

Blucher

2

Nanotecnologia  
em Embalagens  
Graham Moore



QUATTOR

COLEÇÃO  
EMBALAGEM

Nanotecnologia

# Nanotecnologia em **embalagens**

# COLEÇÃO QUATTOR Embalagem

## Revisores técnicos

Fabio Mestriner

Henrique Toma

## Revisores técnicos Quattor

Adair Rangel de Oliveira Junior

Danielle Lauzem Santana

Yuzi Shudo

Marcus Vinicius Trisotto

Martin David Rangel Clemesha

Selma Barbosa Jaconis

## Revisão gramatical

Marcos Soel

1

Embalagens Flexíveis

2

Nanotecnologia em Embalagens

3

Materiais para Embalagens

4

Estudo de Embalagens para o Varejo

5

Estratégias de Design para Embalagens

Graham Moore

# Nanotecnologia em **embalagens**

Volume 2

Tradução  
**Edison Zacarias da Silva**  
Físico e professor do Instituto  
de Física da Unicamp

Título original  
*Nanotechnology in packaging*

A edição em inglês foi publicada  
pela Pira International Ltd

Copyright 2004© Pira International Ltd

*Todos os direitos reservados  
para a língua portuguesa pela  
Editora Edgard Blücher Ltda.*

**2009**

*É proibida a reprodução total ou parcial  
por quaisquer meios  
sem autorização escrita da editora*

EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA.

Rua Pedroso Alvarenga, 1245 – 4º andar  
04531-012 – São Paulo, SP – Brasil  
Tel: (55\_11) 3078-5366  
e-mail: editora@blucher.com.br  
site: www.blucher.com.br

*Impresso no Brasil*

*Printed in Brazil*

**ISBN 978-85-212-0446-6**

*Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.*

### Ficha Catalográfica

Moore, Graham

*Nanotecnologia em embalagens* / Graham Moore; tradução: Edison  
Zacarias da Silva. São Paulo : Editora Blucher, 2009.

Título original: *Nanotechnology in packaging*.

ISBN 978-85-212-0446-6

1. Embalagens 2. Nanotecnologia I. Título.

08-6307

CDD-620.5

Índice para catálogo sistemático:

1. Nanotecnologia em embalagem: Tecnologia 620.5

A grande finalidade do conhecimento  
não é conhecer, mas agir.

Thomas H. Huxley



Dedicamos o resultado deste trabalho a toda a cadeia produtiva de embalagens: fornecedores de matéria-prima, indústria, transporte e fornecedores de embalagens, indústria gráfica e usuários, que, a partir desta experiência, contarão com mais subsídios para usufruto e inovação na produção e no consumo das embalagens.





Agradecemos a todos que se envolveram no processo de pesquisa e desenvolvimento da Coleção Quattor, em especial as empresas Editora e Gráfica Salesianas, Editora Blucher, Gráfica Printon, Vitopel, EBR Papéis, Know-How Editorial e Gráfica Ideal.

Agradecemos em especial a dedicação incondicional de Roberto Ribeiro, Andre Luis Gimenez Giglio, Armando Bighetti e Gustavo Sampaio de Souza (Quattor), Sinclair Fittipaldi (Lyondell Basell), José Ricardo Roriz Coelho (Vitopel), Marcelo Trovo (Salesianas), Renato Pilon (Antilhas), Celso Armentano e Gerson Guimarães (SunChemical do Brasil), Fabio Mestriner (ESPM), Douglas Bello (Vitopel), Sr. Luiz Fernando Guedes (Printon), Sr. Renato Caprini (Gráfica Ideal), e aos editores Eduardo Blucher e Rosemeire Carlos Pinto (Editora Blucher).



# prefácio da edição brasileira

Imagine a sua vida sem as embalagens: todos os produtos vendidos a granel, expostos em prateleiras e sem identificação do fabricante ou data de validade.

Impossível? Certamente. Pela relação vantajosa mútua, produto e embalagem assumiram uma relação de simbiose. Arriscamo-nos a dizer que a quase totalidade de transações comerciais atuais não ocorreria sem a presença das embalagens e sem o seu constante aperfeiçoamento. Os prejuízos seriam incontáveis, não somente do ponto de vista financeiro mas também da saúde pública e da conveniência e conforto para nossas vidas.

É longa e criativa a trajetória humana no campo das embalagens. Das demandas iniciais até a sofisticação atual, voltada ao atendimento dos setores comercial e de transporte de produtos, contam-se mais de 200 anos. Da primeira folha vegetal *in natura* e das caixas de madeira, passando por artísticos potes de cerâmica, latas e vidros de alimentos, até a profusão de materiais empregados atualmente, inclusive com apoio da nanotecnologia, muito se experimentou e se descobriu. Um dos mais bem-sucedidos exemplos dessa trajetória diz respeito às embalagens plásticas, que vêm revolucionando e contribuindo para a geração de valor das diversas cadeias em que estão presentes, proporcionando mais segurança aos usuários, além de aumento do *shelf-life*.

Pesquisas brasileiras indicam que 85% das escolhas do consumidor são feitas no ponto de venda, apoiadas no binômio marca-fabricante, mas de forma associada a outro: design–apelo visual, características facilmente alcançadas quando a embalagem incorpora a nobreza do plástico. Da mesma forma que o plástico influencia a decisão de compra, influenciou a Quattor a celebrar esta parceria com a Editora Blucher, para trazer ao mercado a Coleção Quattor Embalagens que, além disso, cumpre o importante papel de minimizar a lacuna bibliográfica brasileira sobre o tema.

A Coleção Quattor Embalagens é formada por cinco volumes: *Embalagens flexíveis*, *Nanotecnologia em embalagens*, *Materiais para embalagens*, *Estudo de embalagens para o varejo e Estratégias de design para embalagens*. O leitor ou o pesquisador interessado está na iminência de iniciar uma verdadeira viagem por um dos mais importantes setores da economia mundial.

Bem-vindo ao mundo da Nova Geração da Petroquímica: o melhor em matérias-primas para produção de embalagens, o melhor em informação para produção de conhecimento.

Marco Antonio Quirino  
Vice-Presidente Polietilenos

Armando Bighetti  
Vice-Presidente Polipropilenos



**QUATTOR**

A NOVA GERAÇÃO DA PETROQUÍMICA



# prefácio da edição americana

No Brasil, o setor de embalagem já possui considerável representatividade. Nossas atividades na área são reconhecidas internacionalmente (seja na tecnologia desenvolvida, seja no design de embalagem), o que resultou no recebimento das principais premiações desse mercado.

