

## AS RELAÇÕES ENTRE CIÊNCIA E TECNOLOGIA: O CASO DA NANOTECNOCIÊNCIA

---

Cátia Gama  
Oswaldo Pessoa Júnior

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia está trazendo grandes mudanças para a sociedade contemporânea. Nanociência e Nanotecnologia referem-se respectivamente ao estudo e à manipulação de materiais e dispositivos que possuem pelo menos uma de suas dimensões na ordem de dezenas de nanômetros. (SCHULZ, 2005, p. 58; WOLF, 2009, p. 1) A Nanotecnologia é caracterizada por grande abrangência e por sua natureza interdisciplinar, utilizando um conjunto de técnicas baseadas na Física Microscópica, na Química e na Biologia Molecular.

Pretende-se, com a manipulação de átomos e moléculas, entender as novas propriedades da matéria e modificar a forma com que está arranjada, obtendo novos produtos mais resistentes, mais baratos, mais leves e, dessa maneira, transformar profundamente as áreas de Engenharia de Materiais, Eletrônica, Medicina, Energia, Meio Ambiente, Biotecnologia, Agricultura e Segurança Nacional. (ALTMANN, 2005, p. 35; SCHULZ, 2009, p. 34; SILVA, 2002)

A Nanociência e a Nanotecnologia trouxeram imensos e ainda não precisamente mensurados impactos científicos e econômicos, levando países de todo o mundo, especialmente os EUA, o Japão e os da Comunidade Europeia, a traçarem planos de iniciativa e financiamento privilegiados para manterem a competitividade de suas empresas no mercado. Assim, o impacto da Nanotecnologia deverá ser

imenso no século XXI, sendo acompanhado pelo desenvolvimento dessa ciência que estuda a fronteira entre os mundos clássico e quântico.

Neste trabalho, apresentamos alguns princípios da Nanociência e da Nanotecnologia, enfocando brevemente a importância das técnicas de microscopia. Visando descrever alguns novos produtos desenvolvidos e outros ainda em desenvolvimento, tomaremos como estudo de caso os nanomateriais de carbono. Buscamos também avaliar os possíveis impactos da Nanociência e da Nanotecnologia para a sociedade e meio ambiente, levantando questões relativas ao engajamento público em Nanotecnologia.

## DEFINIÇÃO DE NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA

Pode-se definir Nanociência como a ciência relacionada à manipulação da matéria ao nível molecular, que busca entender o comportamento de materiais que ocorrem na escala nanoscópica. O prefixo grego *nano* é utilizado para especificar um bilionésimo ( $10^{-9}$ ); assim, um nanômetro (nm) é  $10^{-9}$  m, ou seja, um bilionésimo de metro. A Nanociência é uma disciplina interdisciplinar, envolvendo contribuições da Física, da Química e da Biologia. A Nanotecnologia, por sua vez, aproveita a criação de novos materiais para desenvolver novos produtos e dispositivos. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 10; WOLF, 2009, p. 1)

Não há sempre uma distinção clara entre as pesquisas de Nanociência e de Nanotecnologia, termos que muitas vezes aparecem como que fundidos no termo Nanotecnociência. (SCHULZ, 2008, p. 1)

Apesar de o interesse humano pelo estudo e aplicação da Nanociência e da Nanotecnologia ser recente, estruturas nanométricas complexas estão presentes na natureza há bilhões de anos, desde quando os átomos e moléculas começaram a se organizar em estruturas complexas autorreplicativas, ácidos nucleicos como RNA e DNA, constituindo o passo fundamental para o surgimento da vida. De fato, o surgimento das células, com toda a sua complexidade e auto-organização, é um exemplo de nanossistemas biológicos que evoluíram na natureza. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 11-12; WOLF, 2009, p. 2)

Na cultura humana, um dos primeiros exemplos de processos envolvendo isolamento de moléculas foi com a tinta nanquim, produzida pelos chineses há cerca de 2 mil anos. O nanquim é constituído de partículas nanométricas de grafite suspensas em água. Os chineses descobriram a vantagem de adicionar goma arábica à emulsão, o que impede que as partículas de grafite se juntem. (MELO;

PIMENTA, 2004, p. 12) Também na antiga civilização egípcia, quando as pessoas incorporavam cores ao vidro, eles estavam trabalhando, sem saber, com nanopartículas. Essa técnica foi aperfeiçoada nos vitrais das igrejas medievais. Os vidreiros da época descobriram que a adição de partículas de ouro ou prata de diversos tamanhos aos vidros tinha a característica de tornar as cores dos vidros variáveis e brilhantes. Tal efeito óptico é causado pelas nanopartículas compostas de ouro e prata. O exemplo mais antigo dessa técnica é o cálice de Licurgo, que remonta ao século IV d.C. Esse cálice romano é feito de vidro que parece verde sob luz refletida, mas é vermelho sob luz transmitida através dele. (ALVES, 2004, p. 28; SCHULZ, 2005, p. 62)

### MICROSCOPIA ATÔMICA

A hipótese da existência de átomos surgiu na Antiguidade, mas foi apenas no séc. XIX que se passou a ter ideia de suas dimensões físicas, sendo que apenas no início do séc. XX que essa hipótese tornou-se consensual. (ROCHA, 2007)

