

# FÍSICA PARA O BRASIL

## PENSANDO O FUTURO

O desenvolvimento  
da física e sua  
inserção na  
vida social e  
econômica do país

### EDITORES CIENTÍFICOS

Alaor Chaves

Departamento de Física,  
Universidade Federal de Minas Gerais

Ronald Cintra Shellard

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
e Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Sociedade Brasileira de Física  
Comissão da Física para o Brasil



2005 - Ano Mundial da Física

## SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

### Diretoria

(mandato julho de 2003 a julho de 2005)

### Presidente

Adalberto Fazzio  
Instituto de Física,  
Universidade de São Paulo  
fazzio@if.usp.br

### Vice-presidente

Paulo Murilo Castro de Oliveira  
Instituto de Física,  
Universidade Federal Fluminense  
pmco@if.uff.br

### Secretário Geral

Lívio Amaral  
Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
amaral@if.ufrgs.br

### Secretário

Oscar Nassif de Mesquita  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Minas Gerais  
omeskita@oraculo.lcc.ufmg.br

### Tesoureiro

Eudenilson Lins de Albuquerque  
Departamento de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
eudenilson@dfte.ufrn.br

### Secretária para Assuntos de Ensino

Deise Miranda Vianna  
Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
deisemv@if.ufrj.br

## CONSELHO

### Titulares

Adalberto Fazzio  
Instituto de Física,  
Universidade de São Paulo  
fazzio@if.usp.br

Constantino Tsallis  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
tsallis@cbpf.br

João Zanetic  
Instituto de Física  
Universidade de São Paulo  
zanetic@if.usp.br

Jose Carlos Sartorelli  
Instituto de Física  
Universidade de São Paulo  
sartorelli@if.usp.br

Amir Ordacgi Caldeira  
Instituto de Física  
Universidade Estadual de Campinas  
caldeira@ifi.unicamp.br

Luiz Davidovich  
Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
ldavid@if.ufrj.br

Rita Maria C. de Almeida  
Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
rita@if.ufrgs.br

Luis Carlos de Menezes  
Instituto de Física  
Universidade de São Paulo  
menezes@if.usp.br

José David M. Vianna  
Instituto de Física  
Universidade de Brasília e  
Universidade Federal da Bahia  
david@ufba.br

Márcia Junqueira Caldas  
Instituto de Física  
Universidade de São Paulo  
mjcaldas@usp.br

## SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

### Secretaria Geral

Rua do Matão, travessa R, 187 Edifício Sede  
Cidade Universitária 05508-900 São Paulo, SP  
Tel: 55-11-3034-0429 | Fax: 55-11-3814-6293

## COMISSÃO DA FÍSICA PARA O BRASIL

Alaor S. Chaves (coordenador)  
Alfredo Gontijo de Oliveira  
Anna Maria Pessoa de Carvalho  
Celso Pinto de Melo  
Daniel Ugarte  
José Ademir Sales de Lima  
Luiz Davidovich  
Marcus Aloizio Martinez de Aguiar  
Marina Nielsen  
Paulo Murilo de Oliveira  
Raul José Donangelo  
Renata Zukanovich Funchal  
Ricardo M. Osorio Galvão  
Rita Maria C. de Almeida  
Roberto Mendonça Faria  
Ronald Cintra Shellard  
Susana Lehrer de Souza Barros  
Sylvio Roberto A. Canuto

Edição, preparação dos originais e  
pesquisa de imagens  
Cassio Leite Vieira

Projeto gráfico, diagramação, infográficos  
e preparação de imagens  
Ampersand Comunicação Gráfica  
([www.amperdesign.com.br](http://www.amperdesign.com.br))

## Editores Científicos

Alaor Chaves  
Departamento de Física  
Universidade Federal de Minas Gerais

Ronald Cintra Shellard  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

F528 Física para o Brasil: pensando o futuro / editores: Alaor Chaves e  
Ronald Cintra Shellard. São Paulo : Sociedade Brasileira  
de Física, 2005.  
248p. : il.

1. Física. 2. História da Física. 3. Educação em Física. 4. Política  
científica. I. Chaves, Alaor. ed. II. Shellard, Ronald Cintra. ed.

CDU 53

## APRESENTAÇÃO

Este livro é o resultado do trabalho de uma comissão nomeada pela Diretoria da Sociedade Brasileira de Física (SBF) para propor diretrizes que pudessem nortear as ações da SBF no decênio 2005-2015. A comissão reuniu-se por diversas vezes no período novembro de 2003 a julho de 2004, e para algumas reuniões convidou engenheiros e autoridades ligadas à gestão da C&T no Governo Federal.

O foco principal das discussões foi:

- identificar áreas da física que deveriam passar por grandes transformações na referida década;
- antever o impacto tecnológico e social dessas transformações;
- como formar, organizar e apoiar nossos pesquisadores para novos desafios;
- buscar maior inserção da física brasileira na vida do País.

Este último item ganhou prioridade suficiente para determinar o título deste livro, *Física para o Brasil*. O título bem reflete a questão que mais ocupou a mente dos membros da comissão: o que a física pode fazer para o Brasil?