Isso se deve ao fato de o padrão competitivo da indústria brasileira de embalagem ser estabelecido pelas empresas líderes mundiais do setor, as quais estão instaladas no País. Basta observar que, entre as 20 maiores empresas mundiais do segmento, apenas duas não possuem fábricas instaladas no Brasil.

A presença dessas empresas eleva o nível de competição no mercado de embalagem. Assim, tanto as empresas nacionais como as multinacionais precisam se atualizar constantemente e manter um alto nível de conhecimento técnico para alcançar uma posição de destaque.

Nesse sentido, a iniciativa da Editora Blucher e da Quattor, ao lançarem no Brasil os livros da Pira, na forma de uma coleção, reveste-se de grande significado, uma vez que essa instituição inglesa tem se dedicado ao estudo e à pesquisa na área, além de ter, entre seus autores, especialistas de renome.

Em um momento no qual estamos dedicados a implantar cursos de graduação para formar uma geração de profissionais capazes de enfrentar os novos desafios do setor, a chegada de uma bibliografia de referência ganha uma importância ainda maior. Na Coleção Quattor Embalagem, as novas gerações e os profissionais que já atuam no mercado encontrarão uma fonte de conhecimento de alta qualidade, a qual certamente os ajudará a progredir em suas carreiras e a abrir horizontes para o aperfeiçoamento de suas atividades.

É importante lembrar que sempre que um novo livro técnico como este chega ao mercado provoca reações, estimula o estudo e incentiva novos autores a se aprimorarem no assunto, aprofundando seus conhecimentos e gerando, no futuro, novas publicações. É assim que o acervo tecnológico de uma nação vai se formando.

O Brasil precisa de boas embalagens para agregar valor e melhorar a competitividade de seus produtos nos mercados interno e externo. Precisamos também de boas embalagens para reduzir a perda de alimentos entre a lavoura e a mesa do consumidor, a qual supera hoje cerca de 30% de tudo o que é produzido no campo.

É assim que a *nanotecnologia*, por suas características de vanguarda tecnológica, propicia a geração de novos materiais e a melhoria dos materiais já existentes, e traz uma grande contribuição para o desenvolvimento de embalagens mais econômicas e eficientes em suas funções, que permitem levar os mais diversos produtos a lugares cada vez mais longínquos, preservando seu conteúdo por mais tempo, reduzindo a perda de alimentos e democratizando o acesso dos consumidores, mesmo os provenientes de lugares distantes, aos produtos da nossa indústria.

Fico feliz em apresentar esta obra e o faço com a certeza de que todos aqueles que a ela tiverem acesso encontrarão a informação, o conhecimento e o estímulo necessários para se atualizar profissionalmente e desenvolver ainda mais seus estudos.

**Fabio Mestriner**

Professor-coordenador do Núcleo de Estudos da Embalagem da Escola Superior de Propaganda e Marketing (ESPM) e professor do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Embalagem da Escola de Tecnologia Mauá.



# nota do tradutor

Este pequeno livro sobre nanociência e, mais especificamente, sobre nanotecnologia tem como foco principal aplicações já em desenvolvimento, ou que estão chegando ao mercado, voltadas para as indústrias de papel e embalagens. Consequentemente, enfoca também o papel de tintas e revestimentos, mostrando que técnicas desenvolvidas nessas áreas podem beneficiar a produção de circuitos moleculares a partir de técnicas de impressão.

No Capítulo 1, a nanociência e a nanotecnologia são apresentadas, estabelecendo-se as diferenças entre essas duas ciências, as principais áreas temáticas que elas devem explorar e em que aspectos diferem da pesquisa anteriormente feita. Apresentam-se também as áreas que tornaram a nanociência uma realidade, e que poderão possibilitar um grande salto no tocante a soluções e produtos, por meio da incorporação da nanotecnologia à produção de bens e produtos.

No Capítulo 2 são discutidas aplicações comerciais da nanociência, apresentando-se algumas de suas ferramentas mais importantes, como os vários tipos de microscópios, as técnicas de litografia e as simulações computacionais. Em seguida, discute-se a utilização de novos materiais, por exemplo, nanotubos de carbono, nanopartículas lamelares, nanocompósitos poliméricos. Nesse contexto, são analisadas as principais aplicações da nanotecnologia nas indústrias de papel, de tinta para impressão e de embalagens, as quais usam todos esses elementos visando incorporar mais valor ao produto a partir de novas funcionalidades, como sensores para detecção da qualidade do produto, nanocódigos de barras para evitar falsificação, permitir rastreamento do produto e facilitação de inventários etc. Nesse processo, o livro apresenta soluções para um segmento da indústria que podem ser usadas em outro setor, algumas vezes causando grande inovação ou trazendo melhorias ao produto. Tudo isso é feito por meio de estudos de casos que exemplificam os problemas e as soluções propostas, além de apontar as empresas que estão em processo de colocação no mercado desses produtos que incorporam nanotecnologia.

O Capítulo 3 discute os caminhos para a realização, em que as metas de curto, médio e longo prazos são apresentadas e discutidas.

Já o Capítulo 4 traz um resumo das empresas que têm produtos desenvolvidos com base na nanotecnologia, com a descrição dos seus principais produtos.

Finalmente, o Capítulo 5 comenta perspectivas para o futuro.

Este livro apresenta, para o público em geral, exemplos do uso da nanociência e da nanotecnologia, além de ser útil para uma parcela de profissionais de várias indústrias que poderão ser afetadas significativamente pela incorporação de soluções da nanotecnologia a produtos e processos. Como afirma o autor, poucas serão as indústrias que, no futuro, não recorrerão à nanociência e à nanotecnologia, pois o fato de não estarem abertas a essas inovações e oportunidades pode tirá-las do mercado em que atuam.

**Edison Zacarias da Silva**

Físico e professor do Instituto de Física da Universidade de Campinas (Unicamp), seu trabalho de pesquisa é voltado para simulações computacionais aplicadas à matéria condensada e à nanociência.