As primeiras imagens mostrando átomos individuais foram obtidas com o microscópio iônico de campo (*field ion microscope*), inventado por Erwin W. Müller, físico alemão da Penn State University. A observação foi feita em 1955, juntamente com seu aluno indiano, Kanwar Bahadur, representando o primeiro grande passo para a superação da noção de que os átomos seriam pequenos demais para serem de alguma forma individualmente identificados. (CASTILHO, 2003, p. 367-372; REGIS, 1997, p. 50-51)

Em 1959, Richard Feynman ministrou uma palestra intitulada *Há mais espaços lá embaixo*, que é geralmente considerada o nascimento da Nanotecnologia. (MARTINS, 2005; MELO; PIMENTA, 2004, p. 12; REGIS, 1997, p. 148-150) Nessa palestra, ele afirmou:

[...] não tenho medo de considerar a questão final em relação a se, em última análise – no futuro longínquo –, poderemos arranjar os átomos da maneira que queremos; os próprios átomos, no último nível de miniaturização! (FEYNMAN, 2004, p. 151)

Assim, propôs ao público científico uma ideia inovadora, quando as técnicas de manipulação artificial de átomos e moléculas estavam ainda engatinhando e a ideia de usar isso para a criação de novos produtos pode ser considerada

visionária. Essa ideia, de podermos criar nanossistemas artificialmente por meio da manipulação de átomos e moléculas, inspirou alguns cientistas a trabalharem no desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia.

Em 1981, no laboratório da International Business Machines Corporation (IBM) em Zurique, Gerd Binnig e Heinrich Rohrer deram um passo fundamental para a criação dessa nova área tecnocientífica, ao construírem o microscópio de varredura por tunelamento eletrônico – *Scanning Tunneling Microscope* (STM). Com ele, mais um limite humano foi superado, possibilitando, pela primeira vez, a geração de imagens detalhadas de superfícies com resolução atômica. (ALVES, 2004, p. 24; CHAVES, 2002; REGIS, 1997, p. 185-188)

O funcionamento do microscópio de tunelamento por varredura é conceitualmente simples: uma agulha extremamente fina, cuja ponta é constituída de alguns poucos átomos ou até mesmo de um único átomo, “tateia” uma superfície condutora ou semicondutora sem nela tocar, dela afastada de menos de um nanômetro. Durante a varredura da agulha, quando aplicada uma diferença de potencial elétrico entre a amostra e a ponta, ocorre a passagem de uma corrente de tunelamento entre a agulha e a superfície e, com base nessa minúscula corrente elétrica, um computador constrói uma imagem extremamente magnificada da superfície, na qual ficam visíveis os seus átomos. Dessa forma, pela primeira vez, o relevo atômico da superfície de um corpo pôde ser “visto” e investigado. (CHAVES, 2002; SILVA, 2002; WOLF, 2009, p. 160-165)

O STM deu origem a uma família de instrumentos de visualização e manipulação na escala atômica, coletivamente denominados microscópios de sonda de varredura, ou microsondas eletrônicas de varredura – *Scanning Probe Microscopes* (SPM) –, que constituem o paradigma atual para a instrumentação em Nanociência. Além da visualização nanométrica da superfície, os SPMs permitem “manipular” átomos e moléculas. Esses feitos foram demonstrados em 1990, quando Donald Eigler e Erhard Schweizer, do laboratório da IBM em Almaden, Califórnia, escreveram o logotipo da IBM posicionando precisamente 35 átomos de xenônio sobre uma superfície de níquel. (CHAVES, 2002)

Esses microscópios são constituídos de três elementos que precisam estar acoplados. Primeiro, a sonda em si, objeto que precisá ter uma resolução nanoscópica. Segundo, essas sondas precisam ser deslocadas sobre o objeto de estudo de forma controlada, com precisão da ordem de nanômetros ou mesmo angstroms (décima parte de nm). Por último, a variação da medição de uma propriedade física,

em função da posição da sonda, é registrada em imagens do objeto estudado (ou manipulado) em escala atômica. (SCHULZ, 2007, p. 8)

Foi o desenvolvimento de técnicas para manipulação da matéria na escala nanoscópica que possibilitou os grandes avanços da Nanociência e da Nanotecnologia, levando à identificação de propriedades físicas e químicas importantes para o desenvolvimento de novos dispositivos e materiais, que está transformando nossa relação com os diversos setores da vida cotidiana.

Existem dois procedimentos gerais para obtenção de materiais em escala nanométrica. O primeiro é conhecido como *top-down* (de cima para baixo), no qual um objeto nanométrico é obtido pela eliminação do excesso de material existente em uma amostra maior do material: isto é feito por litografia e engenharia de precisão. O segundo procedimento é o *bottom up* (de baixo para cima), às vezes denominado Nanotecnologia molecular, que consiste na criação de estruturas orgânicas, inorgânicas, e mesmo híbridas, átomo por átomo, molécula por molécula. A obtenção de materiais com o procedimento *bottom up* pode ocorrer mediante técnicas de síntese química, automontagem (*self assembly*) e montagem posicional, sendo que há uma tendência de convergência entre estas técnicas. (ALVES, 2004, p. 29; WHITESIDES; LOVE, 2008, p. 21; WOLF, 2009, p. 133)

