computadores, televisores e equipamentos domésticos. Essa tecnologia faz uso do alinhamento das moléculas sob ação de um campo elétrico, depositadas sobre cada ponto (pixel), passando a atuar como se fossem um filtro que controla a passagem da luz polarizada através das mesmas. Outra tecnologia que já está competindo com as telas de cristais líquidos é a dos *OLEDs* (*organic light emitting devices*). Esses dispositivos são constituídos por filmes moleculares nanométricos colocados entre duas placas recobertas por ma-



teriais doadores e receptores de elétrons. As moléculas d e v e m apresentar níveis eletrônicos acessíveis para excitação e e m i s s ã o óptica, como o complexo de 8-

oxiquinolina e alumínio. Através da aplicação de uma diferença de potencial entre essas placas, ocorre a recombinação de cargas na junção constituída pelo filme molecular, dando origem à emissão de luz. Polímeros condutores também vêm sendo empregados como materiais eletroluminescentes. A vantagem das telas de *OLEDs* é a maior visibilidade, tanto angular como em termos de definição e brilho, pois dispensam iluminação de fundo. Além disso, podem ser feitas com a espessura de um cartão de crédito.

A exploração das propriedades elétricas e magnéticas pode gerar uma variedade de componentes eletrônicos moleculares, como detectores, transdutores de sinal (que convertem um tipo de sinal em outro), atuadores (que acionam um mecanismo), chaves, memórias e portas lógicas. Outra aplicação importante está na área de sensores e biossensores, onde os materiais moleculares podem ser empregados com vantagens em função de suas propriedades físicas e químicas, além do reconhecimento molecular. Na área de conversão de energia, as moléculas podem ser utilizadas em sistemas fotovoltaicos, os quais atuam de forma inversa aos *OLEDs*, utilizando a luz para promover a separação de cargas e gerar uma diferença de potencial. Uma variante importante é o caso das células fotoeletroquímicas que empregam moléculas adsorvidas em um filme de nanopartículas de semicondutores, como dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ). A excitação óptica conduz as moléculas ao estado excitado, possibilitando a transferência de elétrons para a banda condutora do  $\text{TiO}_2$ , gerando uma corrente elétrica. O uso de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  foi uma grande inovação introduzida por M. Grätzel no início dos anos 1990, aumentando a área efetiva de trabalho em várias ordens de grandeza, com conseqüente salto de eficiência para um patamar competitivo com as células fotovoltaicas de silício.

Atualmente, já é possível a construção de dispositivos eletrônicos baseados em moléculas isoladas, embora em nível artesanal. Nessa escala, geralmente as moléculas fazem o papel de ponte, interligando dois nanoele-