# conteúdo

Sumário executivo xix

Lista de figuras xxv

Lista de tabelas xxvii

Abreviações e acrônimos xxix

## 1 A evolução da nanotecnologia 1

Áreas temáticas 3

Ciência de materiais 4

Eletrônica e optoeletrônica 4

Ciência biomédica 6

Resumo 7

## 2 Aplicações comerciais 9

Ferramentas 10

Microscópios 10

Nanoimpressão (litografia suave) 11

Nanolitografia 12

Nanoxerografia 14

Materiais avançados 15

Novas formas de carbono 17

Nanopartículas 20

Nanocompósitos 22

Materiais nanoestruturados produzidos por automontagem 33

Pontos e fios quânticos 35

Eletrônica e tecnologia da informação 39

Optoeletrônica 40

Fotônica 40

Plásticos condutores 40

Meio ambiente e energia 43

- Embalagens 46
  - Aplicações de nanocompósitos 47
  - Aplicações em etiqueta e traçadores 53
  - Embalagens com nanossensores 54

### 3 Caminhos para a realização 57

- Escalas de tempo 58

### 4 Iniciativas comerciais 63

- BASF 63
- California Molecular Electronics Corp. 64
- Cima NanoTech 64
- Degussa 65
- E Ink 65
- Eka Chemicals 66
- Evident Technologies 66
- Hybrid Plastics 67
- Hyperion Catalysis 68
- IMEC 68
- Inframat Corporation 69
- NanoProducts 69
- Nanocor 70
- Nano-Tex 70
- Nanomix 71
- NanoTech Coatings 72
- Nanoplex 72
- Nanosolutions 73
- Nanospectra Biosciences 73
- NanoScape 74
- Ntera 74
- Plastic Logic 75
- QinetiQ Nanomaterials 75
- Quantum Dot Corporation 76
- Süd-Chemie 76
- Triton Systems 77

### 5 Desenvolvimentos futuros 79

# sumário

# executivo

A nanotecnologia é utilizada livremente para descrever a manipulação de átomos e moléculas a fim de criar estruturas com aplicação no mundo real. É uma disciplina emergente que aplica princípios da nanociência à criação de produtos e proporciona um enfoque radicalmente novo ao processo produtivo. Poucas indústrias escaparão à influência da nanotecnologia nos próximos anos. Ela viabilizará meios para vencer barreiras bem entendidas e previstas, objetivando melhorar as tecnologias correntes.

A nanotecnologia é de interesse global e tem atraído mais financiamentos públicos que qualquer outro segmento de tecnologia, por ser uma área de pesquisa e desenvolvimento verdadeiramente multidisciplinar. A contribuição da nanotecnologia não se fará isoladamente das outras áreas de rápido desenvolvimento na ciência. Em particular, avanços em biologia, biotecnologia, tecnologia da informação e nanotecnologia se reforçarão mutuamente em sinergia.

O impulso principal em nanociência e nanotecnologia está nas áreas de:

- ▶ ciência de materiais;
- ▶ eletrônica e optoeletrônica;
- ▶ ciência biomédica.

O estudo da ciência de materiais está fundamentado em muitos programas de pesquisa. A melhoria no controle de estruturas em escala nanométrica e o melhor entendimento das relações entre estrutura e propriedades serão importantes para o desenvolvimento de materiais com maior relação resistência-peso, ou com funcionalidade melhorada. Outras áreas nas quais nanociência e nanotecnologia estão contribuindo para a ciência de materiais são:

- ▶ *Novas formas de carbono*: descobertas em 1985, fornecem hoje as bases para novos desenvolvimentos em nanotecnologia.
- ▶ *Nanopartículas*: já estão influenciando um grande número de produtos e serviços. Além disso, possuem o potencial de novos desenvolvimentos.
- ▶ *Nanocompósitos*: a introdução de materiais compósitos, como plásticos reforçados, vidro e carbono, tem permitido a obtenção de novos materiais com desempenho muito superior ao dos convencionais.

A maioria dos equipamentos eletrônicos já está se aproximando da nanoescala. Melhorias na tecnologia da produção de circuitos integrados para unidades de processamento e circuitos integrados (*chips*) de memória continuarão a ser feitas e incorporarão os progressos da nanotecnologia. Áreas de particular interesse incluem:

- ▶ *Optoeletrônica de semicondutores*: interação entre eletrônica e luz e conversão de sinais que carregam informação entre as duas mídias.

- ▶ *Fotônica*: descrita como optoeletrônica, possui menos eletrônica e mais controle da propagação da luz.
- ▶ *Memória e armazenamento de dados*: o avanço na capacidade de armazenamento tem sido muito rápido – dos cartões perfurados às fitas magnéticas e discos.
- ▶ *Novos métodos para entrada e saída de dados*: nanociência e tecnologia levarão a sensores menores e mais sensíveis.
- ▶ *Plásticos condutores*: polímeros semicondutores são usados como materiais ativos para produzir circuitos lógicos e mostradores.
- ▶ *Eletrônica molecular*: uma maneira de ultrapassar os limites de resolução da litografia seria o uso de moléculas condutoras, como fios e elementos dos componentes ativos.

A ciência biomédica desperta a atenção pública, pois combina a evolução incremental com a altamente futurística. Algumas áreas em que pode ser aplicada são:

- ▶ fornecimento de drogas;
- ▶ engenharia de tecidos;
- ▶ laboratório-no-*chip*, isto é, sistemas de sensores integrados em um *chip*.

Alguns dos dilemas sociais e éticos decorrentes da ciência e da tecnologia em nanoescala terão sua origem no sucesso dessa área.

Apesar da quantidade significativa de pesquisas feitas nos últimos 20 anos, o número de realizações comerciais em nanotecnologia é pequeno. O desafio de encontrar e reconhecer aplicações comerciais para as pesquisas realizadas é um dos maiores problemas para o progresso da nanotecnologia. Algumas transferências do laboratório para o mercado já aconteceram, porém a maioria dos nanoprodutos presentes no mercado é aplicada a trabalhos científicos por pesquisadores que atuam na área. O mercado atual é pequeno e concentrado principalmente em nichos, mas cresce de modo rápido. Foi estimado em US\$ 385 milhões por ano nos EUA, podendo atingir US\$ 3,5 bilhões em 2008 e US\$ 20 bilhões em 2013<sup>1</sup>.