Claramente, essa é uma questão que não pode ser respondida sem considerações que abarquem o universo das outras ciências e das engenharias. Também não pode ser respondida sem análise das políticas governamentais de fomento da ciência e de apropriação de seus resultados. Com isso, este livro pretende também ser uma contribuição da SBF ao esforço nacional de formular políticas de desenvolvimento científico e tecnológico. A física e toda a ciência brasileira vêm crescendo a taxas muito altas, e já adquiriram um porte e um nível que lhes permitem contribuir muito fortemente para o desenvolvimento econômico e social do País. Para transformar esse potencial em fatos, é necessário haver um elaborado planejamento em que a ciência se enquadre numa agenda brasileira, evitando-se, contudo, que se caia num excesso de dirigismo.

Este livro aborda temas que vão:

- da alfabetização científica da população brasileira à formação de pessoal para o desenvolvimento científico e tecnológico;
- da pesquisa em temas na fronteira da física fundamental – como os constituintes últimos da matéria e suas interações, bem como a estrutura e a evolução do

cosmo – a novos desafios científico-tecnológicos – como a computação quântica;

- da investigação disciplinar no reduto da física à pesquisa multidisciplinar
- como a nanociência e os sistemas complexos, incluindo os seres vivos;
- do apoio governamental a pesquisadores individuais à criação de institutos temáticos de pesquisa e ao envolvimento brasileiro em colaborações internacionais em projetos de grande porte.

Pelo viés multidisciplinar, ele analisa a forma como os métodos de investigação da física estão transbordando e migrando para outras áreas, bem como as contribuições que os físicos podem dar a diversos problemas da ciência e da sociedade contemporâneas. Aborda também o melhor aproveitamento do pessoal que tem sido formado pelo programa brasileiro de pós-graduação.

Devido às suas ambiciosas pretensões, o livro foi escrito em linguagem acessível a estudantes e a profissionais de outras áreas, e também às autoridades governamentais envolvidas na formulação de políticas em ciência, tecnologia e inovação. Foi escrito de forma a também ser instrutivo para professores de física do ensino médio, que, com ele, podem dar aos alunos uma visão da física no Brasil e no mundo. Sem dúvida, muitos estudantes talentosos aos quais a física seja mostrada como um empreendimento fascinante e profundamente inserido na vida contemporânea podem acabar sendo atraídos para a carreira de físico.

*Física para o Brasil* também permite leituras em diferentes níveis de detalhe e de entendimento. Afirmções de maior relevância são destacadas à margem do texto – nos chamados olhos – de forma que, mesmo folheando-o rapidamente, o leitor obtenha um apanhado significativo de seu conteúdo. Há nele um alto número de propostas, e as principais recomendações são sumarizadas nas páginas iniciais. Assim, espera-se que, dispondo de um par de dias ou de apenas meia hora para a leitura, o leitor possa perceber o quanto a física pode fazer pelo Brasil. Espera-se também que ele possa perceber o que o Brasil precisa fazer pela física para no fim colher os prometidos frutos.

Por fim, nossos agradecimentos especiais vão para todos os colegas que contribuíram para a realização deste livro, bem como para o Ministério da Ciência e Tecnologia, a Financiadora de Estudos e Projetos, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

*Adalberto Fazzio*  
Presidente da SBF

*Alaor Chaves*  
Coordenador da Comissão

Introdução .....	8	2.3.2. Chips atômicos	
Sumário e recomendações .....	10	2.3.3. Computadores quânticos	
Desafios Estruturais .....	11	2.3.4. Criptografia quântica	
Formação de recursos humanos .....	12	2.3.5. Informação quântica no Brasil	
1. O que é a física .....	14	2.4. MATERIAIS NOVOS E AVANÇADOS .....	74
1.1. A FÍSICA NO MUNDO CONTEMPORÂNEO .....	14	2.4.1. Desenvolvimento da física da matéria condensada	
1.1.1. A física no dia-a-dia		2.4.2. A tecnologia do silício	
1.1.2. Relações com a indústria		2.4.3. Fibras ópticas	
1.2. O ESCOPO DA FÍSICA .....	18	2.4.4. Materiais magnéticos	
1.2.1. Matéria e forças		2.4.5. Materiais poliméricos	
1.2.2. Do macro ao microcosmo		2.4.6. Polímeros aplicados a dispositivos eletromecânicos	
1.2.3. Reducionismo e universalidade		2.4.7. Polímeros eletrônicos	
1.3. A NATUREZA DA PESQUISA CIENTÍFICA .....	24	2.4.8. Polímeros fotônicos	
1.3.1. Investimento, empresas e avaliação		2.4.9. Sistemas supramoleculares	
1.3.2. Educação científica e inovação		2.4.10. Materiais cerâmicos	
1.3.3. Breve panorama brasileiro		2.4.11. Cerâmicas avançadas	
2. Desafios Científicos .....	30	2.4.12. Cerâmicas supercondutoras	
2.1. PROCESSOS FUNDAMENTAIS DA NATUREZA .....	30	2.5. SISTEMAS COMPLEXOS .....	94
2.1.1. Modelo padrão		2.5.1. Sobre a definição de complexidade	
2.1.2. Interações eletrofracas		2.5.2. Ordem e desordem	
2.1.3. Cromodinâmica quântica		2.5.3. Modelagem	
2.1.4. Neutrinos		2.5.4. Sistemas caóticos	
2.1.5. Simetrias fundamentais e núcleos atômicos		2.5.5. Desafios fundamentais	
2.1.6. Supersimetria		2.5.6. Perfil da área no Brasil	
2.1.7. Detecção, massa e oscilação dos neutrinos		3. Desafios multidisciplinares e física	
2.1.8. Física a altas energias e densidades		aplicada a problemas brasileiros .....	107
2.1.9. Astrofísica e partículas		3.1. ENERGIA .....	107
2.1.10. Astrofísica nuclear		3.1.1. Consumo e demanda mundial	
2.1.11. Astropartículas		3.1.2. Situação brasileira	
2.1.12. Matéria escura		3.1.3. Fontes alternativas	
2.2. ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO .....	60	3.2. ELETRÔNICA .....	119
2.2.1. Os pilares do Big Bang		3.2.1. Spintrônica	
2.2.2. A aceleração do universo		3.2.2. Sistemas orgânicos e supramoleculares	
2.3. MANIPULAÇÃO QUÂNTICA DE ÁTOMOS, MOLÉCULAS E FÓTONS .....	68	3.2.3. Dispositivos optoeletrônicos	
2.3.1. Laser de átomos		3.2.4. Transistores de filmes finos orgânicos	
		3.2.5. Circuitos integrados	
		3.3. NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA .....	129
		3.3.1. Principal suporte da N&N	
		3.3.2. Dois métodos de nanofabricação	

