
INTERFACES E ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA NO BRASIL: DA QUÍMICA À NANOTECNOLOGIA

Henrique E. TomaInstituto de Química, Universidade de São Paulo, CP 26077, 05513-970 São Paulo - SP

RESEARCH ORGANIZATION IN BRAZIL: FROM CHEMISTRY TO NANOTECHNOLOGY. Nanotechnology can be viewed as a powerful tool, capable of shaping the chemistry of atoms and molecules, converting them into exciting nanosized and nanostructured materials, devices and machines. However, in pursuing this task, an exceptional ability is required to deal with complex inter- and multidisciplinary approaches, as imposed by the nanoscale. A new research organization framework, capable of promoting cooperative interactions in many complementary areas, including the industries, is demanded. In this sense, an interesting example are the nanotechnology networks and millenium institutes recently created in Brazil. The highlights and weakness of such cooperative research networks are discussed, in addition to relevant nanotechnology themes focusing on the special needs and resources from the developing nations.

Keywords: nanotechnology networks; research organization; developing nations.

INTRODUÇÃO

A Nanotecnologia e Nanociências (N&N) vêm dando um impulso extraordinário à inovação e evolução do conhecimento, marcando presença em quase todas as revistas científicas da atualidade¹. Essa mudança, que tem sido crescente desde a última década, já está sendo assimilada pela cultura científica universal, permeando as áreas de Física, Biologia e Materiais através da abordagem dos novos sistemas e propriedades na escala nanométrica e, principalmente, molecular. Na Química, por razões óbvias, esse tipo de abordagem pode ser considerado intrínseco, se encarado sob o ponto de vista da Nanociência. De fato, átomos e moléculas são a essência da Química; contudo, apesar disso, a visão nanotecnológica, capaz de transformar os sistemas moleculares em nanodispositivos ou nanomáquinas, ainda é uma importante questão a ser trabalhada²⁻⁴.

O químico está acostumado a lidar com a matéria condensada, cujas propriedades são expressas em termos de uma unidade astronômica, que é o mol. Apesar de na sala de aula, o aluno ser educado a pensar em termos de moléculas discretas, na prática esse conhecimento acaba se transportando para o coletivo, ou "bulk", incorporando conceitos e variáveis macroscópicas. Nesse processo pedagógico, as propriedades de uma molécula, como o benzeno, confundem-se com as do material contido em um litro dessa espécie. Surgem, dessa forma, incongruências pois, na forma condensada, o benzeno se comporta como isolante, ao passo que, na escala nanométrica, as moléculas de benzeno são condutores eletrônicos. Pode parecer estranho, mas, desenvolver aplicações no plano nanométrico partindo do conhecimento químico dos sistemas condensados ("bulk") não é trivial e requer uma educação tipicamente nanotecnológica³. Até um cineticista experiente, no trato da transferência de elétrons em fase condensada através da teoria de Marcus, pode se ver em apuros com sua falta de habilidade para equacionar a passagem de elétrons através de uma única molécula, inserida entre dois nanoeletródos.

A linguagem quântica passa a ser real no mundo nanométrico. Assim, em virtude das novas propriedades e problemas decorrentes da dimensão nanométrica, a Nanotecnologia se apresenta como um notável desafio para o químico. Como produzir movimentos moleculares através de estímulos, a exemplo das miosinas que acio-

nam os músculos? Como fazer computação molecular, acoplando o reconhecimento químico à geração de sinais, a exemplo das células neurais? Como aproveitar com eficiência a energia solar para produzir eletricidade ou armazenar energia química, mimetizando a fotossíntese? São exemplos de questões, centradas nas propriedades intrínsecas dos átomos e moléculas, que tornam possível a vida e que começam a ser exploradas ou desvendadas através da Nanotecnologia. Nesse empreendimento se faz mister o rompimento das fronteiras que separam as diferentes áreas, não apenas em nível operacional, mas principalmente formal e educacional³. Por seu caráter inter- e multidisciplinar, o exemplo da Nanotecnologia introduz uma reflexão importante a respeito dos paradigmas a serem adotados em termos das interfaces e organização da pesquisa.