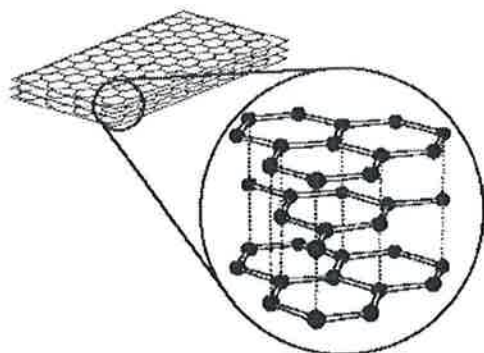
## NANOMATERIAIS DE CARBONO

Há diversas propostas de classificação das áreas de pesquisa da Nanociência e da Nanotecnologia. No artigo em inglês da *Wikipédia*, *Nanotechnology*, encontramos a seguinte classificação geral em seis grandes áreas: Nanomateriais, Nanomedicina, Automontagem Molecular, Nanoeletrônica, Microscopia de Sonda de Varredura, e Nanotecnologia Molecular. Não pretendemos cobrir todas essas áreas, mas apenas focar uma linha específica de pesquisa, a dos nanomateriais de carbono. (NANOTECHNOLOGY, [entre 2003 e 2014])

O carbono é nosso conhecido do carvão e da fuligem negra de certas chamas. Ele também é o elemento presente no grafite dos lápis e lapiseiras. O grafite, que é encontrado em minas no Sul do Brasil e em outras partes do globo, é formado por camadas planares de átomos, ligados em uma estrutura hexagonal, lembrando alguns tipos de tela de galinheiro, camadas essas que isoladamente se chamam grafeno. No grafite, essas camadas são empilhadas e a ligação atômica entre as camadas é mais fraca do que dentro de uma mesma camada de grafeno, que possui

uma estrutura extremamente estável, nas condições normais de temperatura e pressão (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura do grafite. Camadas de grafeno, consistindo de estruturas hexagonais, são empilhadas com ligações mais fracas entre si



Fonte: NEW TRADITIONS PROJECT, 1996.

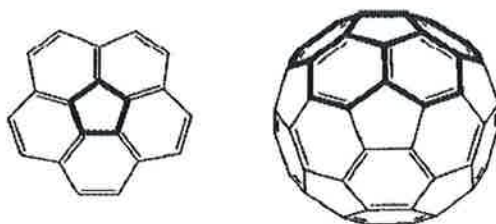
O carvão e a fuligem não têm uma estrutura tão ordenada e podem ser considerados amorfos (sem forma definida) ou pode-se considerar que eles sejam constituídos de minúsculos pedacinhos de grafite, quebrados e misturados sem ordenação.

Parece incrível que o diamante, tão duro e transparente, seja constituído do mesmo elemento que o grafite, que é preto e maleável. De fato, é possível transformar o grafite em diamante sob altas pressões. O que ocorre é que as ligações entre os átomos de carbono se modificam e o diamante passa a apresentar uma estrutura tetraédrica. As ligações do diamante são menos estáveis que a do grafeno, mas no diamante os átomos ficam mais compactados, o que torna o diamante mais estável a grandes pressões. (NEW TRADITIONS PROJECT, 1996)

Em 1985, Harold Kroto e colaboradores, procurando mimetizar condições interestelares para provar a existência de grandes cadeias de carbono no espaço sideral, realizaram o seguinte experimento: No laboratório de Robert Curl e Richard Smalley, na Rice University (EUA), incidiram em uma placa de grafite um *laser* pulsado de alta frequência e energia, sob uma corrente de hélio. O calor extremo produzido no grafite gerou um estado de plasma, em que os elétrons se separam de seus núcleos. Deste estado, formaram-se agregados de carbono, que foram analisados em um espectrômetro de massas, instrumento que mede as massas de moléculas. Nessa

análise, os cientistas identificaram a formação de moléculas constituídas apenas por átomos de carbono, sendo que as com massas correspondendo a 60 e 70 átomos de carbono eram mais abundantes. Ao se estudar a forma geométrica dessas moléculas de  $C_{60}$  e  $C_{70}$ , que são bastante estáveis, descobriu-se que são excepcionalmente simétricas, possuindo a forma de uma bola de futebol (Figura 2).

Figura 2 - À direita, o fulereno  $C_{60}$ , também chamado de buckminsterfulereno ou buckybola, molécula com 60 átomos de carbono, dispostos nos vértices de um isocaedro truncado, formado por 12 pentágonos e 20 hexágonos. À esquerda, a molécula de coranuleno  $C_{20}$



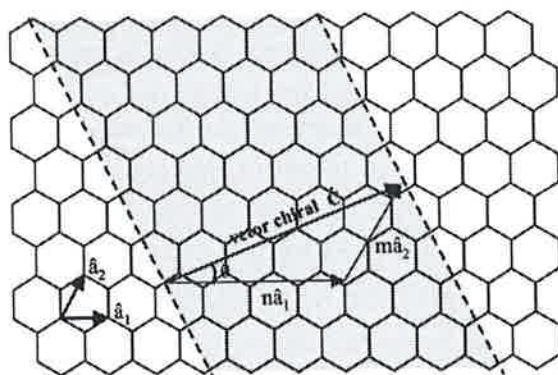
Fonte: KRUEGER, 2010, p. 34.