3.3.3. Auto-organização na escala nanométrica	
3.3.4. Nanotubos de carbono	
3.3.5. Nanoestruturas com magneto-resistência gigante	
3.3.6. N&N no diagnóstico e tratamento médico	
3.3.7. Partículas magnéticas porosas	
<b>3.4. METROLOGIA CIENTÍFICA</b>	141
3.4.1. Linguagem comum e padronizada	
3.4.2. Necessidades e propostas	
<b>3.5. INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA</b>	143
3.5.1. Ações afirmativas	
3.5.2. Recomendações para o Brasil	
<b>3.6. FÍSICA MOLECULAR</b>	151
3.6.1. Breve histórico	
3.6.2. Proximidade de áreas	
3.6.3. Simulações computacionais	
3.6.4. Destaques da atuação	
<b>3.7. FÍSICA MÉDICA</b>	156
3.7.1. Diagnóstico por imagem	
3.7.2. Radioterapia	
3.7.3. Proteção radiológica e vigilância sanitária	
3.7.4. Radiações não ionizantes	
3.7.5. Outras áreas	
3.7.6. Principais desafios	
<b>3.8. SIMULAÇÃO E MODELAGEM</b>	173
3.8.1. Previsão do tempo e descrição climática	
3.8.2. Ecologia e meio ambiente	
3.8.3. Tráfego em grandes cidades	
3.8.4. Física em economia e finanças	
<b>3.9. FÍSICA NA BIOLOGIA</b>	183
3.9.1. Enovelamento de proteínas	
3.9.2. Inibidores enzimáticos	
3.9.3. Fotobiologia	
<b>3.10. MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO</b>	186
3.10.1. Poluição atmosférica urbana	
3.10.2. Poluição atmosférica global	
3.10.3. Balanço de radiação planetária	
<b>3.11. ECOLOGIA E MEIO AMBIENTE</b>	192
3.11.1. Modelagem atmosférica e de poluentes	
3.11.2. Queimadas e poluição hídrica	
3.11.3. Pós-graduação no Brasil	
<b>3.12. A pesquisa em ensino de física</b>	196
3.12.1. Pesquisas sobre ensino e aprendizagem	
3.12.2. Pesquisas em alfabetização científica	
3.12.3. Tecnologia e ensino de física	
3.12.4. A pesquisa em formação de professores	
<b>4. Desafios estruturais</b>	204
<b>4.1. INFRA-ESTRUTURA E PESQUISA</b>	204
4.1.1. Compartilhamento da infra-estrutura	
4.1.2. Pesquisa induzida, básica e iniciativas individuais	
4.1.3. Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa	
<b>4.2. PESQUISA FORA DA ACADEMIA</b>	213
4.2.1. Oportunidades perdidas	
<b>4.3. TEORIA E EXPERIMENTO</b>	218
<b>5. Formação de recursos humanos</b>	220
<b>5.1. FORMAÇÃO CIENTÍFICA</b>	220
5.1.1. Resultado preocupante	
<b>5.2. FORMAÇÃO DE PESQUISADORES</b>	221
5.2.1. Cursos de graduação mais flexíveis	
5.2.2. Ênfase nas físicas moderna e contemporânea	
<b>5.3. FORMAÇÃO PARA A TECNOLOGIA E INOVAÇÃO</b>	225
5.3.1. Programa de interação com a indústria	
<b>5.4. FORMAÇÃO DE PROFESSORES</b>	227
5.4.1. Dois modelos de currículos	
5.4.2. Vestibular e reformulação da licenciatura	
<b>6. Inclusão científica e tecnológica</b>	234
<b>6.1. EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA E TECNOLOGIA</b>	234
6.1.1. O ensino de física e a escola fundamental e média	
6.1.2. Programas de formação continuada	
6.1.3. O potencial de formação de professores de física	
<b>6.2. ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA</b>	241
<b>6.3. DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E O ENSINO FORMAL DA CIÊNCIA</b>	242
6.3.1. Quadro brasileiro	

