

## **INTRODUÇÃO**

Toda inovação científica e tecnológica envolve aspectos éticos, principalmente quanto à sua utilização e conseqüências para a sociedade. Por isso, essa questão não deve ser dissociada da responsabilidade e dos valores humanos intrínsecos, na tomada de decisão sobre o seu uso ou destino. Assim, a postura científica é fundamental, de modo que ao longo do processo contínuo de evolução do conhecimento, cada novo problema possa ser pesquisado e equacionado, balizando os preceitos da ética (1).

Tem sido notório o interesse que a nanotecnologia vem despertando nos setores governamentais dos Estados Unidos, ligados à energia, defesa e aeronáutica (2). De fato, em termos de segurança e de recursos bélicos, a nanotecnologia é um recurso que poderá ser explorado de inúmeras formas; por exemplo, criando materiais que escapam à detecção dos radares, produtos dotados de capacidade de reconhecimento molecular para atuar em alvos biológicos específicos, e até novos dispositivos de destruição ou defesa, baseados em alta tecnologia.

É importante destacar que na forma nanométrica os materiais não se comportam exatamente da forma como os conhecemos e utilizamos no dia-a-dia. Aproximando-se da dimensão quase atômica, os metais já começam a expor sua verdadeira química, às vezes camuflada no mundo macroscópico. Um exemplo típico é o alumínio, metal amplamente utilizado nos utensílios domésticos, recipientes de bebidas e materiais de construção. Os químicos sabem que o alumínio é um elemento bastante reativo, com enorme facilidade

de combinar-se com o oxigênio para formar o óxido de alumínio, ou alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esse processo é muito energético, e deveria provocar a imediata combustão do metal. Na realidade, isso não acontece no mundo macroscópico porque a oxidação do metal leva à formação de uma camada protetora de óxido de alumínio, impedindo que a reação com o oxigênio continue a ocorrer. Entretanto, na forma particulada, ou ao ser aquecido em temperaturas elevadas, o efeito de proteção da camada de óxido acaba desaparecendo e o alumínio metálico exposto consegue abstrair até o oxigênio presente em outros minérios, como a hematita, deslocando o outro elemento metálico. Esse processo é conhecido como aluminotermia, e tem sido usado para produzir metais mais valiosos, como o nióbio, a partir da reação do respectivo minério com alumínio em pó. No caso da hematita, a reação é tão violenta que chega a fundir o ferro metálico formado. Este, no estado de fusão, pode escoar e ser usado para preencher espaços vazios e, assim, fazer reparos em fraturas de trilhos e grandes estruturas metálicas. Na forma nanométrica, a área superficial do alumínio é aumentada por várias ordens de grandeza, e da mesma forma que vários outros metais, o elemento adquire propriedades pirofóricas, isto é, capacidade de sofrer combustão espontânea pela simples exposição ao ar. A energia liberada é imensa, e o processo se torna incontrolável. Não é por acaso que a mais temível bomba não-nuclear de todos os tempos, a Moab (*mother of all bombs*), ao detonar acima de 20 metros do solo, lança cápsulas de nanopartículas de alumínio para devastar regiões imensas, provocando incêndios de grandes proporções.

Ao lado da questão militar, algumas ONGs têm se mobilizado em torno de como a nanotecnologia poderá afetar a nossa saúde. Existe o receio que as nanopartículas possam passar para a cadeia alimentar, e de fato ainda pouco se sabe sobre a sua ação no organismo (3). Nanopartículas de fullereno, modificadas quimicamente têm demonstrado enorme potencialidade em quimioterapia, principalmente de câncer, e são comercializadas pela empresa norte-americana C-Sixty Inc. (Ontário, Canadá). Contudo, existem relatos recentes sobre danos no cérebro e fígado de peixes, provocados por fullerenos, o que reforça a preocupação sobre a necessidade de maior investigação a respeito da toxicologia das nanopartículas. Esses problemas se somam a inúmeras outras questões, existindo até o receio de que os cientistas, por intermédio da nanobiologia, venham a escrever seqüências de DNA e colocá-las em prática, da mesma maneira como hoje são escritos os programas de computador.

A maioria dos cientistas acredita que a nanotecnologia ainda está longe de dominar os processos de auto-replicação. Quando isso começar a acontecer, talvez na segunda metade do século, rigorosas regras de conduta certamente serão necessárias para impedir que esse recurso da nanotecnologia venha a ser explorado de forma inadequada.