SOBRE OS MODELOS DE ORGANIZAÇÃO

Desde a metade do século passado, o Brasil vem passando por sucessivas transformações na esfera acadêmica, com a implantação e estímulo à pós-graduação em todo o país, a valorização do trinômio ensino-pesquisa-extensão nas Universidades Públicas, a consolidação da CAPES como instrumento de capacitação e avaliação, a criação do MCT em 1985, a criação e expansão das FAPs, e os inúmeros programas de apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico, como o Programa NAS/CNPq (1969-1977), o PRONAQ (1980-1985) na área de Química, e o PADCT - fase I (a partir de 1985), fase-II (a partir de 1991) e fase-III (1998-2004).

Em consequência, desde 1980, a produção científica indexada de pesquisadores brasileiros vem evoluindo sistematicamente, passando de 2.000 artigos em 1980, para 3.000 em 1990, 9.500 em 2000⁵ e 13.400 em 2004. Desde a última década a taxa de crescimento anual tem sido linear, em torno de 15%. A percentagem de artigos brasileiros indexados no ISI subiu de 1,55% em 2003 para 1,7% em 2004, o que coloca o Brasil na 17ª posição no ranking mundial da produção científica.

Esses números parecem animadores quando comparados com os de países latino-americanos mais destacados, como Argentina, Chile e México. Entretanto, a comparação com China e Coreia do Sul revela um contraste bastante claro, que tem sido objeto de reflexão em todas as ocasiões em que se discutem os modelos de desenvolvimento. Em 1980, a produção científica da Coreia do Sul era de apenas 230 artigos, além de 13 patentes registradas nos Es-

*e-mail: henetoma@iq.usp.br

tados Unidos, contra 2.000 artigos e 23 patentes do Brasil. Em 1996, esse país já ultrapassava a produção científica brasileira na faixa de 6.000 artigos e, no ano 2000, chegou a 12.200 publicações e 3.300 patentes registradas, contra 9.500 e 98 do Brasil, respectivamente. Esses números refletem o investimento de quase 2% do PIB em C&T pela Coreia do Sul em 1990, quando se acentuou a mudança de perfil, comparado com menos de 0,7 % do Brasil, no mesmo ano. Acompanhando esse aumento de investimento, a Coreia do Sul tem colocado 54% do corpo de engenheiros e cientistas nas empresas, comparado com 23% no Brasil. Esse índice chega a 79% nos Estados Unidos. Tal padrão de elevada concentração de competência nas empresas é uma característica dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento acelerado, e explica o descompasso existente entre a expressiva produção científica e o baixo número de patentes produzidos pelo Brasil.

Os reflexos do baixo desenvolvimento tecnológico também estão claramente expostos nos índices globais divulgados pelo "World Bank" em 2004⁶. Atualmente, o Brasil, com uma população de 172,4 milhões de habitantes, tem uma renda per capita de 3.070 dólares, ao passo que a Coreia do Sul, com 47,3 milhões de habitantes tem uma renda per capita de 9.460 dólares. A Alemanha, o Japão e os Estados Unidos, com 82,3, 127,0 e 285,3 milhões de habitantes, têm valores de renda per capita iguais a 23.560, 35.610 e 34.280 dólares, respectivamente.

No caso especial da Nanotecnologia, o desenvolvimento é uma questão ainda mais complicada, pois a abordagem inter- e multidisciplinar também deve ser estendida às empresas, e não apenas para o setor acadêmico. A esse problema, deve ser adicionado o fator custo e a falta de recursos humanos para desenvolver a Nanotecnologia. O fator custo é especialmente preocupante, pois laboratórios de qualidade em Nanotecnologia exigem dispêndios de milhões de dólares em equipamentos sofisticados, instalações e insumos. Esse ponto alerta para a necessidade de novos modelos de organização de pesquisa, a fim de evitar que a alta tecnologia acabe se concentrando em empresas e instituições de maior porte, levando à exclusão das pequenas empresas, justamente onde o potencial de inovação tende a ser mais acentuado.