## INTRODUÇÃO

**Este livro dá continuidade** à série periodicamente publicada pela Sociedade Brasileira de Física e que tem como objetivo fazer um balanço do estado das pesquisas nos assuntos mais relevantes em física, no Brasil e no mundo. Fazemos, portanto, a projeção dos grandes desafios que provocam os cientistas – e que, acreditamos, servirão de base para os progressos relevantes na próxima década –, bem como apontamos áreas em que as contribuições de cientistas brasileiros poderão ser relevantes. Além disso, abordamos tópicos multidisciplinares em que a presença dos conceitos e das práticas da física tem sido essencial para o avanço do conhecimento. Essa abordagem não é exaustiva, mas ilustra o papel-chave que essa disciplina tem – e certamente terá – para o progresso consistente de todas as áreas da ciência e da tecnologia.

O Programa de Pós-graduação adotado pelo Brasil nas últimas décadas tem tido um notável sucesso, sendo hoje modelo para muitas nações. O crescimento da física, medido por parâmetros indicativos de produtividade científica, tem acompanhado o sucesso da pós-graduação. No entanto, esse



sucesso começa a enfrentar problemas estruturais: os recursos humanos gerados não são absorvidos em funções apropriadas e o conhecimento científico produzido não tem a repercussão esperada. Estudamos a infra-estrutura de pesquisa disponível no País e os mecanismos de apoio à pesquisa, procurando identificar gargalos e apontar alternativas que nos permitam avançar na solução dos problemas estruturais mencionados.

Examinamos a estrutura educacional associada à física, identificando problemas e apontando soluções. Discutimos, com detalhes, seu papel na preparação de quadros para um salto qualitativo no avanço tecnológico brasileiro, viabilizando nossa competitividade internacional em todas as áreas de atividades econômicas. Discutimos extensivamente a formação científica de nossa população e os mecanismos para tornar esse processo mais efetivo, pois acreditamos ser essa uma componente central da democracia e do pleno exercício da cidadania.

O potencial da física não se limita apenas aos tópicos que são centrais à disciplina. A formação e a prática dos físicos dão a eles uma flexibilidade que permite abordar problemas de natureza variada. Ferramentas usadas num certo contexto são com frequência adaptadas para uso em outras aplicações – há abundância de exemplos explorados no texto. As ferramentas e as técnicas usadas pelos físicos podem ser úteis numa ampla gama de problemas brasileiros que *a priori* não fazem parte da seara deles.

Discutimos e apontamos situações em que a física pode ser parte da solução dos problemas.

## SUMÁRIO E RECOMENDAÇÕES

Há, hoje, no Brasil, condições objetivas para um salto qualitativo no cenário científico. Esse salto, ancorado na formulação de uma agenda para a ciência do País, tem como vertentes, por um lado, a inserção econômica e social das atividades científicas visando benefícios palpáveis para a sociedade brasileira e, por outro, a promoção de várias áreas da nossa ciência a um papel de liderança mundial.

A física tem papel central nesse processo. No entanto, entendemos que somente com uma integração efetiva com outras áreas da ciência e das engenharias ele ocorrerá. A concretização desse salto terá de ser apoiada no tripé: formação contínua de quadros científicos de excelente qualidade, apoio consistente aos grupos de cientistas competitivos internacionalmente e expansão das infra-estruturas de apoio.

A ciência é um instrumento de Estado indispensável para o equacionamento dos problemas que nos afligem, para os quais não há solução fora da modernização de nossa sociedade e de sua inserção na era da inovação. É um elemento central na busca da competitividade internacional de nossos meios de produção e o alicerce de um programa voltado para uma política industrial, tecnológica e de comércio exterior.

O planejamento necessário para induzir o salto de qualidade equilibra-se na linha tênue que separa resultados programados – ou induzidos – daqueles que resultam do processo espontâneo da pesquisa científica. Esses dois elementos devem conviver, alimentando-se mutuamente. Entendemos também que os Fundos Setoriais – hoje fonte significativa do financiamento das atividades científicas no País – devem contemplar, com generosidade e abrangência, a cadeia de conhecimento que vai da bancada do laboratório ao produto numa vitrine. Sem isso, as ciências que dão suporte ao desenvolvimento de novas tecnologias não terão fôlego, limitando, assim, a possibilidade de avanço tecnológico.

Resumimos aqui nossas recomendações mais relevantes em dois tópicos. O primeiro aborda os desafios estruturais; o segundo, as questões referentes à formação de recursos humanos.

## DESAFIOS ESTRUTURAIS

**LABORATÓRIOS NACIONAIS.** A infra-estrutura de apoio às atividades científicas devem ser ampliadas e diversificadas em sua dimensão e alcance. Os chamados Laboratórios Nacionais devem ter suas ações consolidadas, e novos devem ser criados, com o papel de estruturar áreas promissoras, buscando canalizar ações multidisciplinares. Seria interessante que os Laboratórios Nacionais estendessem a cadeia de seu conhecimento e o âmbito de sua ação, criando ligações com as aplicações tecnológicas. Estruturas intermediárias, com foco na solução de problemas científicos bem delimitados, podem ser criadas, na forma de Institutos Temáticos. A criação de novos Laboratórios Nacionais ou Institutos Temáticos tem de se basear em critérios estritamente técnicos.