Pequenas empresas estão na vanguarda da área de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Algumas dessas empresas, particularmente as envolvidas com nanomateriais, têm formado alianças de mercado e desenvolvimento com grandes empresas químicas e fornecedores de plásticos. Grande parte do potencial de transformação da nanociência em produtos viáveis e úteis poderá acontecer nos próximos 20 anos.

As aplicações são variadas e crescem cada vez mais, tornando-se capazes de abranger desde aplicações espaciais e militares até a medicina e cosméticos. Elas podem ser divididas em várias áreas:

- ▶ ferramentas de P&D;
- ▶ materiais avançados;
- ▶ eletrônica e tecnologia da informação (TI);
- ▶ meio ambiente e energia;
- ▶ embalagem.

Uma das principais barreiras técnicas à comercialização é o desenvolvimento de processos de produção em larga escala e a redução de custos dos nanomateriais.

---

<sup>1</sup> Nota do revisor técnico: estimativas recentes já superam US\$ 1 trilhão na próxima década.

Uma variedade de ferramentas e técnicas foi desenvolvida em paralelo à evolução da nanociência, tais como:

- ▶ microscopia de varredura por sonda;
- ▶ técnicas de molécula única;
- ▶ nanolitografia;
- ▶ litografia de feixe de elétrons e bombardeamento focalizado de íons;
- ▶ técnicas precisas de revestimento de fresas com espessuras muito finas;
- ▶ litografia suave;
- ▶ simulações por computador.

Entre essas, a microscopia de varredura por sonda e a litografia suave são as mais importantes.

Nanociência e nanotecnologia têm revitalizado a ciência de materiais e proporcionado o desenvolvimento e a evolução de uma gama de novos materiais por meio do controle da nanoestrutura. Materiais em escala nanométrica exibem fundamentalmente novos comportamentos à medida que seus tamanhos diminuem em relação ao tamanho crítico associado a uma dada propriedade. A intervenção nas propriedades de materiais na nanoescala permite a criação de materiais e dispositivos com desempenho e funcionalidade não previstos anteriormente. Tais nanoestruturas, como as exibidas por recobrimento, pós, dispersões e compósitos, ajudarão a revolucionar uma série de setores da indústria por meio de diferentes produtos.

A nanotecnologia tem o potencial de prover novos métodos de manufatura para permitir a miniaturização de componentes da próxima geração de computadores. Técnicas como a da litografia e da montagem *bottom-up* (de baixo para cima) até a formação de componentes em nanoescala por automontagem poderiam produzir circuitos em microescala mais efetivos e baratos. Nanotubos de carbono, por serem condutores ou semicondutores, serão usados em TI e ainda podem ser aplicados em dispositivos de memória e de armazenamento.

A nanotecnologia também pode ser utilizada para desenvolver filtros mais eficientes e efetivos para o tratamento de água, pois substâncias dispersas podem ser fixadas e floculadas com sílica e, assim, removidas da água mais eficientemente. Uma membrana para purificação de água e com propriedade autolimpante, reduzindo contaminações, pode ser desenvolvida a médio prazo. Tais alternativas, particularmente para água, têm potenciais aplicações nas indústrias de celulose e papel, em que a recirculação do processo de lavagem e a minimização do uso da água são considerações da maior importância.

Demandas no setor de embalagens estão mudando continuamente, influenciadas por uma variedade de fatores, desde aumento de funcionalidade até melhorias em aspectos econômicos e ambientais. A utilização da nanociência e da tecnologia está auxiliando o desenvolvimento de matéria-prima e aplicações de alta tecnologia para embalagem.

A nanotecnologia pode promover as seguintes melhorias nas matérias-primas utilizadas em embalagens:

- ▶ *Aplicabilidade*: aumento nas aplicações de embalagem em novas áreas, devido à melhoria nos recursos/tecnologias de empacotamento.
- ▶ *Durabilidade*: melhoria na durabilidade de materiais e aumento da vida útil do produto embalado.
- ▶ *Marca*: incorporação de características especiais à embalagem, com o intuito de promover sua identificação.

- ▶ *Adição de valor*: desenvolvimento de materiais com novas características, atribuindo às embalagens maior valor agregado.

O desenvolvimento de nanocompósitos para aplicações em embalagens está ganhando destaque à medida que oportunidades oferecidas por tais tecnologias são identificadas e implementadas. A geração atual de materiais nanocompósitos apresenta melhorias de desempenho nas características do produto, como estabilidade térmica, aumento significativo da resistência mecânica e propriedades de barreira. As aplicações de barreira de nanocompósitos foram identificadas como área que apresenta grande potencial de aplicação. Exemplos disso são os filmes de poliamida, que são comercializados com propriedades de barreira a gases em razão de aditivos em nanoescala.

Aplicações de nanocompósitos em embalagens incluem:

- ▶ barreira a gases;
- ▶ barreira ao oxigênio;
- ▶ embalagem de alimentos;
- ▶ filmes.

Outra aplicação da nanotecnologia é no desenvolvimento de nanocódigos de barras, feitos por eletrodeposição de metais inertes, como ouro, prata e platina, em moldes que definem o diâmetro da partícula. As barras de nanopartículas são, então, retiradas dos moldes. A largura e a sequência destas podem ser alteradas para produzir nanocódigos de barras diferentes, uma alternativa de baixo custo para identificadores por radiofrequência (RFID).

Apesar de muitas aplicações potenciais da nanotecnologia ainda estarem distantes da realidade comercial, existem áreas em que a incorporação da nanotecnologia é instrumental no desenvolvimento de produtos comercialmente disponíveis. O mercado de materiais e compósitos surge como uma dessas áreas. Tintas inteligentes, pigmentos e revestimentos foram consideradas áreas promissoras e de aplicação imediata da nanotecnologia nos próximos anos. Tais projeções têm importante significado para as indústrias de embalagem, papel e imprensa, devido ao potencial que possuem para receber esses avanços em materiais e compósitos.

O vasto potencial oferecido pela nanotecnologia tem motivado a área científica e técnica. No entanto, tal potencial também tem sido fonte de preocupação. Aplicações correntes são predominantemente limitadas a avanços em áreas bem estabelecidas de ciência aplicada, como ciência de materiais e tecnologia de coloides. Aplicações de médio prazo têm provavelmente o foco em transpor barreiras ao processo tecnológico e a aplicações práticas, enquanto aplicações de longo prazo são as de mais difícil previsão e tendem, portanto, a ser foco dos maiores questionamentos.