Na esfera acadêmica, uma forma interessante de lidar com esse problema surgiu naturalmente com duas propostas implementadas pelo Governo, em 2001, através dos programas de Redes Cooperativas de Nanotecnologia e dos Institutos do Milênio, estes últimos com os mais diferentes focos de interesse⁷. As quatro Redes Cooperativas de Nanotecnologia envolveram grande número de Universidades e Institutos de Pesquisa, com mais de 300 doutores e 600 pós-graduandos, atuando em Nanotecnologia molecular e interfaces (RENAMI); Nanobiotecnologia; Nanodispositivos semicondutores e materiais nanoestruturados - Nanosemimat e, materiais nanoestruturados. O principal mérito dessa iniciativa foi o estímulo ao trabalho cooperativo, que permitiu a inserção de grupos emergentes em atividades de parceria. O caráter dinâmico introduzido em várias dessas redes proporcionou a expansão qualitativa e quantitativa do número de trabalhos, aparentemente com um custo baixo em termos de recursos de investimento. Esses programas estão sendo reeditados no momento, em função dos bons resultados aparentes, apresentados pela última avaliação conduzida pelo MCT no final do ano passado.

Seriam, de fato, as redes e os poucos institutos do milênio suficientes para deslanchar as Nanociências e a Nanotecnologia no Brasil? Embora não existam dados quantitativos, que considerem o nível de recursos aplicados, é bastante provável que o bom desempenho conseguido pelas redes e institutos tenha sido decorrente, em grande parte, da existência de grupos bem estabelecidos, cuja infraestrutura foi colocada à disposição dos participantes no processo cooperativo da rede.

Na atual conjuntura, os programas de redes e institutos do milênio sempre irão depender da infraestrutura pré-existente, a ser compartilhada em termos cooperativos. Dessa forma, o compartilhamento de recursos em um esquema de rede merece ser aperfeiçoado, como forma interessante de ampliar os benefícios e diminuir os custos de pesquisa. Para isso, deveriam ser identificados os **laboratórios estratégicos** nas redes que, com o devido suporte, poderiam estender o uso das facilidades conseguidas para os demais usuários, evitando sua concentração em laboratórios específicos, isolados, como tem acontecido. Entretanto, embora já tenha sido cogitada pelo Governo, a idéia dos laboratórios estratégicos dentro das redes não é tão simples, pois requer ponderações de outra natureza, sem falar dos frequentes conflitos de interesse político e regional.

Na atual estrutura universitária, é muito difícil pensar em um laboratório estratégico funcionando em rede, com corpo técnico-científico especificamente contratado para prestar serviços ou desenvolver projetos. Algumas universidades dispõem de fundações, que podem facilitar de alguma forma esse processo, mas certamente não é regra geral. Por outro lado, nos laboratórios acadêmicos, os pós-graduandos, que são a principal força de pesquisa, têm seus projetos de tese e obrigações a serem cumpridos em prazos estabelecidos e, dificilmente, podem prestar serviços rotineiros para atender às necessidades da rede. Sem executores, a idéia dos laboratórios estratégicos realmente não tem sentido. A saída seria recorrer à parceria com o setor empresarial, que poderia se beneficiar da infraestrutura dos laboratórios estratégicos contribuindo, ao mesmo tempo, para seu funcionamento através da contratação de técnicos especializados e doutores. Infelizmente, esse mecanismo ainda é pouco explorado na interface universidade-empresa como forma de geração de empregos para mestres e doutores e, também, de estímulo ao desenvolvimento de parcerias. No momento, na visão deste autor, este é o ponto mais crítico, que tem moldado o baixo perfil tecnológico do país, como será discutido mais adiante.

Outro ponto importante associado às redes e institutos do milênio é a possibilidade de lidar com questões complexas, que demandam várias especialidades. Nesse sentido, o reconhecimento das prioridades e desafios a serem atacados através do esforço cooperativo deveria ser assunto de constante debate nessas organizações. Alguns aspectos relacionados com essa questão serão comentados posteriormente.