**EDITAIS UNIVERSAIS.** É necessário que os recursos destinados aos editais universais do CNPq sejam substancialmente aumentados. Há uma demanda reprimida muito grande, uma vez que a comunidade científica do País tem crescido muito rapidamente e os recursos têm sido muito escassos.

**APOIO INSTITUCIONAL.** Deve-se considerar a possibilidade de retomada do apoio institucional, numa versão aprimorada do programa realizado pela Finep por duas décadas e que teve grande impacto sobre a ciência do Brasil. Nossas instituições acadêmicas são a grande base científica do País, que muito ganharia com seu fortalecimento.

**PROJETOS INTERNACIONAIS.** A participação de cientistas brasileiros em grandes projetos de natureza internacional tem interesse estratégico para o País. Além dos grandes desafios científicos que esses projetos oferecem, é através deles que obteremos tecnologias avançadas que normalmente não nos seriam acessíveis. A escolha de projetos e de equipes – bem como do grau de participação destas últimas – devem ser avaliados criteriosamente. Uma vez estabelecida a participação em um projeto, é essencial que os compromissos assumidos pelas agências brasileiras sejam fielmente honrados. O envolvimento das indústrias brasileiras nesses projetos é um objetivo que deve sempre ser levado em consideração.

**INSTITUTOS DE PESQUISA TECNOLÓGICA.** A criação de institutos de pesquisa tecnológica, em cooperação com empresas, para resolver impasses tecnológicos, é um elemento importante de uma política industrial e tecnológica. A associação de universidades e de programas de pós-graduação com esses institutos

cria possibilidades ricas de avanços. Projetos de tese poderiam ser formulados por empresas e, em certos casos, o aluno iria para a empresa proponente após término de sua pós-graduação. Associados a essa recomendação, estão também o apoio e o estímulo à criação de institutos de pesquisa e desenvolvimento tecnológicos nas empresas, com a absorção do pessoal bem qualificado que tem sido formado por nosso programa de pós-graduação.

**DISTRIBUIÇÃO REGIONAL.** Uma distribuição mais equilibrada da ciência no território brasileiro trará benefício a todos. A criação de Institutos Temáticos com característica multidisciplinar – possivelmente associados a problemas científicos que tenham especificidades regionais – pode ser um mecanismo eficaz para esse fim.

**TEORIA E EXPERIMENTO.** É necessário promover um melhor balanço entre as atividades experimentais e teóricas através da formação de um maior número de físicos experimentais. A atual situação de precariedade dos laboratórios e os prazos rígidos de bolsas de formação dificultam esse processo. O prazo de bolsas de doutorado para teses experimentais deveria ser mais longo que aquele para teses teóricas – talvez, estendendo-o para cinco anos. Além disso, um bom número de estudantes com desempenho excelente deveria ser enviado para fazer doutorado nos centros mais importantes no exterior, em áreas de física experimental de ponta.

**BOLSAS DE PRODUTIVIDADE DE PESQUISA.** O programa ‘Bolsas de Produtividade de Pesquisa’ (BPq), do CNPq, precisa ser ampliado. Ele custa apenas cerca de R\$100 milhões por ano e tem tido grande impacto num sistema universitário que custa mais de R\$ 9 bilhões por ano. Todos os pesquisadores com mérito deveriam ter a BPq, que é hoje o único diferenciador de mérito nas universidades federais. No sistema adequadamente ampliado, o mérito pedagógico deveria também ser contemplado. Além disso, os valores da bolsa de formação devem ser atualizados.

## FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

**CIÊNCIA EXPERIMENTAL.** O sistema de educação em ciências nos ensinos fundamental e médio deve ser revisto com urgência, com o objetivo de induzir uma mudança cultural nos estudantes, bem como nos professores.

Métodos empíricos das ciências devem ser enfatizados e, para isso, as escolas devem dispor de laboratórios. Esse tipo de conhecimento tem de ser valorizado na seleção dos candidatos ao ensino superior, pois, sem isso, as escolas não terão motivação para promover o ensino da ciência experimental.

**LICENCIATURA.** Os cursos de licenciatura em física precisam ser revistos. Em especial, eles devem conter mais física moderna e contemporânea. Para que jovens de talento sejam atraídos para a ciência, eles têm de vê-la como algo fortemente inserido no mundo contemporâneo. Os professores devem ser preparados para ensinar física experimental sem ter de recorrer a laboratórios sofisticados. O professor também tem de entender melhor como o estudante adquire as noções fundamentais da física.

**ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA.** Num programa nacional de longo prazo em alfabetização científica, todos os cidadãos devem ser preparados para viver num mundo cada vez mais dominado pela ciência e pela tecnologia. A ampla divulgação científica apresenta-se como uma das melhores estratégias para cumprir esse objetivo.

**CICLO BÁSICO.** A implantação de ciclos básicos nas universidades diminuirá a pressão para a especialização precoce na educação de nível superior. Terá ainda a virtude de permitir uma maior flexibilidade na montagem do elenco de disciplinas de cada estudante, dando maior riqueza ao sistema e facilitando a mobilidade dos alunos em cursos multidisciplinares.