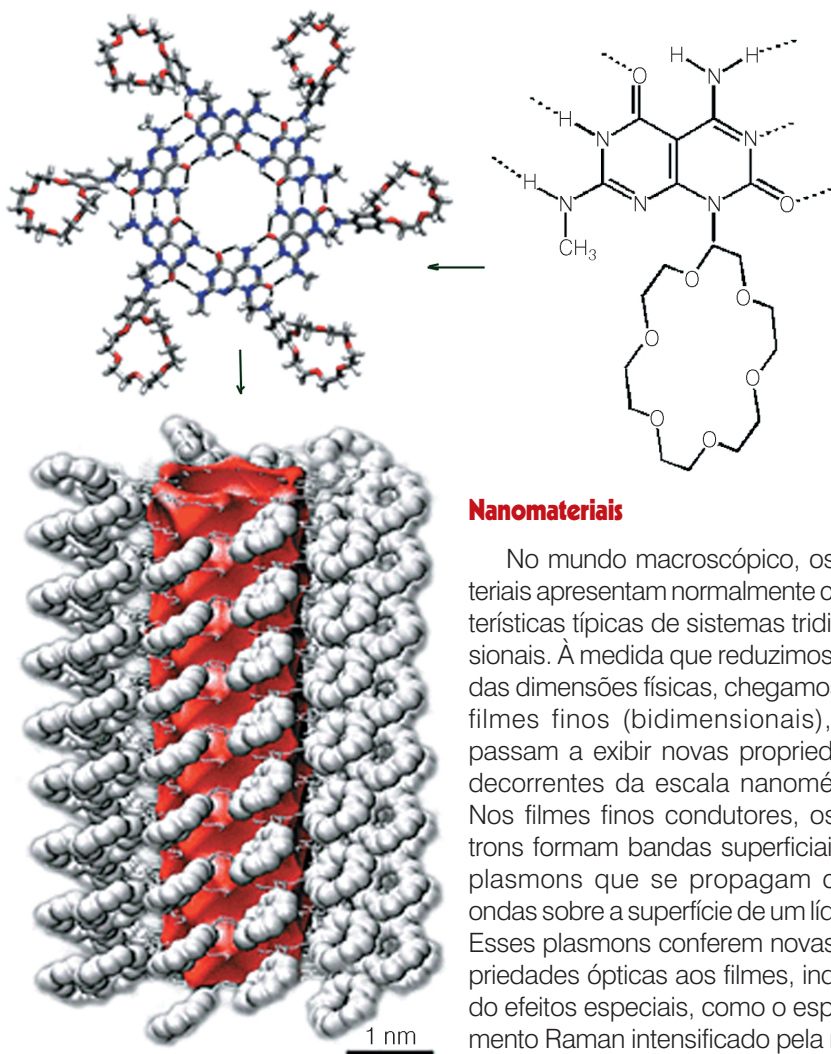


Figura 6: Auto-associação de uma molécula de poliéter cíclico modificada com um derivado de base nucleíca, gerando estruturas do tipo roseta. Essas estruturas se empilham espontaneamente, gerando nanotubos.

trodos polarizados. A passagem de elétrons irá depender da estrutura eletrônica das moléculas. Devido à existência de níveis discretos de energia, cada elétron adicionado irá oferecer resistência ao próximo elétron, formando uma barreira coulômbica. Assim, ao contrário dos sistemas macroscópicos, poderá ocorrer a passagem de um elétron de cada vez (gerando degraus no gráfico corrente vs. voltagem) e não de forma contínua. A dependência da passagem dos elétrons com o potencial aplicado também irá depender dos caminhos possíveis de condução através dos constituintes moleculares, podendo ocorrer efeitos de retificação como nos transistores.

## Nanomateriais

No mundo macroscópico, os materiais apresentam normalmente características típicas de sistemas tridimensionais. À medida que reduzimos uma das dimensões físicas, chegamos aos filmes finos (bidimensionais), que passam a exibir novas propriedades decorrentes da escala nanométrica. Nos filmes finos condutores, os elétrons formam bandas superficiais, ou plasmons que se propagam como ondas sobre a superfície de um líquido. Esses plasmons conferem novas propriedades ópticas aos filmes, induzindo efeitos especiais, como o espalhamento Raman intensificado pela rugosidade atômica superficial (efeito SERS) e efeitos de amplificação gigante quando a luz passa através de orifícios nanométricos.

Reduzindo duas das três dimensões, chegamos aos fios nanométricos (unidimensionais), exemplificados pelos nanofios metálicos e nanotubos de carbono. Estes últimos podem ser pensados como resultantes do enrolamento de um plano atômico de grafite, também chamado de grafeno. Tal enrolamento pode se dar com ligeira defasagem, resultando em nanotubos com diferentes condutividades. Na forma mais condutora, o processo de condução de elétrons é balístico, isto é, ocorre sem o espalhamento colisional responsável pelo efeito Joule observado nos materiais convencionais. Por outro lado, já se consegue produzir nanofios de semicondutores, como GaN, CdSe e CdS. Quando esses nanofios se cruzam individualmente com outro nanofio de Si (dopado com B),

são formadas junções semicondutoras de dimensões nanométricas, capazes de emitir luz de diferentes comprimentos de onda, dando origem a nano-LEDs de distintas tonalidades. Considerando a dimensão nanométrica de cada pixel, esses dispositivos deverão proporcionar telas da mais alta resolução e qualidade.