Muitos têm sido expostos a uma visão catastrófica, de um mundo infestado por organismos artificiais auto-replicantes (nanorrobôs), de seres biônicos dominantes, ou da humanidade se escondendo em refúgios sob a ameaça de implacáveis armas de destruição em massa. Essa temática já está sendo explorada na literatura de ficção, como o livro “Presa”, publicado em 2003, por Michael Crichton, em que os EUA são alvo de ataque por nanorrobôs (4). Vários filmes e jogos com essa temática já estão disponíveis nas locadoras. Ironicamente, a nanotecnologia mesmo enfocada como elemento de suspense em entretenimentos, está correndo um sério risco de ser lembrada como algo ameaçador e nefasto.

## **HUMANISMO E NANOTECNOLOGIA**

Os avanços no conhecimento exigem que o homem se adapte continuamente a novos preceitos e valores, embora isso não pareça óbvio. O homem já tem o poder bélico para destruir o mundo. Ironicamente, até mesmo sem tocar em armas, já pode levar nações à desgraça pelo exercício dos jogos econômicos. O que acontecerá quando tanto poder for exacerbado? A realidade está mostrando que ao lado do desenvolvimento da ciência e da tecnologia, o homem terá que evoluir como ser humano, para se manter em harmonia com o mundo em que vive. Tal evolução implica em reeducação continuada, maior consciência e humanismo. Nesse ponto, reside o maior desafio que a humanidade terá que enfrentar. Se o homem não for capaz de dar esse passo, assimilando e incorporando os novos conhecimentos para melhor compreender e melhorar o mundo em que vive, então ele se voltará para o incompreensível e irracional. Procurará abrigo em crenças estranhas, abraçará qualquer foco de esperança em que consiga acreditar. Será que isso já não está acontecendo?

Assim, sob o ponto de vista evolutivo, é importante não dissociar a ciência da consciência humana. Tal descompasso colocará em risco a sobrevivência da humanidade. Essa linha de pensamento não é nova, e tem

preocupado muitos cientistas e humanistas desde o início do século passado. Um reflexo disso foi o surgimento do humanismo, como uma filosofia progressiva de vida que, sem apelar para o supernatural, direciona nossa habilidade e responsabilidade para viver plenamente dentro da ética, almejando sempre o melhor para a humanidade.

Guiados pela razão, inspirados na compaixão e informados pela experiência, são os preceitos que definem a postura Humanista. Em 2003, diante do quadro polêmico criado pela clonagem e manipulação genética, bioterrorismo, e uso de armas de destruição em massa, ao lado da multiplicação de seitas religiosas em todo o mundo, a Sociedade Humanista Americana (5) lançou o Manifesto III, encabeçado por 63 cientistas e intelectuais, entre os quais 17 agraciados com o Prêmio Nobel:

- a) O conhecimento do mundo provém da observação, experimentação e análise racional;
- b) Os humanos são parte integral da natureza e do processo evolucionário;
- c) Os valores éticos decorrem das necessidades e causas humanas, confrontados pela experiência;
- d) A plenitude da vida emerge da participação individual a serviço dos ideais humanos;
- e) Os humanos são sociais por natureza e acreditam no relacionamento;
- f) Trabalhar em benefício da sociedade equivale a semear a felicidade em cada um.

São pontos que sem dúvida merecem reflexão, principalmente nesta época tão conturbada pelos conflitos humanos.

## **NANOTECNOLOGIA E A QUÍMICA VERDE**

Dentro do enfoque humanístico, uma das metas da tecnologia moderna é a busca de um ambiente saudável, tendo o homem como parte integral da

natureza. Nesse sentido, a nanotecnologia tem muito a contribuir, embora essa questão não seja tão simples. De fato, já existem ONGs, como o Grupo de Ação para Erosão, Tecnologia e Concentração no Canadá, que propuseram o banimento da nanotecnologia, questionando a atual falta de conhecimento sobre seus efeitos na saúde e no meio ambiente.

A resposta na nanotecnologia para esse apelo está vindo principalmente por meio da Química Verde (Green Chemistry) (6, 7). Esta é uma abordagem voltada para o desenvolvimento sustentável, que vem ganhando força a partir de 1987, quando foi publicado o relatório da ONU sobre “o nosso futuro”. Essas preocupações foram expressas, sob a forma de 12 princípios da Química Verde, formulados por Paul Anastas e John Warner, da Universidade de Massachusetts (EUA). Tais princípios podem ser generalizados no contexto das atividades humanas, da seguinte forma:

- 1) **Prevenção:** em qualquer processo, é melhor evitar a formação de rejeitos do que tratá-los depois.
- 2) **Economia de átomo:** sempre que possível, os métodos de preparação devem incorporar no produto, a maioria dos materiais usados no processo, para evitar novas etapas de processamento com geração de descartes.
- 3) **Planejamento de risco:** os métodos de obtenção devem ser planejados para usar e produzir substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o ambiente.
- 4) **Reagentes mais seguros:** os insumos, necessários para desempenharem a função desejada, devem contemplar a minimização de toxicidade.
- 5) **Solventes e agentes auxiliares mais seguros:** substâncias auxiliares e solventes devem ser eliminados sempre que possível, ou tornados inócuos caso venham a ser usados.
- 6) **Eficiência energética:** os requisitos energéticos para os processos devem ser avaliados e otimizados em termos dos impactos econômicos e ambientais. Sempre que possível, os métodos preparativos devem ser conduzidos em condições ambientais.