**FORMAÇÃO INTERDISCIPLINAR.** Cursos novos que transponham as fronteiras tradicionais das disciplinas devem ser criados tanto na graduação quanto na pós-graduação. A formação interdisciplinar e a capacidade para trabalho em equipe em problemas temáticos devem ser enfatizadas.

**CARREIRAS FLEXÍVEIS.** As reorientações de carreira devem ser flexibilizadas no ensino superior. Para isso, a opção de carreira dos estudantes deve ser feita após o ciclo básico, e as pós-graduações devem estar mais abertas para excelentes alunos que fizeram graduação em outras áreas.

**REGULAMENTAÇÃO DAS PROFISSÕES.** A rígida regulamentação das profissões no Brasil é incompatível com o dinamismo com que atualmente se movimenta o recorte das profissões de nível superior e, portanto, precisa ser amplamente revista buscando a flexibilização.

# 1. O QUE É A FÍSICA



TEATRION/FEMINILAB

## 1.1. A FÍSICA NO MUNDO CONTEMPORÂNEO

O universo originou-se há cerca de 14 bilhões de anos em uma explosão, o chamado Big Bang, e, desde então, está se expandindo. A atração gravitacional mútua dessa massa deveria estar provocando uma diminuição de sua velocidade de expansão. No entanto, ele está se expandindo de forma acelerada, alimentado por uma fonte de energia misteriosa, a chamada energia escura. Dados atuais indicam que na composição do universo só cerca de um terço está na forma de matéria; o resto encontra-se como energia escura. Na parte material, apenas cerca de 5% estão na forma de estrelas, planetas, gases interestelares, poeira, partículas elementares (neutrinos), corpos celestes (buracos negros, por exemplo), ou seja, na forma de matéria que podemos identificar. O restante encontra-se na forma de matéria escura, cuja natureza ainda desconhecemos. Energia e matéria escuras não interagem com a luz, isto é, com a radiação eletromagnética. Conseqüentemente, a

Só 5% da matéria do universo estão na forma de estrelas, planetas, gases interestelares, poeira, partículas elementares, corpos celestes; o restante encontra-se na forma de matéria escura, cuja natureza ainda desconhecemos

presença delas só pode ser inferida por seu efeito gravitacional sobre os constituintes do chamado universo visível. Desvendar a natureza de ambas é um dos grandes desafios da física atual.

Aceleradores com dimensões ciclópicas geram colisões de partículas a altíssimas energias, entreabrindo uma janela para a estrutura microscópica do espaço-tempo, que pode ser entendido como a união inseparável das três dimensões espaciais (altura, largura e comprimento) e da quarta dimensão, o tempo. Esse conhecimento nos permite decifrar as leis fundamentais que regem o comportamento da matéria e nos ajuda a compreender o próprio universo. Entre o cosmo e

o infinitesimal, está a matéria, na escala terrestre, domada, hoje, átomo a átomo, molécula a molécula, com conseqüências que permeiam todo o nosso cotidiano.

Os avanços recentes da física são fruto de um balanço dinâmico entre teoria e experimento. Previsões teóricas motivam novos experimentos, que, por sua vez, iluminam novas abordagens para explicar os fenômenos naturais. O motor desses avanços são as ferramentas inventadas para explorar novas regiões do espaço-tempo, para manipular a matéria ou, então, para desvendar fenômenos físicos até então inacessíveis. Essas ferramentas alimentam e são alimentadas pelo progresso tecnológico, sendo parte intrínseca dele. Não há medalhas de prata para as descobertas científicas. A primazia da descoberta é a força-motriz para a invenção de novos instrumentos científicos. Com freqüência, as ferramentas que movem os avanços científicos têm aplicações muito diferentes daquelas para as quais foram desenhadas. A conexão entre essas ferramentas e suas aplicações no cotidiano nem sempre são diretas ou óbvias.

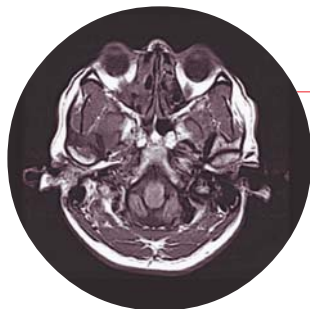
**Não há medalhas de prata para as descobertas científicas; a primazia da descoberta é a força-motriz para a invenção de novos instrumentos**

### 1.1.1. A física no dia-a-dia

A física é parte fundamental da base científica na qual se apóia a tecnologia contemporânea. As invenções derivadas das descobertas de fenômenos físicos tiveram um impacto tão abrangente e complexo no desenvolvimento tecnológico que, com freqüência, perde-se a visão das interconexões. Toda a eletrônica contemporânea – presente em praticamente todos os aspectos das atividades humanas – é derivada da descoberta do transistor. As telecomunicações por **fibras ópticas** estão associadas à descoberta do laser. Hoje, uma fração significativa do Produto Interno Bruto (PIB) dos países avançados está associada a tecnologias baseadas na física quântica. Segundo o físico norte-americano Leon Lederman, prêmio Nobel de física de 1988, um terço do PIB norte-americano em 2001 era proveniente dessas tecnologias.