Os desafios, aparentes ou não, da nanotecnologia precisam ser considerados de forma efetiva. O perigo de não serem respondidos poderá causar uma ansiedade crescente, protelando as nanopesquisas. Movimentos desse tipo podem atrasar a pesquisa por causa de uma perda do momento positivo e do desperdício de oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias úteis.

### **Observações finais**

Alguns princípios subjacentes à nanotecnologia são praticados já há alguns anos em diferentes áreas, como modificação superficial de pigmentos de tintas e desenvolvimento de medicamentos. Não rotulados como nanotecnologia, a ciência e os desenvolvimentos tecnológicos progredem com sucesso, porém sem a atenção que tinham anteriormente. Hoje, nanotecnologia se tornou um

tópico amplamente discutido entre acadêmicos, na mídia, no setor de investimentos e em alguns setores da indústria. Apesar de o tema estar se desenvolvendo com um certo grau de publicidade excessiva, não há dúvida de que está causando grande impacto em várias indústrias e produtos. De fato, argumenta-se que a nanotecnologia mudará de maneira significativa a face da indústria.

Nanotecnologia é sinônimo de fazer algo de modo diferente – e promete mais por menos: dispositivos menores, mais baratos, mais leves, mais rápidos e com maior funcionalidade, usando menos matéria-prima e consumindo menos energia.

Poucas indústrias estarão alheias à influência da nanotecnologia. Computadores mais rápidos, materiais biocompatíveis, recobrimento de superfícies, catalisadores, sensores, telecomunicações, materiais magnéticos e dispositivos são apenas alguns exemplos nos quais a nanotecnologia já foi incorporada. Muitos destes, além dos que ainda estão sendo pesquisados, têm influência nas indústrias de papel, embalagens e impressão – como rota para melhoria nos processos, no desempenho dos produtos, ou no desenvolvimento de produtos competitivos.

De fato, a nanotecnologia é um enfoque radicalmente novo de produção, que afetará, direta ou indiretamente, muitos setores, de tal forma que a omissão em responder a esse desafio ameaçará a competitividade futura de muitas organizações e empresas.





# lista de figuras

1

Figura 1-1

*O nanomundo* 1

2

Figura 2-1

*Microscópio de força de varredura* 10

Figura 2-2

*Nanoimpressão* 12

Figura 2-3

*Tipos de materiais avançados* 15

Figura 2-4

*Fullereno Buckminster* 17

Figura 2-5

*Nanotubo de carbono* 17

Figura 2-6

*Tipos de nanomateriais poliméricos em camadas* 22

Figura 2-7

*Aumento da estabilidade térmica de uma resina termoplástica (PEAD) com adição de argila* 24

Figura 2-8

*Taxa de transmissão de vapor de água em resina termoplástica (PEAD)* 24

Figura 2-9

*O processo de eletrofiação* 33

Figura 2-10

*Imagem de pontos quânticos obtidos por microscópio de força atômica (AFM)* 36

Figura 2-11

*Princípio do papel eletrônico E Ink* 42

Figura 2-12

*Estrutura típica de célula solar usando semicondutores orgânicos* 44

Figura 2-13

*Liberação de conservantes controlados por chave biológica nanoestruturada* 51

Figura 2-14

*Um novo indicador nanocristalino* 55

3

Figura 3-1

*Linha do tempo para desenvolvimentos potenciais* 62

# lista de tabelas

1

Tabela 1-1

*Características de materiais monoescalares* 2

2

Tabela 2-1

*Aplicações dos nanotubos* 18

Tabela 2-2

*Propriedades de ensaio sob tração de nanocompósitos em polipropileno* 25

Tabela 2-3

*Exemplos de nanocompósitos* 27

Tabela 2-4

*Aplicações de nanocompósitos para embalagens* 49

3

Tabela 3-1

*Linha do tempo para aplicação comercial* 61



# abreviações e acrônimos

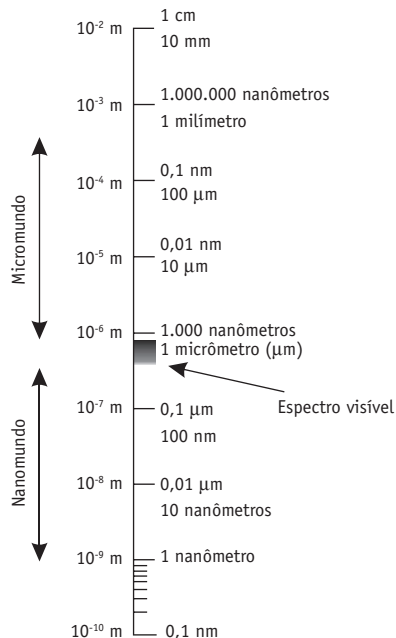
<b>AFM</b>	microscópio de força atômica
<b>ATC</b>	coletor de dejetos aniônico
<b>C-PAM</b>	poliacrilamida catiônica
<b>DFB</b>	<i>feedback</i> distribuído
<b>DNA</b>	ácido desoxirribonucleico
<b>EMI</b>	interferência eletromagnética
<b>ESD</b>	descarga eletrostática
<b>EVA</b>	copolímero de etileno e acetato de vinila
<b>EVOH</b>	copolímero de etileno e álcool vinílico
<b>EU</b>	União Europeia
<b>FED</b>	monitor de emissão de campo
<b>FPL</b>	tela frontal de monitores
<b>FWHM</b>	largura à meia-altura (expressão da largura espectral de um detector)
<b>g</b>	grama
<b>GPa</b>	giga Pascal
<b>InGa</b>	Índio-Gálio
<b>J</b>	joule
<b>kN</b>	quilo Newton
<b>LCD</b>	tela de cristal líquido ou monitor de cristal líquido
<b>LED</b>	diodo de emissão de luz
<b>m</b>	metro
<b>MAP</b>	embalagem de atmosfera modificada
<b>MPa</b>	mega Pascal
<b>MIMIC</b>	moldagem por microinjeção em capilares
<b>mg</b>	miligrama
<b>ml</b>	mililitro
<b>mm</b>	milímetro
<b>MMT</b>	montmorilonita
<b>NEMS</b>	sistema nanoeletromecânico
<b>nm</b>	nanômetro
<b>OTR</b>	taxa de transmissão de oxigênio