- 7) **Matérias-primas renováveis:** as matérias-primas devem ser renováveis, e esforços devem ser despendidos para tornar isso tecnicamente ou economicamente possível.
- 8) **Economia de etapas:** o uso de etapas intermediárias deve ser minimizado, visto que cada etapa envolve consumo de reagentes e tende a gerar mais rejeitos.
- 9) **Catálise:** em processos químicos, reagentes catalíticos devem ser preferidos, pelo desempenho superior que proporcionam em relação aos reagentes estequiométricos.
- 10) **Degradação:** os processos devem ser planejados para que no final, os rejeitos se degradem em espécies inofensivas que não persistam no meio ambiente.
- 11) **Análise em tempo real:** metodologias analíticas devem ser introduzidas para fazer a monitoração e controle dos processos em tempo real, de forma a poder prevenir e remediar em tempo hábil, a formação de substâncias perigosas.
- 12) **Minimização de riscos:** a utilização dos materiais e procedimentos deve ser planejada para minimizar o risco de acidentes em potencial.

Analisada sob o ponto de vista da Química Verde, a nanotecnologia proporciona um caminho natural, pois lida diretamente com a questão da redução de escala material e energética, maior eficiência e seletividade nos processos, uso de materiais mais inteligentes e ambientalmente corretos, e até o desenvolvimento de dispositivos analíticos para monitoração em tempo real.

De fato, muitos catalisadores heterogêneos já empregam nanopartículas de materiais ativos, como os metais nobres, dispersos sobre um material suporte de alta área superficial. Exemplos típicos são os catalisadores usados em automóveis, para reduzir a emissão de poluentes como monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. A montagem do sistema catalítico faz uso de cerâmicas revestidas por uma fina camada de óxido de alumínio poroso, impregnados por nanopartículas de platina e ródio, além de óxidos de cério, zircônio e lantânio. As nanopartículas de platina atuam oxidando os hidrocarbonetos

(gasolina residual) e monóxido de carbono (CO, tóxico) até o gás carbônico (CO<sub>2</sub>, inofensivo). As nanopartículas de ródio atuam na redução dos óxidos de nitrogênio até o nitrogênio molecular (N<sub>2</sub>, inofensivo). Os demais componentes atuam como suprimento adicional de oxigênio, importante nos momentos em que os gases de exaustão ainda estão ricos em vapores de gasolina, e não existe ar suficiente para a sua queima total.

Na área de catálise, nanoarquiteturas são projetadas visando uma melhor distribuição da porosidade e dos sítios catalíticos e, conseqüentemente, maior desempenho em relação aos catalisadores existentes. A síntese de materiais nanoporosos pode ser feita utilizando surfactantes ou polímeros agregados, gerando um molde em torno do qual as estruturas inorgânicas são consolidadas, por exemplo, no processo sol-gel. Os materiais orgânicos podem ser removidos por queima, em temperaturas controladas, dando origem à porosidade interna. Esses materiais podem ter um elevado grau de porosidade, formando os chamados aerogéis. Por meio dessa metodologia, nanopartículas metálicas podem ser introduzidas no processo, gerando catalisadores em que a proporção dos sítios ativos é bastante alta em relação ao material do suporte, melhorando a eficiência de catálise. Além disso, aumentando a interligação dos canais e a movimentação das moléculas no interior do material catalítico, o processo catalítico torna-se bastante favorecido.

## **NANOTECNOLOGIA E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

Os próximos 50 anos serão decisivos para o destino da humanidade, levando-se em conta a expansão populacional e a demanda crescente por alimento, água e energia (8).

É importante notar que a população do planeta cresceu por um fator de dez vezes em apenas três séculos, passando de 600 milhões de habitantes no ano 1700, para 6,3 bilhões em 2003. A população dobrou nos últimos 40 anos, crescendo ao ritmo anual de 2,1% até 1970, porém desacelerando gradualmente até 1,2% em 2002. A fertilidade global caiu de cinco filhos por casal, em 1970, para 2,7 nos últimos anos. Mesmo com um menor ritmo de crescimento, por volta de 2050, a população do globo estará em torno de 9 bilhões de habitantes, se forem implementados esforços de controle de natalidade, ou 12 bilhões, se for mantido o ritmo atual.