Reduzindo as três dimensões, chegamos às nanopartículas e pontos quânticos (*quantum dots*). Nessa dimensão, formalmente zero, os níveis eletrônicos existentes se encontram desdobrados, como nos átomos e moléculas, dando origem às transições eletrônicas responsáveis pela coloração típica desses sistemas. Por exemplo, as nanopartículas de ouro conferem uma tonalidade vinho às soluções coloidais desse metal, devido às propriedades dos elétrons superficiais. Quando as nanopartículas se aglomeram, esses elétrons interagem modificando sua cor, de vermelho para azulado. Esse efeito tem sido explorado em sensores químicos e biológicos, utilizando nanopartículas de ouro modificadas com moléculas e biomoléculas específicas, ligadas à superfície. Nanopartículas de semicondutores, como CdSe e ZnS, são luminescentes, e podem ser usadas para rastrear fármacos e marcar células tumorais. Nanopartículas de óxido de ferro têm comportamento supermagnético e podem formar fluidos magnéticos onde o líquido se movimenta juntamente com as nanopartículas. Através de modificação química, é possível atribuir uma variedade de usos às nanopartículas magnéticas, como sensoria-mento de espécies, confinamento através de campos, intensificação de imagens em tomografia, transporte de drogas e aplicações em magneto-hipertermia. Neste último caso, as nanopartículas são primeiramente modificadas com anticorpos, visando o reconhecimento de células tumorais. Mediante aplicação de campos elétricos alternados, elas irão produzir um aquecimento local (em torno de 41 °C) suficiente para provocar a morte dessas células, sem afetar outras regiões.

As nanopartículas dispersas em materiais clássicos, como os vidros e os polímeros, dão origem aos nano-

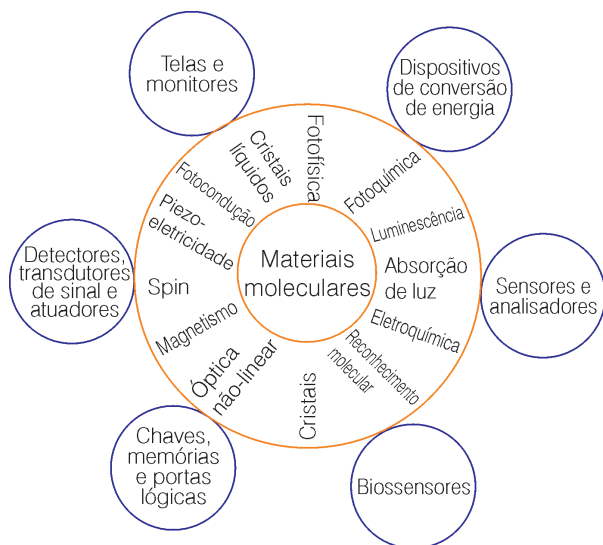


Figura 7: Dispositivos (círculos externos) que podem ser obtidos através da exploração das propriedades das moléculas (círculo interno).

compósitos e nanomateriais dotados de novas propriedades, enquanto preservam outras importantes, como a transparência. Vidros que incorporam nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  poderão ter uso extensivo em janelas autolimpantes. Essas janelas dispensam o uso de produtos de limpeza, pois são capazes de promover a degradação fotoquímica de sujeiras orgânicas na superfície, convertendo-as em espécies que podem ser removidas pela água da chuva. As nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  vêm sendo introduzidas com vantagens em protetores solares, tanto pela melhoria no aspecto estético, eliminando o esbranquecimento típico na aplicação desses produtos, quanto pela maior eficiência. Da mesma forma, as nanopartículas estão revolucionando a área dos nanocompósitos. Já é bem conhecido que as propriedades mecânicas dos pneus decorrem dos nanocompósitos formados pela adição de negro de fumo (nanopartículas de carbono) à borracha. Pneus mais avançados, da linha chamada "Green", vêm sendo obtidos com outras nanopartículas cerâmicas adicionadas à borracha. A adição de nanopartículas de argila a polímeros pode aumentar em milhares de vezes a barreira contra a passagem

de gases, proporcionando embalagens e recipientes mais seguros, capazes de preservar a qualidade dos alimentos por muito mais tempo. Os nanocompósitos poliméricos vêm apresentando crescente aplicação na indústria automobilística, pelo fato de proporcionarem maior resistência mecânica e dureza, com a vantagem adicional de serem moldáveis e leves e de terem ainda características que retardam a chama.