<b>PBT</b>	poli(tereftalato de butileno)
<b>PC</b>	policarbonato
<b>PDMS</b>	poli(dimetilsiloxano)
<b>PDP</b>	telas de painel de plasma
<b>PEAD</b>	polietileno de alta densidade
<b>PEEK</b>	poli(éter-éter-cetona)
<b>PEI</b>	poli(éter-imida)
<b>PME</b>	polímeros com memória estrutural
<b>PET</b>	poli(tereftalato de etileno)
<b>PETG</b>	copolímero ácido tereftálico-etileno glicol-tereftalato glicol
<b>POSS</b>	silsesquioxano oligomérico poliédrico
<b>PP</b>	polipropileno
<b>PPO</b>	polioxifenileno
<b>PPS</b>	poli(sulfeto de fenileno)
<b>PVC</b>	poli(cloreto de vinila)
<b>RFID</b>	identificação por radiofrequência
<b>SAMMS</b>	monocamadas auto-organizadas em suportes mesoporosos
<b>SEMS</b>	sistemas nanoeletromecânicos
<b>SFM</b>	microscopia de varredura de força
<b>SMP</b>	polímero de memória moldada
<b>STM</b>	microscopia de varredura por tunelamento
<b>TPO</b>	poliolefina termoplástica
<b>UHMWPE</b>	polietileno de ultra-alto peso molecular
<b>UV</b>	ultravioleta

# a evolução da nanotecnologia

A nanotecnologia passou a ser usada livremente para descrever a manipulação de átomos e moléculas com aplicações no mundo real. Em termos de dimensões, um nanômetro (nm) é um bilionésimo do metro ou um milésimo do micrômetro (também conhecido como mícron), que, por sua vez, é um milésimo do milímetro (ver Figura 1-1).

Figura 1-1  
O nanomundo





Nesse contexto, uma bactéria pode ter até mil nanômetros de tamanho; um nanômetro é 10 vezes o diâmetro de um átomo de hidrogênio; e a menor largura de linha de um circuito integrado moderno, como os encontrados nos mais rápidos computadores de uso pessoal, é de algumas centenas de nanômetros.

Um dos primeiros promotores das aplicações industriais da nanotecnologia, Albert Franks, a definiu como “área da ciência e da tecnologia em que dimensões e tolerâncias no intervalo de 0,1 nm até 100 nm têm papel crítico”. Recentemente, Paul Holister a descreveu como “controle de propriedades físicas a partir da definição da matéria com precisão molecular”.

As características dos materiais nanoescalares são apresentadas na Tabela 1-1.

Tabela 1-1

Características dos materiais nanoescalares

Tamanho	$10^{-8}$ m
Área	$10^{-16}$ m <sup>2</sup>
Volume	$10^{-24}$ m <sup>3</sup>
Massa	$10^{-21}$ kg
Área superficial específica	$10^5$ m <sup>2</sup> /kg
% sítios quimicamente ligantes na superfície	20-50%
Energia Livre de Gibbs Grande	Fácil sinterização/fácil dissolução
Possíveis efeitos quânticos de tamanho	

Fonte: Pira International Ltd

É necessário distinguir entre a nanociência já existente e de relevância crescente e a emergente nanotecnologia. A primeira é uma convergência da física, da química e da biologia que lida com a manipulação e a caracterização da matéria com dimensões entre a escala molecular e a microescala. A segunda, por sua vez, é uma engenharia emergente que aplica métodos da nanociência para criar produtos.

Muitos questionamentos já surgiram sobre quão revolucionária é a nanotecnologia e seu potencial de ruptura e mudanças de paradigmas científicos e técnicos. No entanto, muitas aplicações discutidas no contexto da nanotecnologia são, de fato, avanços incrementais de áreas bem desenvolvidas da ciência, como ciência de coloides, física de metais, física de semicondutores e ciência de materiais.

A nanotecnologia provavelmente terá impacto no médio prazo ao fornecer métodos para transpor barreiras há muito tempo previstas e bem entendidas ao desenvolvimento de tecnologias correntes.

À medida que abriu novos mundos de possibilidades, gerou sua própria linguagem e termos. Nanotecnologia *bottom-up* (de baixo para cima) indica procedimentos que se iniciam com pequenos componentes – quase sempre moléculas individuais – montados

para produzir a estrutura desejada, por exemplo, a automontagem. Outro enfoque, menos desenvolvido, usa sondas de microscópio de varredura para posicionar moléculas reativas em regiões desejadas em uma dada superfície.

Nanotecnologia *top-down* (de cima para baixo), ou miniaturização, é o oposto. Estruturas são criadas por técnicas mecânicas e de gravação. Isso é uma extensão natural dos métodos atuais da microeletrônica, em que estruturas com dimensões limitadas são criadas por deposição de filmes muito finos de material, retirados quimicamente das regiões não desejadas.

Muitas das aplicações comerciais de nanotecnologia se baseiam no método *bottom-up*, que também pode ser encontrado em sistemas biológicos. Estruturas em nanoescala que desempenham funções em células vivas são exemplos disso, assim como:

- ▶ ribossomos, que sintetizam novas proteínas de acordo com um padrão fornecido pelo DNA;
- ▶ cloroplastos, que armazenam energia da luz e a convertem em combustível químico;
- ▶ motores moleculares, que movem componentes nas células e, em combinação, permitem o movimento de células inteiras, até mesmo de organismos multicelulares.

Outro aspecto da nanotecnologia é que essa é uma área de pesquisa e desenvolvimento claramente multidisciplinar. A contribuição da nanotecnologia não será feita separadamente de outras áreas da ciência, as quais também se desenvolvem de maneira rápida. Em particular, avanços na biologia, biotecnologia, teoria da informação e nanotecnologia provavelmente se reforçarão mutuamente, em sinergia.

As origens da nanotecnologia podem ser rastreadas em uma série de disciplinas científicas:

- ▶ *Biotecnologia*: trabalho com replicação de DNA; síntese de proteínas (efeito Merrifield); complexos organometálicos (citocromos, hemoglobina, clorofila).
- ▶ *Química de polímeros*: engenharia molecular de copolímeros (processo Lipacryl da DuPont para incorporação de monômeros hidrofóbicos em acrílico usando carregadores de ciclodextrina).
- ▶ *Pigmentos*: mudanças superficiais (modificação de dióxido de titânio, por exemplo, com óxido de alumínio para reduzir a degradação de pintura por luz UV).
- ▶ *Microeletrônica*: projeto de *chips* e montagem.