O nome de fulerenos foi dado a essas moléculas, em homenagem ao arquiteto Buckminster Fuller, criador dos domos geodésicos que seguem o mesmo princípio de simetria e estabilidade. Dependendo da substância que era misturada ao  $C_{60}$ , ele adquiria um comportamento elétrico diferente, podendo funcionar como isolante, condutor, semicondutor ou supercondutor. A descoberta dos fulerenos rendeu o prêmio Nobel de química para Kroto, Curl e Smalley em 1996, sendo que os dois outros coautores da descoberta eram alunos de pós-graduação. (ALVES, 2004; KRUEGER, 2010)

Em 1991, Sumio Iijima observou, por meio da microscopia eletrônica, a existência de compostos formados por múltiplas camadas de folhas de grafeno enrolados de forma cilíndrica. Estes compostos foram nomeados nanotubos devido à sua forma tubular e ao fato de seu diâmetro ter dimensões nanométricas. Posteriormente, estes nanotubos de múltiplas camadas – *Multi-Wall Carbon Nanotubes* (MWCNs) –, foram sintetizados por meio de técnicas semelhantes às utilizadas para a obtenção dos fulerenos- $C_{60}$ . Em 1993, foram obtidos os nanotubos de uma única camada, os *single-wall carbon nanotubes* (SWCNs), formados por uma única folha de grafite enrolada de forma cilíndrica. (IJIMA, 1991; IJIMA; ICHIHASHI, 1993)

Os nanotubos de carbono possuem propriedades mecânicas e eletrônicas notáveis. Para entendermos essas propriedades, é necessário levar em conta seu diâmetro e sua quiralidade. A palavra quiral vem do grego para mão, pois nossas duas mãos têm quiralidade diferente, dado que sua orientação tridimensional é diferente. No nosso contexto, a quiralidade se refere à torção de um nanotubo, que ocorre em um certo sentido e com um certo ângulo de helicidade,  $\theta$ . Estes dois parâmetros, diâmetro do nanotubo e helicidade, levam ao cálculo dos chamados índices de Hamada:  $(n,m)$ . Um nanotubo de carbono é constituído de uma folha de grafite (grafeno) enrolada de tal forma que coincidam dois sítios cristalograficamente equivalentes de sua rede hexagonal. O vetor quiral  $C_h$  define a posição relativa dos dois sítios, e é definido mediante dois números inteiros  $(n,m)$  e pelos vetores unitários da rede hexagonal  $a_1$  e  $a_2$ , onde  $C_h = na_1 + ma_2$ , como indicado na Figura 3. (COLUSSI, 2008; HERBST; MACÊDO; ROCCO et al., 2004; KRUEGER, 2010)

Figura 3 - Diagrama da formação de nanotubos de carbono, a partir de uma folha de grafite. Neste exemplo, o tubo se forma enrolando a região cinza. Os resultantes índices de Hamada são  $(4,2)$



Fonte: HERBST e colaboradores (2004, p. 986).

Em função dos índices de Hamada  $(n,m)$ , um nanotubo de carbono é metálico quando a diferença  $n - m$  for zero ou múltiplo de 3, caso contrário será um semicondutor. Em 2001, Cees Dekker, biofísico holandês, demonstrou com seu grupo que os nanotubos poderiam ser utilizados como transistores ou outros dispositivos eletrônicos (POSTMA et al., 2001). No mesmo ano, a equipe da IBM (nos EUA) construiu uma rede aleatória de nanotubos, chamada nanorrede, que permite a construção de dispositivos eletrônicos, como transistores transparentes, células solares e sensores de baixo custo. (ALVES, 2004, p. 25; GRUNER, 2008)

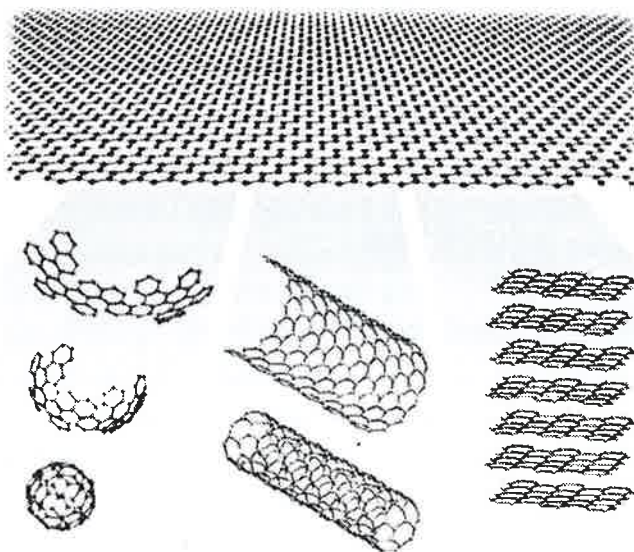


Além das notáveis propriedades eletrônicas dos nanotubos de carbono, eles possuem alta resistividade e são também muito leves, perfeitos para a construção de fibras e polímeros. São excelentes condutores de calor, podendo ser utilizados como dissipadores de calor. Possuem a propriedade de luminescência, propriedade importante para marcadores e cintiladores em sistemas biológicos. São estruturas cilíndricas perfeitas e estão sendo utilizados para fabricação de pontas para os microscópios de resolução atômica e para antenas.

Em 2004, os físicos russos Andre Geim e Kostantin Novoselov, da Universidade de Manchester, conseguiram isolar um único plano do grafite por esfoliação mecânica do grafite, utilizando uma fita adesiva. (GEIM; NOVOSELOV, 2007) Dessa forma, obtiveram, pela primeira vez, o grafeno, material estável e flexível que promete revolucionar a indústria de semicondutores. Esse trabalho rendeu-lhes o prêmio Nobel de Física de 2010.

Grafeno é o nome dado a uma monocamada planar de átomos de carbono dispostos em uma rede bidimensional hexagonal e é base para outras estruturas de carbono, como os fulerenos-C60, os nanotubos de carbono e o grafite, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - Plano de grafeno originando diferentes estruturas alotrópicas do carbono



Fonte: GEIM; NOVOSELOV (2007, p. 184).