**Um terço do PIB norte-americano em 2001 era proveniente de tecnologias derivadas da física quântica**





Os equipamentos de diagnóstico por imagem empregados atualmente pela medicina são derivados de instrumentos desenvolvidos em experimentos de física. Tomógrafos, que equipam hoje um grande número de hospitais no Brasil, têm sua origem em detectores de partículas. Os equipamentos de imagem por ressonância magnética nuclear (NMR na sigla inglesa), capazes de identificar lesões cancerosas com dimensões de fração de milímetro, são derivados da pesquisa em física atômica e da invenção do radar. Aceleradores de partículas, eficientes no tratamento de alguns tipos de tumores sem induzir os contratempos de tradicionais tratamentos por radiação, vêm do estudo das propriedades microscópicas da matéria. Além de diagnóstico médico, tomógrafos, equipamentos de NMR e aceleradores de partículas têm muitas aplicações no setor industrial.

Uma família de instrumentos desenvolvidos por físicos nas últimas décadas permite a visualização e manipulação de materiais átomo por átomo. Isso deu origem a uma recente revolução na ciência e na engenharia dos materiais, resultando nas chamadas nanociência e nanotecnologia (N&N). Antevê-se que esta última terá enormes implicações na sociedade e que resultarão tanto em materiais mais avançados quanto em fármacos mais eficientes e com menos efeitos colaterais. Acredita-se que a nanotecnologia será a plataforma de partida de uma revolução cujo impacto social será superior ao de outras por quais a humanidade passou, como a da agricultura, da indústria e da microeletrônica.

A informação digital produzida só em 2002 é equivalente a um livro com cerca de 25 mil páginas de texto para cada ser humano; só foi possível guardá-la graças ao grande avanço na compreensão das propriedades magnéticas da matéria

O armazenamento de informação digital tem crescido de forma explosiva. Para se ter uma idéia, em 2002, cerca de cinco exabytes ( $5 \times 10^{18}$ ) de informação digital foram criados e armazenados no mundo, cerca de 800 megabytes ( $800 \times 10^6$  bytes) por habitante da Terra, o que é equivalente a um livro com cerca de 25 mil páginas de texto por pessoa. Cerca de 92% estão armazenadas em meios magnéticos, essencialmente discos rígidos. Guardar essa explosiva quantidade de informação só foi possível pelo grande avanço na compreensão das propriedades magnéticas da matéria.

O processo de produzir chips cada vez mais densos e com maior número de componentes continua seguindo a lei de Moore, que prevê a duplicação da



capacidade desses componentes a cada 18 meses. Esse avanço constante está lastreado no desenvolvimento de materiais mais puros e em processos industriais baseados em novos métodos desenvolvidos por físicos e engenheiros. No entanto, esses processos de fabricação estão cada vez mais próximos do que é possível manufacturar, pois, em poucos anos, os transistores dos *chips* estarão atingindo dimensões atômicas, domínio regido pelas leis da chamada mecânica quântica. Em resposta a esses desafios, já há um movimento da pesquisa em direção a uma mudança nos paradigmas de computação, na qual o processamento binário, que caracteriza o sistema atual, será expandido para abarcar a riqueza dos fenômenos quânticos. Assim, a computação quântica, como essa nova área é conhecida, traz consigo um amplo leque de possibilidades e aplicações. No entanto, materializar esse potencial através da construção de computadores quânticos que operem qubits – o equivalente quântico ao bit dos computadores convencionais – ainda é um desafio para a engenhosidade dos físicos.

Física avançada está presente em grande parte dos objetos de uso cotidiano. Para citar apenas um de muitos exemplos, efeitos da relatividade geral – teoria da gravitação idealizada pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) em 1915 – estão presentes nos equipamentos de GPS (sigla inglesa para Sistema de Posicionamento Global), usados por frotas de caminhões, montanhistas, naves espaciais, aviões, barcos e navios para determinar posições, no solo e no espaço, com erro que chega a ser inferior a um metro. No entanto, as pesquisas em física não estão direcionadas apenas à criação de objetos. Analistas de grandes centros financeiros usam cotidianamente métodos de simulação que envolvem conhecimentos de física e estatística para prever a evolução dos preços de ações e outros ativos financeiros.

Em poucos anos, os transistores dos *chips* estarão atingindo dimensões atômicas, domínio regido pelas leis da chamada mecânica quântica

### 1.1.2. Relações com a indústria

No Brasil, está crescendo uma interação interessante entre a indústria nacional e cientistas que trabalham em experimentos de fronteira. Por exemplo, nos pampas argentinos, cientistas de 15 países, incluindo o Brasil, estão finalizando a construção do Observatório Pierre Auger, cuja área será





SOAR

igual a três vezes a do município do Rio de Janeiro. O experimento, localizado ao sul de Mendoza (oeste da Argentina), será dedicado a observar os raios cósmicos ultraenergéticos, as partículas de mais alta energia produzidas no universo. Sua natureza e origem são um mistério. Um grande número de componentes desse observatório é produzido em indústrias brasileiras. Componentes ópticos e tanques plásticos que abrigam toneladas de água pura foram produzidos em São Paulo, enquanto baterias especiais que alimentam os detectores foram feitas em Pernambuco. O SOAR (sigla inglesa para Observatório Meridional de Pesquisa Astrofísica), recém-inaugurado no Cerro Pachón, nos Andes chilenos coloca a astronomia brasileira em pé de igualdade com a dos países desenvolvidos. Ele abriga um telescópio cujo espelho de 4,1 m foi construído por uma colaboração entre cientistas

brasileiros e norte-americanos, sendo que a indústria brasileira contribuiu com vários componentes desse instrumento.