Por outro lado, pensando em termos amplos, se fossem instituídos laboratórios estratégicos como unidades de sustentação das redes, estaríamos nos aproximando de modelos já bem estabelecidos em outros países, como a Alemanha, por ex.. Nesse país, os centros de pesquisa fazem parte de pelo menos quatro grandes Sistemas de Organização Públicas, ou Sociedades, conhecidas como Fraunhofer, Leibniz, von Helmholtz e Max-Planck. Existem ainda centros isolados, como o Centro de Pesquisa sobre Inteligência Artificial, localizado entre as cidades de Kaiserslautern e Sarrbruck. Cada uma dessas Organizações constitui uma rede imensa de Instituições e Centros de excelência ou competência, com maior afinidade acadêmica ou industrial, respectivamente. Por ex., só na Organização Fraunhofer existem 56 institutos de pesquisa (não universitários) envolvendo cerca de 11.000 colaboradores (pesquisadores, engenheiros e técnicos), com um orçamento anual da ordem de 900 milhões de euros (60% provenientes de contratos com indústrias). Nessa organização, existe uma forte pressão voltada para produtos e aplicações, e as atividades cobrem quase todas as áreas tecnológicas. Na Organização Leibniz existem atualmente 78 institutos de pesquisas, que atuam nas áreas de ciências exatas e naturais, ciências econômicas e jurídicas. A Organização von Helmholtz, criada em 2001, é voltada para pesquisas fundamentais e aplicadas de maior amplitude ou duração e tem uma forte interação

com a Universidade. Seus maiores centros são o Forschungszentrum Jülich, e o Forschungszentrum Karlsruhe. Neste último destaca-se o Instituto de Nanotecnologia de Karlsruhe, formado pela associação de líderes científicos que atuam principalmente nas Universidades e dedicam parte do tempo à realização de projetos integrados, possibilitando a abordagem de temáticas complexas que dificilmente poderiam ser conduzidas no plano individual. Os professores dirigem grupos de pesquisa nesses Centros, além de seus laboratórios nas Universidades, e contam com todo o apoio técnico existente. É um modelo interessante a ser pensado em nosso país. A Sociedade Max-Planck já é bem conhecida pela excelência e impacto de suas atividades de pesquisa nas ciências exatas, naturais, sociais e humanas. Compreende 80 institutos de pesquisa, com cerca de 12.000 colaboradores, além de 9.100 pós-graduandos e pós-doutores. Esse breve balanço nos mostra que a Alemanha dispõe de um imenso Sistema Organizacional de Ciência/Tecnologia, que envolve mais de 200 centros e Institutos de Pesquisa, com seus inúmeros laboratórios e corpo técnico especializado, ao lado dos centros de interesse privado. É essa a comparação que devemos ter em mente, quando falamos em desenvolvimento da Ciência e Tecnologia no Brasil.

A NANOTECNOLOGIA E O MUNDO EM DESENVOLVIMENTO

Além da China, que já é o 3º produtor mundial de patentes em Nanotecnologia (depois dos Estados Unidos e Japão) e da Coreia do Sul, conforme já comentado, muitos países em desenvolvimento também estão começando a investir nessa nova área. O Departamento de C&T da Índia anunciou investimentos de US\$ 20 milhões no período de 2004-2009. Tailândia, Filipinas, Chile, México e Argentina também já têm programas de investimento em N&N⁸. Nesse contexto, merece destaque, uma excelente proposta voltada para a criação do Instituto de Nanotecnologia Brasil-Argentina, que resultou do proveitoso encontro das sociedades científicas dos dois países, no final de 2004.

No Brasil, foi recentemente anunciado o Programa Nacional de Desenvolvimento da Nanociência e Nanotecnologia com recursos de US\$ 30 milhões a serem investidos no biênio 2005/2006. Alguns instrumentos, como a expansão das redes cooperativas e dos institutos do milênio, já foram apontados. Contudo, questões mais amplas, como as que foram levantadas, ainda representam incógnitas.