## Áreas temáticas

Em todo o mundo, tanto institutos acadêmicos como de pesquisa aplicada estão evoluindo a partir desses desenvolvimentos preliminares e, com isso, criando novos caminhos para pesquisa em nanociência e nanotecnologia. Os principais temas investigados atualmente são:

- ▶ ciência de materiais;
- ▶ eletrônica e optoeletrônica;
- ▶ ciência biomédica.

## Ciência de materiais

O estudo da ciência de materiais é o alicerce de muitos programas de pesquisa. Relaciona-se ao controle de estruturas de materiais em nanoescala e, para muitos, os avanços agora descritos como nanotecnologia poderiam ser qualificados como desenvolvimentos integrantes de tecnologias existentes. A melhoria no controle em nanoescala e no conhecimento das relações entre estrutura e outras propriedades será muito importante para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e com maior funcionalidade.

Outras áreas em que a nanociência e a tecnologia estão contribuindo com a ciência de materiais são:

- ▶ *Novas formas de carbono*: novas descobertas, em 1985, fornecem hoje alicerces promissores para a nanotecnologia, pois essas novas formas de carbono são estruturas ordenadas em nanoescala.
- ▶ *Nanopartículas*: possuem grande potencial de aplicação comercial e já influenciam produtos e serviços. Desenvolvimentos ocasionaram a redução das quantidades de material para a produção de produtos: por exemplo, com a melhoria na eficiência de combustíveis para carros e aviões.
- ▶ *Nanocompósitos*: a introdução de materiais compósitos, como vidros e plásticos reforçados com carbono, tem contribuído para a melhoria de novos materiais na relação resistência-peso, se comparados aos materiais convencionais. Nesse contexto, o reforço dado por um dos materiais supre a rigidez e a resistência, enquanto o material matriz, menos rígido, suporta a tensão e reduz o peso. O uso de argilas (quando delaminadas ou esfoliadas) como material de reforço já foi desenvolvido e tem aplicações no setor automotivo e na indústria de embalagens. Desenvolvimentos adicionais provavelmente produzirão mais materiais compósitos com funcionalidades novas e otimizadas. Uma aplicação-alvo é em revestimentos impermeáveis para papel e papelão.

## Eletrônica e optoeletrônica

A eletrônica moderna já se aproxima da nanoescala. Melhoramentos na tecnologia de circuitos integrados para unidades de processamento central e *chips* de memória terão prosseguimento e, certamente, incorporarão resultados da nanotecnologia com melhorias incrementais.

- ▶ *Semicondutores optoeletrônicos*: interação entre eletrônica e luz e conversão de sinais que transportam informação entre as duas mídias. Muito esforço foi investido no controle da estrutura dos semicondutores na nanoescala para criar novos diodos emissores de luz e *lasers*, já disponíveis comercialmente.
- ▶ *Fotônica*: descrita como optoeletrônica com menos eletrônica e mais controle da propagação da luz. A ideia subjacente é que a luz viaja mais rápido que os elétrons nos semicondutores. Circuitos lógicos poderiam ser desenvolvidos usando luz em vez de elétrons para carregar o processo de informação. Isso viabiliza o desenvolvimento de computadores e redes de comunicação mais poderosos.
- ▶ *Memória e armazenamento*: o avanço na capacidade de armazenamento foi rápido, dos cartões perfurados às fitas magnéticas e aos discos. A proeza da miniaturização foi possível

devido à combinação extrema de microengenharia de precisão e desenvolvimento de cabeçotes de leitura, os quais dependem do fenômeno da magnetorresistência gigante. Essa resposta, em que as propriedades elétricas de um material são muito sensíveis a campos magnéticos aplicados, pode ser obtida em materiais compósitos formados por multicamadas de espessura nanométrica de metais com diferentes propriedades magnéticas. O uso de estruturas automontadas, compostas por blocos de copolímeros como molde para arranjos de partículas magnéticas na região de 10 nm, é um meio para a produção das multicamadas. Tais estruturas têm potencial para aumentar a capacidade de armazenamento de dados por um fator de 1.000. O avanço mais impressionante é a capacidade de armazenar uma unidade de informação em uma única molécula.

- ▶ *Novos métodos para entrada e saída de dados:* o uso de sensores é comum para medidas de processos e provisão de entrada de dados. Nanociência e tecnologia viabilizam a produção de sensores menores e mais sensíveis, capazes, por exemplo, de detectar material bioquímico no sangue sem a necessidade de fazer uma coleta externa.

Em relação à saída de dados é possível constatar muitas melhorias em tecnologias para monitores, com a substituição dos tubos de raios catódicos por telas de cristal líquido, de plasma e de campo de emissão. Nanociência e tecnologia estão permitindo o desenvolvimento de telas mais baratas, maiores e mais brilhantes que as atuais. Desenvolvimentos futuros poderão levar à formação de imagem diretamente na retina. Uma interessante combinação de velhas e novas tecnologias é dada pelas chamadas tintas eletrônicas, que combinam clareza e contraste da impressão no papel com a capacidade de mudança de uma tela de cristal líquido. Partículas da tinta eletrônica podem ser alteradas de branco para preto pela aplicação de campo elétrico.

Um resultado potencial seria prover a saída de dados de um computador na forma de produto tridimensional. Várias tecnologias para desenvolvimento de protótipo rápido conseguem isso por meio da impressão repetida com jato de tinta, usando, em vez de tinta, um material polimérico que se solidifica depois da impressão para produzir uma imagem tridimensional. Alternativamente, um recipiente com monômero líquido pode ser escaneado por um feixe de *laser*, cuja luz inicia polimerização do monômero para formar materiais poliméricos sólidos. Tais técnicas podem, eventualmente, permitir o desenvolvimento de nanoestruturas geradas por computador.