A preparação do grafeno em laboratório abriu as portas para o estudo experimental de suas propriedades. Uma aplicação é na área de transporte elétrico em dispositivos do tipo transistores de efeito de campo, à base de grafeno. Devido à sua alta qualidade cristalina, o grafeno é o melhor condutor elétrico à temperatura ambiente que se conhece, apresentando "transporte balístico": os elétrons se movem livremente, sem serem dispersados pelo meio. O caminho livre médio dos portadores pode chegar a centenas de nanômetros e sua condutividade térmica nunca é menor do que um quantum de condutância. (GEIM; KIM, 2008, p. 83-84; MAFRA, 2008, p. 2)

Uma propriedade elétrica inusitada do grafeno é que elétrons e buracos têm massa de repouso efetiva nula e se comportam como partículas relativísticas, sendo descritos pela equação de Dirac para partículas de spin  $\frac{1}{2}$ . A velocidade atingida por esses portadores de carga é chamada "velocidade de Fermi" ( $v_F \approx 10^6$  m/s). (NOVOSELOV et al., 2005)

Em suma, o grafeno exibe uma alta estabilidade química e mecânica e uma série de outras propriedades, que o tornam um material promissor para o mercado tecnológico. Há uma variedade de dispositivos que poderão ser feitos com grafeno, que já aparece em protótipos de transistores, memórias, monitores flexíveis, baterias, sensores de gás de alta sensibilidade e outros dispositivos. (ASHLEY, 2009, p. 18; GEIM; KIM, 2008, p. 87)

No geral, porém, até agora, foram dados apenas os primeiros passos para o desenvolvimento da Nanotecnologia, em direção à construção de máquinas e circuitos complexos, átomo a átomo. O desenvolvimento de novos materiais e o entendimento de propriedades físicas fundamentais mostram que a Nanociência e a Nanotecnologia apresentam grande potencial para mudar radicalmente produtos e processos. (ROUKES, 2008)

## LEI DE MOORE E O FUTURO COM A NANOTECNOLOGIA

Gordon Moore, um dos cofundadores da Intel, formulou uma "lei", nos primórdios da microeletrônica, que afirma que é constante o intervalo de tempo que demora para dobrar o número de componentes (transistores) de um *chip*. Em 1965, previu que o tempo para dobrar esse número de componentes seria de 12 meses, mas, em 1975, reviu essa previsão, anunciando que o tempo médio necessário para dobrar o número de transistores seria de 24 meses. (SCHULZ, 2008, p. 3; WOLF, 2009, p. 7-8)

Em seu artigo, Moore (1965) exibe um excelente planejamento estratégico, mas nada escreve sobre a necessidade de uma ruptura tecnológica para dar continuidade a sua lei, já que limitou seu foco à tecnologia à base do silício. Ao aplicarmos sua lei para a diminuição das dimensões características dos componentes de um circuito integrado, concluiríamos que por volta de 2040 essas dimensões seriam da ordem do diâmetro de um único átomo! Isso não é realista, indicando que a lei de Moore só pode valer para uma duração finita de tempo.

No entanto, há um fator que complica esse quadro de previsões, que é a possibilidade de rupturas tecnológicas. O avanço da Nanociência surge como uma tal ruptura tecnológica, e ainda não temos como avaliar suas reais possibilidades para contribuir para a manutenção da lei de Moore por mais tempo. Nanoestruturas de carbono surgem como uma opção de substituição do silício em dispositivos transistores e como sua matéria prima é abundante na natureza, elas podem baratear o custo da produção de dispositivos eletrônicos. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 15)

Vemos assim que é inegável o impacto que a Nanociência está tendo para o desenvolvimento da tecnologia. Porém, o desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia tem trazido também expectativas e concepções equivocadas a respeito da Nanotecnologia.

### **SOBRE A POSSIBILIDADE DE UMA MECÂNICA MOLECULAR**

Ligações tetraédricas, como ocorrem em diamantes, silício e elementos metálicos, são a base para a chamada família de nanoestruturas diamantoides. Eric Drexler (1986) sugeriu que tais estruturas moleculares poderiam ser desenhadas e construídas para formar réplicas, em escalas nanoscópicas, de dispositivos mecânicos macroscópicos comuns, como mancais e bombas, levando ao desenvolvimento de máquinas, dispositivos robóticos e fábricas autorreplicantes em escala molecular. (COLLINS, 2008; REGIS, 1997, p. 181-185)

Tais especulações foram duramente criticadas por Richard Smalley, já mencionado, que argumentou convincentemente que tais estruturas não podem ser fabricadas usando pontas de um microscópio eletrônico de varredura. Smalley (2001) salienta que um ambiente adequado para a construção de uma estrutura diamantoide como imaginada por Drexler, digamos com em torno de 2800 átomos, teria que envolver temperaturas bem acima de 1.000 K, um ambiente totalmente privado de oxigênio, provavelmente rico em hidrogênio e contendo quantidades estequiométricas dos elementos para a nanoestrutura específica. Seria

extremamente difícil manipular átomos em tais ambientes. Qualquer ponta é grande demais para permitir o acesso a locais atômicos em uma estrutura complexa. Além disso, Smalley aponta a inadequação de se usar uma única ponta isolada, pois seria preciso várias pontas trabalhando conjuntamente para atingir o objetivo proposto. Por fim, seria extremamente difícil obter uma estrutura encurvada por meio da deposição um a um de átomos de carbono. (MELO; PIMENTA, 2004, p. 18-19; WOLF, 2009, p. 248-249)