Talvez, a experiência mais interessante que já aconteceu na área de Nanotecnologia no Brasil, foi a realização do evento Nanotec2005 em julho de 2005, na cidade de São Paulo, contando com expressiva participação do setor empresarial. Esse evento, essencialmente de natureza privada, também teve parcerias do setor acadêmico, dos institutos de pesquisa e do Governo. Seu mérito principal foi contribuir para a tomada de consciência do setor empresarial diante das possibilidades da Nanotecnologia, bem como ressaltar a importância da colaboração com a universidade. No plano interno das empresas, o evento mostrou a necessidade de investimentos em recursos humanos e modernização instrumental, como requisitos a serem incorporados no planejamento estratégico. Ao mesmo tempo, despertou atenção para a necessidade de investimentos na área de produção de insumos específicos e para a formação de grupos de planejamento em assuntos de Nanotecnologia.

Os levantamentos divulgados por Galembeck, nesse evento, mostraram que o setor químico é um dos principais responsáveis pela geração de patentes em Nanotecnologia. E essa é uma questão que toca diretamente a comunidade dos químicos brasileiros, cuja participação na área de Nanotecnologia ainda é bastante tímida.

Dada a natureza inter- e multidisciplinar dessa área, se os químicos não assimilarem a competência necessária para atuar no mercado de trabalho que ora está se delineando, certamente outros profissionais o farão⁴.

A questão dos investimentos em Nanotecnologia no Mundo em Desenvolvimento passa por várias considerações. A título de provocação, na Nanotec2005, o representante brasileiro de uma grande multinacional em eletrônica, ao ser indagado sobre o interesse dessa empresa em investir em um centro de Nanotecnologia no Brasil, respondeu categoricamente de forma negativa, colocando como limitante a questão do custo necessário para implantar um centro dessa natureza. Então, será que não haverá futuro para a Nanoeletrônica brasileira, assim como aconteceu com a microeletrônica? Por outro lado, não podemos esquecer das prioridades identificadas em termos do desenvolvimento sustentável, como as questões dos recursos hídricos, agricultura, nutrição, saúde, energia e meio ambiente⁹. Essas prioridades assumem importância especial nos países em desenvolvimento, e motivaram um estudo Delphi, recentemente publicado⁸ sobre as dez aplicações mais importantes da Nanotecnologia nessas áreas, a saber:

- 1) *Produção, armazenagem e conversão de energia* - Nesse item, os exemplos são inúmeros: células fotovoltaicas e fotoeletroquímicas, dispositivos orgânicos emissores de luz (OLEDs), aplicações de nanotubos de carbono em células solares, nanocatalisadores para produção de hidrogênio, células a combustível, nanomateriais para armazenagem de hidrogênio.
- 2) *Aumento da produtividade agrícola* - Por ex., desenvolvimento de zeólitas nanoporosas para liberação lenta e controlada de água, fertilizantes, e agrodefensivos; nanocápsulas liberadoras de herbicidas; nanossensores para monitoração do solo e do desenvolvimento das plantas e, nanopartículas magnéticas para combater a contaminação do solo.
- 3) *Remediação e tratamento da água* - Por ex., nanomembranas para purificação de água, desalinização e desintoxicação; nanossensores para detecção de contaminantes e agentes patogênicos; zeólitas nanoporosas, polímeros nanoestruturados e argilas para purificação de água; nanopartículas magnéticas para tratamento de água; nanopartículas de TiO₂ para degradação fotocatalítica de poluentes.
- 4) *Mapeamento e diagnóstico de doenças* - Por ex., "lab-on-a-chip"; "arrays" de nanossensores, nanopartículas magnéticas e "quantum-dots" para diagnóstico clínico; complexos dendrímero-anticorpos para diagnóstico de HIV-1 e câncer; nanofios e nanofitas para diagnóstico de doenças; nanopartículas como intensificadores de imagem computadorizada.
- 5) *Sistemas para liberação de drogas* - Por ex., nanocápsulas, lipossomos, dendrímeros, nanoesferas, nanopartículas magnéticas, atapulgitas (argila) para liberação lenta e controlada de drogas.
- 6) *Armazenagem e processamento de alimentos* - Por ex., nanocompósitos para embalagens; nanoemulsões antibacterianas para descontaminação de alimentos, equipamentos e embalagens; nanossensores e biossensores para monitoração da qualidade de alimentos.
- 7) *Controle e remediação dos efeitos da poluição do ar* - Por ex., vidros auto-limpantes baseados em nanopartículas de TiO₂; nanocatalisadores mais eficientes e baratos para conversão catalítica em escapamentos automotivos; nanossensores para detecção de agentes tóxicos e vazamentos; nanodispositivos para separação de gases.
- 8) *Construção* - Por ex., nanoestruturas moleculares para reforço do asfalto e concreto; nanomateriais resistentes a calor e bloqueadores de ultravioleta e infravermelho; nanomateriais para