- ▶ *Plásticos condutores:* polímeros semicondutores são usados para a obtenção de materiais para a produção de circuitos lógicos e monitores. Infelizmente, tais polímeros têm propriedades semicondutoras piores que supercondutores convencionais, porém são mais baratos. A produção de padrões de máscaras em circuitos integrados usa impressão jato de tinta ou litografia suave, em vez de litografias mais caras. Algumas áreas atuais de pesquisa são:
  - Desenvolvimento de monitores flexíveis e maiores, como computadores dobráveis e telas de TV de baixo custo de manufatura. Isso poderia ser estendido a outros produtos flexíveis, como roupas.
  - Desenvolvimento de circuitos impressos lógicos com aplicações potenciais ao setor de embalagens. Por exemplo, a incorporação de dispositivo RFID para a embalagem de produtos que se identificam e anunciam sua presença.

- Desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos, como células solares. Atualmente, esses dispositivos têm desempenho inferior se comparados com materiais à base de semicondutores inorgânicos. No entanto, se as tecnologias de processamento forem melhoradas, tais dispositivos poderão transformar a economia associada à geração de energia por células solares.
- ▶ *Moléculas condutoras*: uma maneira de superar os limites que a litografia coloca ao tamanho dos padrões produzidos seria o uso de moléculas e fios como elementos dos componentes ativos, tais como transistores, diodos e chaves. Estes poderiam ser nanotubos de carbono ou polímeros condutores do tipo desenvolvido para plásticos condutores. Apesar de resultados preliminares mostrarem que transistores podem ser feitos usando nanotubos de carbono, grandes dificuldades ainda persistem atualmente.

Nanotubos e nanofios semicondutores serão provavelmente componentes importantes das novas arquiteturas de computadores baseadas em estruturas moleculares. Transistores de efeito de campo baseados em nanotubos já foram reportados, e progressos já se verificam na integração por meio do escoamento de fluidos em nanoescala para alinhar nanofios.

## Ciência biomédica

Em relação ao público, é a área de maior destaque, pois combina o desenvolvimento incremental com o altamente futurista. Muitos dos dilemas éticos e sociais mais críticos resultantes da ciência e da tecnologia em nanoescala estarão atrelados ao sucesso nessa área.

**Liberação de medicamentos** – A nanotecnologia oferece potencial para a liberação de medicamentos de forma sofisticada e precisa. Por exemplo, alguns agentes anticancerígenos bastante desagradáveis e com efeitos colaterais perigosos podem ter tais efeitos minimizados por uma liberação no local desejado. Em outros usos, compostos insolúveis poderiam tornar-se mais práticos pela sua preparação em nanoescala, isto é, com moléculas transportadoras permitindo sua passagem por meio de membranas.

**Engenharia de tecidos** – A engenharia de tecidos se desenvolveu com o fim de obter novos órgãos a partir de células fornecidas pelo hospedeiro e, portanto, de diminuir a rejeição a órgãos transplantados.

Tal engenharia proporciona uma base para as células, que define a estrutura requerida para a produção do órgão em questão. A base será feita de material biocompatível ou de polímero natural, projetado em micro ou nanoescala, e com sua superfície tratada de tal modo que promova crescimento e diferenciação celular.

Apesar de a meta ser a produção de novos órgãos (como fígado, por exemplo), trata-se, ainda, de um projeto de longo prazo. Verifica-se, contudo, que a engenharia de tecidos para enxertos de pele já é uma prática clínica aceita.

**Laboratório-no-chip** – Química clássica e bioquímica são feitas em laboratórios relativamente grandes. Se esses laboratórios pudessem ser miniaturizados, seria possível aumentar a sensibilidade da análise química e a facilidade de sua automação. Um laboratório-no-chip

poderia combinar a manipulação em pequena escala dos produtos químicos com a sensibilidade de detecção e o interfaceamento direto com computador para o controle automático e a análise dos resultados. A manipulação de líquidos em escalas muito pequenas envolve problemas novos e interessantes. Canais muito pequenos e tubos de reação podem ser criados por padrões de gravação em superfícies de vidro ou silício. Nessas pequenas escalas, no entanto, o movimento de fluidos é dominado por viscosidade, tornando difícil conseguir que eles fluam ou se misturem. A automação e o escalonamento para tamanhos menores de processos químicos têm sido notavelmente poderosos, e realizações como o sequenciamento do genoma humano se apoiam nesse enfoque. Entretanto, neste momento, o sequenciamento do DNA ainda necessita de recursos e laboratório. Pode-se pensar que o uso da nanotecnologia permitiria sequenciar uma única molécula de DNA por leitura física direta. Tais melhorias aumentariam significativamente o progresso da biologia molecular, e também permitiriam o surgimento de novos desafios e oportunidades em medicina. Se o genoma completo de qualquer indivíduo estivesse prontamente disponível, a blindagem de todo tipo de doenças com um componente genético seria bastante direta.

## Resumo

A natureza da nanotecnologia, *top-down* (de cima para baixo) ou *bottom-up* (de baixo para cima), indica sua multidisciplinaridade. Nanociência e nanotecnologia dependem da contribuição de uma série de disciplinas, incluindo química, física, ciências da vida e muitas áreas da engenharia. Um dos assuntos em questão é se a nanociência e a nanotecnologia deveriam ser consideradas uma continuação de tendências há muito existentes, ou se representam descontinuidade fundamental na prática da ciência e da tecnologia.

Tecnologias causadoras de ruptura são as que desalojam tecnologias mais velhas e permitem que novas gerações de produtos e processos as substituam. Por exemplo, o armazenamento óptico de dados por meio de dispositivos como CDs mudou a face do entretenimento doméstico e da computação; câmeras digitais que usam *chips* de memória e tecnologias de imageamento estão substituindo o filme fotográfico.

Avanços em ciência de materiais e tecnologia de coloides surgiram como resultado de uma crescente apreciação do papel da estrutura de nanoescala, desenvolvido continuamente nos últimos 50 anos. Apesar de serem desenvolvimentos essencialmente incrementais, não significa que não tenham impacto na sociedade ou que não sejam causadores de mudanças.

Dispositivos funcionais que operam em nanoescala representariam descontinuidade na sua área de atuação. Mas processos de miniaturização foram até agora incrementais em caráter, com contínuo refinamento de tecnologia essencialmente madura. Para atingir sucesso em velocidade computacional e capacidade de memória, nanociência e nanotecnologia necessitam apresentar nova rota para um avanço descontínuo.

A promessa revolucionária da nanociência e da nanotecnologia é o desenvolvimento desses dispositivos funcionais inteiramente novos em nanoescala.