Vemos assim que uma mecânica molecular, nos moldes a que estamos acostumados em nosso cotidiano, é uma possibilidade tecnologicamente bastante remota. Outra ideia acoplada a este ideal é a de uma mecânica molecular autorreplicante, em que mecanismos automáticos construiriam máquinas nanoscópicas em série. Porém, não há na natureza algo que remotamente assemelhe-se a uma tal mecânica molecular. Na natureza, enzimas aplicam-se a moléculas bem específicas para catalisar sua formação ou para cortá-las em locais específicos. Mais do que trabalhar com átomos, os processos de montagem na natureza funcionam a partir de um grande estoque de moléculas e polímeros, que apresentam auto-organização. Tudo isso indica que uma futura engenharia nanoscópica deva se inspirar nos processos moleculares de sistemas vivos, e não em dispositivos mecânicos macroscópicos. (WOLF, 2009, p. 250-252)

## OS PERIGOS DE MÁQUINAS MOLECULARES AUTORREPLICANTES

Ao lado da euforia que acompanha o campo da Nanotecnologia, tem sempre havido também avisos alarmantes de possíveis desastres. Em seu livro, *Motores da Criação*, Drexler (1986) imagina o cenário em que nanorrobôs replicantes se espalham perigosa e descontroladamente pela Terra, como um câncer ou gosma acinzentada. Fukuyama (2003), em seu livro, *Nosso Futuro Pós-humano*, também imagina máquinas autorreplicantes de escala molecular, capazes de se reproduzir fora de controle, destruindo seus criadores.

Esse perigo em particular, porém, é descartado por outros autores, como Wolf (2009, p. 252), que não considera tecnologicamente viável uma máquina molecular autorreplicante. O perigo estaria muito mais na Biotecnologia e na Engenharia Genética. Na chamada Biologia Sintética, bactérias são manipuladas geneticamente para produzir proteínas que não existem na natureza, e já foram dados os primeiros passos para a criação artificial de uma célula viva. Há também o sonho de alguns de criarem seres humanos modificados, tanto geneticamente

quanto acoplados a dispositivos tecnológicos. A Nanotecnologia poderá ter um papel coadjuvante, mas essencial na realização desse ideal pós-humano ou trans-humano.

Enquanto algumas pessoas analisam a questão como uma oportunidade para aumentar as habilidades da raça humana, outras encaram o assunto como a possibilidade de graves injustiças. A oportunidade de procriar uma classe gerencial superior e uma classe trabalhadora inferior pareceria possível para um regime totalitário. Fukuyama (2003) discute essas questões e conclui que um controle internacional nesse sentido será importante.

Outro autor que discute semelhantes cenários futuros é Rodney Brooks (2003), em seu livro *Carne e Máquinas*, imaginando a época em que não haverá mais diferença entre homens e robôs! Novamente, podemos imaginar que a Nanotecnologia desempenhará um papel essencial nessa integração homem-máquina, e que o perigo não estará na autorreplicação descontrolada de nanorrobôs, mas no poder excessivo que essa tecnologia poderá trazer para certos grupos, em detrimentos de outros, e na possibilidade de acidentes biotecnológicos. Indo mais além, Brooks (2003, p. 200) idealiza um possível cenário de desastre envolvendo a “libertação dos robôs” do domínio humano.

## ENGAJAMENTO PÚBLICO EM NANOTECNOLOGIA

Há um amplo campo da ética e das questões sociais envolvidas no desenvolvimento da Nanociência e da Nanotecnologia, consolidadas com o surgimento em 2003 da revista científica intitulada *Nanoethics* (Nanoética). Essa discussão possibilita a junção de pesquisas feitas por sociólogos, economistas, historiadores e filósofos sobre a influência da Nanotecnologia na sociedade e no meio ambiente, buscando a integração das discussões dos nanocientistas com o público não especialista, e incluindo a dimensão social como fator relevante para o desenvolvimento da pesquisa. (BRUNE et al., 2006, p. 399-438; MARTINS, 2005; MODY, 2008, p. 41-42)

Uma questão levantada na *Nanoethics* refere-se a quais políticas desenvolvidas em torno da Nanotecnologia poderiam contribuir para que a sociedade tivesse uma maior participação nas decisões relativas à produção e uso de nanomateriais, levando em conta os potenciais riscos associados, naquilo que se pode chamar consentimento informado. (SCHULZ, 2009, p. 91-100) O conceito central da nanoética e do engajamento público em Nanotecnologia considera fundamental o

acesso às informações, a compreensão dos procedimentos e técnicas, a capacidade de avaliar riscos, e a competência para se posicionar nas discussões sobre a introdução de novas tecnologias e produtos no nosso cotidiano. A Nanotecnologia, devido à sua característica interdisciplinar, está criando novas áreas de intersecção de conhecimentos. Essa transdisciplinaridade pode contribuir para um fortalecimento do diálogo constante entre ciência e sociedade. (ESCALANTE, 2005, p. 260) Nesse sentido, a área de Ensino de Ciência deverá desempenhar um papel importante.