barateamento e durabilidade de construções; superfícies e coberturas auto-limpantes ou bioativas.

- 9) *Monitoração da saúde* - Por ex., sensores para glicose, CO₂, colesterol; sensores para monitoração homeostática *in situ*.
- 10) *Deteção e controle de pragas e seus vetores* - Por ex., nanosensores para deteção de pragas, nanopartículas transportadoras ou liberadoras de pesticidas, inseticidas, ou de ação repelente.

São temas sugestivos para atuação das Redes Cooperativas de Nanotecnologia e Institutos do Milênio no Brasil, e para estimular a participação dos químicos, visto que todos eles têm forte conotação química.

CONCLUSÃO

Os mecanismos de implementação das ações no Brasil e no exterior foram comentados em nível de interfaces e organização estrutural, destacando o papel das Redes, e a necessidade de adoção de estruturas de apoio, através de laboratórios estratégicos, e da parceria empresarial. Foram abordados assuntos e exemplos visando chamar a atenção dos químicos¹⁰ para seu importante papel na assimilação e desenvolvimento da N&N, além da contribuição para o desenvolvimento sustentável. Embora não tenham sido ob-

jeto deste artigo, não podem ser esquecidos os desafios de longo prazo na Nanotecnologia e Nanociências, como a utilização das moléculas na eletrônica e computação; o uso das interações eletrônicas para computação quântica e spintrônica; e o desenvolvimento de máquinas moleculares e medicamentos inteligentes¹¹. Da mesma forma, é importante pensar na implantação de uma cultura nano (N&N) nos currículos de graduação e pós-graduação, tendo em mente a geração de recursos humanos aptos para atuar na mais estratégica área do momento: a nanotecnologia.

REFERÊNCIAS

1. Toma, H. E.; Araki, K.; *Ciência Hoje* **2005**, 217, 20.
2. Toma, H. E.; *O mundo nanométrico: a dimensão do novo século*, Ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2004.
3. Toma, H. E.; *Química Nova na Escola* **2005**, nº 21, 3.
4. Toma, H. E.; *Informativo CRQ-IV* **2005**, 71, 4.
5. De Brito-Cruz, C. H. Em *Política Nacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento*; IEA-ACIESP, Publicação ACIESP 103, 2000, p. 22.
6. De Almeida P. R.; *Parcerias Estratégicas* **2004**, nº 18, 239.
7. Gomes, A. S. L.; De Melo, C. P.; *Parcerias Estratégicas* **2004**, nº 18, 109.
8. Salamanca-Buentello, F.; Persad, D. P.; Court, E. B.; Martin, D. K.; Daar, A. S.; Singer, P. A.; *PLoS Medicine* **2005**, 2, 300.
9. <http://www.nanoandthepoor.org>, acessada em Fevereiro 2005.
10. Toma, H. E.; *J. Braz. Chem. Soc.* **2005**, 16, 4.
11. Toma, H. E.; *VideoSom & Tecnologia* **2005**, 81, 24.