O crescimento populacional, entretanto, será desigual nas várias regiões do planeta, e deverá concentrar-se principalmente em países como a Índia, China, Paquistão, Bangladesh e Nigéria. No ano 2000, os países economicamente mais ricos na Europa, América do Norte, Austrália, Nova Zelândia e Japão, abrigavam cerca de 1,2 bilhão de pessoas (20%). A grande maioria, 4,9 bilhões (80%), habitava países mais pobres e menos desenvolvidos. A taxa de crescimento populacional nos países ricos tem sido de 0,25% ao ano, comparado com 1,44% (seis vezes maior) nos países em desenvolvimento. Em duas décadas os países ricos estarão com taxa zero, devendo declinar gradualmente, até -0,14% ao ano, por volta de 2050. A população dos países mais pobres continuará crescendo, embora mais lentamente, com uma taxa anual de 0,4% em 2050. Nesse cenário, em 2050, os países mais pobres abrigarão 7,7 bilhões de habitantes (86%), enquanto os países mais ricos continuarão com uma população próxima da atual.

Em 1999, existiam 800 milhões de pessoas subalimentadas no planeta. Em 2020, mantida a atual perspectiva de produção de grãos, o número de pessoas famintas chegará a 2,3 bilhões. As reservas de água potável são igualmente preocupantes. Embora dois terços da superfície do planeta sejam preenchidos por água, apenas 0,002% pode ser utilizada pelo homem. Os estudos indicam que se não forem tomadas providências, em 2025, dois entre cada cinco habitantes da Terra viverão sob privação de água, principalmente no norte da África e no sul da Ásia. O Brasil está entre os 23 países com mais água per capita, e ocupa o vigésimo terceiro lugar em termos de qualidade de água, na lista encabeçada pela Finlândia, Canadá, Nova Zelândia, Reino Unido, Japão, Noruega, Rússia e Coreia do Sul.

A expectativa de vida global em 2000-2005 é de 65 anos, e em 2045-2050 poderá ser de 74 anos. Nos países ricos, nesses mesmos períodos, a expectativa de vida é de 76 anos, e poderá atingir 82 anos; ao passo que nos países em desenvolvimento, passará de 63 para 73 anos. Infelizmente, 90% dos recursos disponíveis no planeta, para a saúde, destinam-se aos 10% mais ricos de sua população. Esse desequilíbrio conhecido como “10/90” explica por que no Japão e nos Estados Unidos, a expectativa de vida já se aproxima de 85 anos, enquanto que em 32 países ela é menor do que 40 anos, e em Serra Leoa é de apenas 26 anos!

Hoje, a distribuição por faixa etária nos países ricos segue um perfil homogêneo, desde o nascimento até os 70 anos, estreitando-se gradualmente depois, até os 90 anos. Em 2050, a maioria dessa população estará distribuída entre as faixas etárias dos 50 aos 85 anos. Nos países mais pobres, o perfil atual de distribuição etária é piramidal, com uma base larga que se estende até os 20 anos, declinando gradualmente até os 80 anos. Em 2050, a base da pirâmide se estenderá até os 50 anos, passando então a declinar até os 90 anos. Essa previsão foi feita pelo US Census Bureau em 2003, com base em projeções estatísticas a partir dos dados disponíveis.

Assim, o aumento global da longevidade pode ser traduzido em termos da melhoria da qualidade de vida, e vice-versa. Para se chegar a um desenvolvimento sustentável, inúmeras variáveis terão que ser equacionadas. Será necessário aumentar a produção de alimentos, disponibilizar mais água potável, e gerar energia renovável, questões que dificilmente serão resolvidas sem o uso da tecnologia.

Com o desenvolvimento de nanocatalisadores biomiméticos, processos importantes como a fixação do nitrogênio molecular poderão levar à produção de fertilizantes mais baratos, aumentando a oferta de alimentos. Da mesma forma, a fixação microbiológica do nitrogênio molecular, introduzida no Brasil pela cientista Johana Döbereiner (Embrapa), tem sido um recurso muito importante na agricultura. Novas técnicas de encapsulamento, e de manipulação genética, poderão contribuir para aumentar o rendimento da fixação biológica de nitrogênio.