A National Science Foundation, entidade de amparo à pesquisa do governo estadunidense, considera que a Nanotecnologia irá fundamentalmente mudar a ciência, a tecnologia e a sociedade. O mercado global em Nanotecnologia atingiu patamares da ordem de US\$ 11,6 bilhões em 2007, e estima-se que será de US\$ 27 bilhões em 2013. (BCC RESEARCH, 2008)

No Brasil, o Programa Nacional de Nanotecnologia (PNN) foi inaugurado em 2005 pelo Ministério de Ciências e Tecnologia, e em cinco anos foram contemplados 412 projetos de pesquisa. No entanto, dentre esses projetos, verificou-se a ausência de discussões com o público não especialista, fator que deveria ser considerado importante para a formulação de políticas de ciência e de novas tecnologias. (ROTHBERG; RESENDE, 2010, p. 202)

Os inúmeros avanços tecnológicos, para os quais a Nanotecnologia tem contribuído ou irá contribuir, promove um cenário bastante positivo. No entanto, há questões éticas não consideradas e riscos não avaliados de maneira eficiente, dado que muitos especialistas consideram que há incertezas sobre os efeitos ambientais e toxicológicos dos produtos e processos envolvidos com a Nanotecnologia. (SCHULZ, 2009, p. 105-111)

Segundo alguns especialistas, há o risco de toxicidade de certos tipos de nanopartículas, que seriam capazes de penetrar no sistema imune de humanos e outros animais, afetando mucosas, membranas e corrente sanguínea, podendo atacar órgãos como fígado, pulmões, coração e artérias. Assim, em nome do princípio de precaução, devem-se realizar estudos independentes para obter dados mais precisos sobre a nanotoxicologia. (LACEY, 2008; ROTHBERG; RESENDE, 2010, p. 205)

No Brasil, um dos projetos promissores no âmbito da comunicação com o público não especialista é o constituído pela Rede de Pesquisa em Nanotecnologia, Sociedade e Meio Ambiente (Renanosoma), que teve o projeto *Engajamento público*

em *Nanotecnologia*, aprovado pela CNPq em 2006. Nesse projeto, foram realizados bate-papos virtuais entre pesquisadores de Nanotecnologia e o público não especialista e foram promovidas palestras sobre o tema em vários momentos do projeto, resultando dessas discussões um vídeo intitulado *Nanotecnologia, o futuro é agora*. (MARTINS et al., 2007)

O engajamento público em Nanotecnologia deve assumir três funções: educacional, cívica e de mobilização popular. A primeira pretende esclarecer o público sobre os resultados da atividade científica, a segunda envolve o senso crítico e a tomada de decisões, ampliando a cidadania, e a terceira refere-se à difusão de informações que estimulem a participação da sociedade na escolha da inserção de novas tecnologias em seu cotidiano. (MARTINS et al., 2007; ROTHBERG; RESENDE, 2010, p. 207-208)

## CONCLUSÃO

A análise da ciência na passagem do século XX ao XXI não pode negligenciar diversas áreas tecnológicas que estão transformando a vida humana, como a computação, a biotecnologia e a Nanotecnologia. Neste trabalho, procuramos ressaltar como a ciência e a tecnologia se retroalimentam, gerando um “progresso” cada vez mais acelerado, mas também potencialmente perigoso. O motor da inovação nessa área tecnocientífica são principalmente os interesses econômicos de grandes corporações e os fins militares das nações mais ricas. Mas há também espaço para o cidadão assimilar conhecimento científico e tentar influenciar as tomadas de decisão estratégicas. Seu poder pode também ser exercido por campanhas de boicote a produtos desenvolvidos de maneira antiética. Nesse enredo de múltiplos atores e interesses, o Ensino de Ciência tem um papel fundamental na formação de cidadãos cientificamente informados e eticamente esclarecidos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, O. L. Nanotecnologia, nanociência e nanomateriais: quando a distância entre o presente e futuro não é apenas questão de tempo. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, n. 18, p. 23-40, ago. 2004.
- ALTMANN, J. Nanotecnologia e a questão militar. In: MARTINS, P. R. (Org.). *Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente: 1º Seminário Internacional*. São Paulo: Humanitas, 2005. p. 33-41.

- ASHLEY, S. Grafeno moído. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 83, p. 18-19, abr. 2009.
- BCC RESEARCH. *Nanotechnology: a realistic market assessment* (Report ID: NANO31C). Wellesley (MA), 2008.
- BROOKS, R. A. *Flesh and machines: how robots will change us*. New York: Vintage, 2003.
- BRUNE, H. et al. *Nanotechnology: assessment and perspectives*. Berlin: Springer, 2006.
- CASTILHO, C. M. C. D. Quando e como o homem começou a ver átomos! *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 25, n. 4, p. 364-373, dez. 2003.
- CHAVES, A. Nanociência e nanotecnologia. *Comciência*, Campinas, n. 37, nov. 2002. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano17.htm>>. Acesso em: 29 fev. 2012.
- COLLINS, P. G. Xamãs de um pequeno mundo. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 22, p. 83-90, 2008. Número especial: *Nanotecnologia*.
- COLUSSI, M. L. *Estudo teórico da estabilidade e propriedades eletrônicas de defeitos em nanotubos de GaN*. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.
- DREXLER, K. E. *Engines of creation*. New York: Anchor, 1986.
- ESCALANTE, J. M. C. Nanotecnologia e poder: em busca de uma nanoética. In: MARTINS, P. R. (Org.). *Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente: 1º Seminário Internacional*. São Paulo: Humanitas, 2005. p. 259-262.
- FEYNMAN, R. P. Há mais espaços lá embaixo. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, n. 18, p. 137-155, ago. 2004.
- FUKUYAMA, F. *Nosso futuro pós-humano*. Tradução de Maria Luiza X. A. Borges. Rio de Janeiro: Rocco, 2003.
- GEIM, A. K.; KIM, P. A versatilidade do carbono. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 72, p. 80-87, maio 2008.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, London, v. 6, n. 3, p. 183-191, Mar. 2007.
- GRUNER, G. Nanoredes de carbono estimulam nova eletrônica. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 61, p. 68-75, jun. 2007. Reimpresso em número especial 22: *Nanotecnologia*, p. 50-57, 2008.
- HERBST, M. H.; MACÊDO, M. I. F.; ROCCO, A. M. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. *Química Nova*, São Paulo, v. 27, n. 6, p. 986-992, nov./dez. 2004.



- IJJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, London, v. 354, n. 6348, p. 56-58, Nov. 1991.
- IJJIMA, S.; ICHIHASHI, T. Single-shell carbon nanotubes of 1 nm diameter. *Nature*, London, v. 363, n. 6430, p. 603-605, June 1993.
- KROTO, H. W. et al. C<sub>60</sub>: buckminsterfullerene. *Nature*, London, v. 318, n. 6042, p. 162-163, Nov. 1985.
- KRUEGER, A. *Carbon materials and nanotechnology*. Tradução de S. Brammer. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- LACEY, H. *Valores e atividade científica*. São Paulo: Editora 34, 2008.
- MAFRA, D. L. Dispersão de fônons na vizinhança do ponto de Dirac do grafeno por espalhamento Raman. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- MARTINS, P. R. Nanotecnologia e meio ambiente para uma sociedade sustentável. In: MARTINS, P. R. (Org.). *Nanotecnologia, sociedade e meio ambiente: 1º Seminário Internacional*. São Paulo: Humanitas, 2005. p. 129-132.
- MARTINS, P. R. et al. *Revolução invisível: desenvolvimento recente da Nanotecnologia no Brasil*. São Paulo: Xamã, 2007.
- MELO, C. P.; PIMENTA, M. Nanociências e nanotecnologia. *Parcerias Estratégicas*, Brasília, n. 18, p. 9-21, ago. 2004.
- MODY, C. C. M. The larger world of nano. *Physics Today*, College Park, MD, v. 61, n. 10, p. 38-44, Oct. 2008.
- MOORE, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, New York, v. 38, n. 8, p. 114-117, Apr. 1965.
- NANOTECHNOLOGY. In: Wikipedia. [entre 2003 e 2014]. Disponível em: < <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology> >
- NOVOSELOV, K. S. et al. Two-dimensional atomic crystal. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A*, Washington, v. 102, n. 30, p. 10451-10453, July 2005.
- NEW TRADITIONS PROJECT. *Diamonds, buckyballs, and graphite*. Madison: Dept. of Chemistry, University of Wisconsin, 1996. Disponível em: < <http://www.chem.wisc.edu/~newtrad/CurrRef/BDGTopic/BDGtext/BDGtoc.html> >. Acesso em: 29 fev. 2012.
- POSTMA, H. W. C. et al. Carbon nanotube single-electron transistors at room temperature. *Science*, Washington, v. 293, n. 5527, p. 76-79, July 2001.
- REGIS, E. *Nano: a ciência emergente da Nanotecnologia: refazendo o mundo – molécula por molécula*. Tradução de A. Tort. Rio de Janeiro: Rocco, 1997.
- ROCHA, G. R. *História do atomismo*. Belo Horizonte: Argvmentvm, 2007.

ROTHBERG, D.; RESENDE, L. P. Saúde, comunicação e Nanotecnologia: o papel do debate público para a expansão da cidadania. *Alceu*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 21, p. 202-214, jul./dez. 2010.

ROUKES, M. Espaço suficiente lá embaixo. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 22, p. 6-13, 2008. Número especial: *Nanotecnologia*.

SILVA, C. G. O que é nanotecnologia? *Comciência*, Campinas, n. 37, nov. 2002. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/nanotecnologia/nano10.htm>>. Acesso em: 29 fev. 2012.

SCHULZ, P. A. B. O que é nanociência e para que serve a nanotecnologia? *Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 58-62, maio 2005.

\_\_\_\_\_. Nanociência de baixo custo em casa e na escola. *Física na Escola*, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 4-9, maio 2007.

\_\_\_\_\_. De volta para o futuro: os precursores da nanotecnociência. *Cadernos IHU Ideias*, São Leopolda, RS, n. 95, p. 1-18, 2008.

\_\_\_\_\_. *A encruzilhada da nanotecnologia*. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2009.

SMALLEY, R. Of chemistry, love and nanobots. *Scientific American*, New York, v. 285, n. 3, p. 76-77, Sept. 2001.

WHITESIDES, G. M.; LOVE, J. C. A arte de construir pequeno. *Scientific American Brasil*, São Paulo, n. 22, p. 15-23, 2008. Número especial: *Nanotecnologia*.

WOLF, E. L. *Nanophysics and nanotechnology*. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

OLIVAL FREIRE JÚNIOR  
ILEANA M. GRECA  
CHARBEL NIÑO EL-HANI  
(ORG.)

# CIÊNCIAS NA TRANSIÇÃO DOS SÉCULOS

CONCEITOS, PRÁTICAS E HISTORICIDADE

Salvador  
EDUFBA  
2014