### Considerações finais

A Química tem na nanotecnologia uma aliada perfeita para expressar toda a riqueza de propriedades e aplicações inerentes ao mundo molecular, dando origem a sistemas inteligentes (por exemplo, dotados de capacidade de reconhecimento e mecanismos alostéricos), nanomateriais e nanodispositivos eletrônicos, sensoriais e de conversão de energia.

Atualmente, o impacto da nanotecnologia já está sendo sentido em todos os países, justificando investimentos governamentais superiores a 3 bilhões de dólares, aproximadamente equidistribuídos entre o Japão, EUA, União Européia e o conjunto formado pelos demais países. Investimentos mais vultuosos estão sendo feitos pelo setor privado, diante da expectativa de que o mercado da nanotecnologia chegará a um trilhão de dólares na próxima década. No Brasil, já existem várias redes de pesquisa em nanotecnologia, além de alguns institutos especializados. Cientes de tratar-se de uma grande portadora de futuro, diversos setores do governo já se mobilizam para criação de programas nacionais e regionais de nanotecnologia e nanociências. Nesse sentido, a questão da nanotecnologia também não pode

deixar de ser incluída no cenário da Educação, visto que os principais atores dessa nova era serão os jovens estudantes, que precisarão ser preparados para ingressar nesse mercado de trabalho.

### Nota

1. Henry Taube, professor emérito da Universidade de Stanford (EUA), ganhou o Prêmio Nobel de Química de 1983 "por seu trabalho sobre os mecanismos de reações de transferência de elétrons, especialmente em complexos metálicos".

**Henrique Eisi Toma** (henetoma@iq.usp.br), bacharel e doutor em Química (Química Inorgânica) pela USP, é docente do Instituto de Química da USP, em São Paulo - SP.

### Para saber mais

TOMA, H.E. *O mundo nanométrico: A dimensão do novo século*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2004.

Revista *Parcerias Estratégicas*, n. 18, p. 5-97, 2004. Seção dedicada a nanociência e nanotecnologia. (O texto integral pode ser obtido no sítio do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: <http://www.cgee.org.br/parcerias/p18.php>)

VALADARES, E.C.; CURY, L.A. e HENINI, M. Dispositivos eletrônicos em escala atômica. *Ciência Hoje*, v. 106, p. 40-49, 1994.

SILVA, C.G. da. Nanotecnologia - Manipulando a matéria na escala atômica. *Ciência Hoje*, v. 206, p. 43-47, 2004.

### Na Internet

Rede USP de Nanotecnologia: <http://www.usp.br/prp/>

RENAMI - Rede de Nanotecnologia Molecular e Interfaces: <http://www.renami.com.br>

LQES - Laboratório de Química do Estado Sólido: [http://pcserver.iqm.unicamp.br/mailman/listinfo/lqes\\_news](http://pcserver.iqm.unicamp.br/mailman/listinfo/lqes_news)

LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncrotron: <http://www.lnls.br>

Foresight Institute: <http://www.foresight.org>

The Institute of Nanotechnology: <http://www.nano.org.uk/ion.htm>

**Abstract:** *The Nanotechnology of Molecules*— Current technologies are reaching the nanometric dimension beyond the classical world, entering the quantum domain of atoms and molecules. Accompanying this great wave of innovation, chemistry can provide the necessary tools to launch molecular nanotechnology, inspired in the organized systems and molecular machines involved in the living organisms. Indeed, new strategies are evolving based on supramolecular chemistry, leading to intelligent drugs and materials, as well as to the development of advanced sensors, energy conversion and electronic devices.

**Keywords:** nanotechnology, nanosciences, supramolecular chemistry