Processos de descontaminação de águas poderão ser aperfeiçoados, empregando nanopartículas de dióxido de titânio ativadas por luz, ou nanocatalisadores ativados por oxigênio molecular. Isso contribuirá para o reaproveitamento das águas industriais, diminuindo a demanda e poupando as reservas.

Os avanços nos dispositivos moleculares fotossintéticos, em especial, as células fotoeletroquímicas, poderão abrir perspectivas importantes na área de conversão de energia. Novos catalisadores biomiméticos, a exemplo da enzima F-430 existente nas bactérias metanogênicas, poderão viabilizar a produção de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) combustível a partir do gás carbônico, com impacto bastante positivo na área de energia renovável. Células a combustível, utilizando membranas nanoporosas e nanocatalisadores, poderão tomar o lugar dos motores à combustão, tão poluentes, barulhentos e de baixa eficiência.

A medicina que poderá se consolidar em novos patamares por meio dos avanços da nanotecnologia, com certeza terá um papel importante na longevidade e na qualidade de vida do homem.

## CONCLUSÃO

Os próximos 50 anos serão decisivos para o futuro da humanidade, diante da previsão de esgotamento dos recursos naturais não-renováveis e da expansão populacional. A manutenção e elevação da qualidade de vida só será possível com o advento de tecnologias que utilizem matérias-primas e fontes de energia renováveis, e que sejam ambientalmente corretas. Nesse sentido, a nanotecnologia tem muito a contribuir por meio do desenvolvimento de processos inspirados na natureza, e do ganho em potencial possibilitado pelos nanomateriais, nanomáquinas, nanodispositivos e nanoeletrônica. Contudo, tal ganho de poder precisará ser bem administrado e conduzido, para evitar suas conseqüências perversas, valorizando-se os preceitos éticos, a educação, a consciência, e o humanismo acima de tudo.

*Agradecimentos: CNPq, Fapesp, Renami e IM2C.*

## REFERÊNCIAS

- 1 TOMA, H. E. *O mundo nanométrico: a nova dimensão do século*. [ S. l. ] : Oficina dos Textos, 2004.
- 2 NATIONAL SCIENCE AND TECHNOLOGY COUNCIL. (United States). *National nanotechnology initiative: detailed technical report*. [S. l.], 2002.
- 3 DAGANI, R. Nanomaterials: safe or unsafe? *Chem. Eng. News*, v. 81, n. 30, 2003.
- 4 CRICHTON, M. *Prey*. New York : HarperCollins, 2002.
- 5 AMERICAN HUMANIST ASSOCIATION. (United States). *Humanism and its aspirations: humanist manifesto III*. [S. l.], 2003.
- 6 RITTER, S. K. Green chemistry. *Chem. Eng. News*, v. 79, n. 27, 2001.

7 DESIMONE, J. M. Practical approaches to green solvents. *Science*, v. 297, n. 5582, 2002. 8 COHEN, J. E. Human population: the next half century. *Science*, v. 302, n. 1172, 2003.

## **Resumo**

A nanotecnologia vem se expandindo como uma onda de inovação que nos faz vislumbrar os limites da evolução ao delinear um mundo paradoxalmente mais próximo da natureza, acionado por máquinas moleculares, sistemas artificiais inteligentes e auto-replicantes; e dispositivos sensoriais integrados capazes de atuar muito além dos nossos sentidos. Entretanto, essa onda, que vem se propagando numa exponencial crescente, poderá distanciar e isolar cada vez mais o ser humano que, defasado em sua capacidade de compreender e participar das transformações do mundo em que vive, terá seus temores acentuados, aumentando sua dependência dos que detêm o conhecimento e exercitam o poder. As preocupações éticas são portanto essenciais, porém devem ser acompanhadas pela reeducação continuada, maior consciência e humanismo.

## **Abstract**

*Nanotechnology is an expanding wave of innovation which can lead us to the evolutionary limits, shaping a new world inspired on nature's paradigms, with versatile molecular machines, artificial intelligent and self-replicating systems, and integrated sensorial devices capable of performing far beyond our senses. As an exponentially propagating wave, however, it can not always achieve the necessary resonance with the human being in his difficulties to understand the changing world; thus, enhancing his fears and dependence on those who detain the knowledge and power. Ethical concerns are therefore critically important, in association with efforts to promote education, consciousness and humanism.*

## **O autor**

HENRIQUE E. TOMA. Professor titular do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP), é membro da Academia Brasileira de Ciências e da Third World e Academy of Sciences (TWAS). Entre as distinções recebidas estão o Prêmio Heinrich Rheinboldt (1987), TWAS (1996), Guggenheim (1999), Fritz Feigl (2001) e a Comenda da Ordem Nacional do Mérito Científico (2002).