Há uma correlação direta entre a rapidez do crescimento econômico e a ação sólida e consistente de governos que estimulam o avanço científico

Pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) inventaram um sensor gustativo

– a chamada língua eletrônica – baseado em filmes ultrafinos de plásticos (polímeros) condutores de eletricidade e capaz de avaliar padrões de paladar com maior precisão que a língua humana. Esse instrumento representa um grande avanço no controle de qualidade para as indústrias alimentícia e vinícola, bem como para estações de tratamento de águas.

Esses poucos exemplos ilustram o escopo da física e sua interação com outras áreas científicas e com a indústria, resultando numa sinergia que tem se mostrado extremamente eficaz para o desenvolvimento econômico das nações. Os países mais bem sucedidos no campo social e econômico têm estimulado esses avanços científicos e deles extraído imensos benefícios. Há uma correlação direta entre a rapidez do crescimento econômico e a ação sólida e consistente de governos que estimulam o avanço científico.



EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA

## 1.2. O ESCOPO DA FÍSICA

As fronteiras da física não estão delimitadas de modo preciso. Com frequência, tópicos de investigação são atacados por cientistas que se qualificam

por diferentes denominações. Escalas de tempo, de espaço, de energia também não são parâmetros que permitam delimitar especialistas. Em realidade, a principal característica da formação dos físicos é sua abrangência e relativa uniformidade. Quando se pergunta o que caracteriza um físico, as respostas são vagas. Mas há um consenso sobre as fundações da sua formação. Além da mecânica quântica, um físico tem que ter um conhecimento sólido de mecânica (estudo movimento e suas causas), eletromagnetismo (estudo dos fenômenos elétricos e magnéticos), termodinâmica (estudo do calor) e mecânica estatística (estudo das propriedades macroscópicas a partir do conhecimento de sua estrutura microscópica). Isso deve ser somado ao desenvolvimento de uma intuição sobre como realizar experimentos para investigar características da natureza.

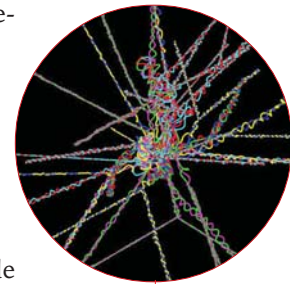
Sobre esses alicerces, constrói-se um físico. O diálogo constante entre a teoria e a experiência é parte essencial do avanço nessa disciplina. Em última análise, o papel da física é compreender a estrutura da natureza. Muitas vezes, os modelos teóricos alcançam um nível de abstração profunda, tendo como base estruturas matemáticas complexas e que apelam para a existência de dimensões do espaço imperceptíveis aos nossos sentidos.

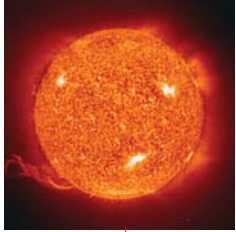
No final, as teorias, por mais elegantes que sejam do ponto de vista da matemática, devem explicar os fatos empíricos e poder ser testadas em relação às previsões de suas conseqüências. Porém, muitas vezes, novas experiências levantam dúvidas sobre a validade de modelos que são considerados satisfatórios. Matéria escura e energia escura – já mencionados anteriormente – são exemplos recentes desses conflitos.

### 1.2.1. Matéria e forças

Físicos, assim como cientistas de outras áreas, partem do pressuposto de que a natureza é passível de compreensão, ou seja, de que as regras que regem o comportamento do espaço-tempo e da matéria são universais e podem ser desvendadas. O programa de investigação das leis da natureza e da estrutura da matéria teve até hoje um sucesso extraordinário. A matéria, dissecada em seu âmago, é composta de poucas partículas: **quarks** (partículas que formam

**A principal característica da formação dos físicos é sua abrangência e relativa uniformidade**





NASA

os prótons e nêutrons, componentes do núcleo atômico), os léptons (família da qual faz parte o elétron) e os bósons vetoriais (partículas carregadoras das interações – ou forças – fundamentais da natureza). Nesta última categoria, o fóton, partícula de luz e responsável pela força eletromagnética, é o representante possivelmente mais conhecido.

Na natureza, conhecem-se apenas quatro forças. São elas que regem a dança e a organização da matéria. Assim, temos:

- i) a força forte, responsável pela aglutinação dos núcleos atômicos;
- ii) a força eletromagnética, que rege as relações atômicas e moleculares, e em última instância todos os fenômenos da vida;
- iii) a força fraca, associada à radioatividade dos elementos, entre outras ações, e que também regula o comportamento das estrelas, como o Sol;
- iv) a mais fraca das forças, paradoxalmente a mais óbvia para nós, a força gravitacional, que nos mantém em segurança na superfície terrestre, mas é impiedosa quando caímos de uma escada.

**Na natureza, conhecem-se apenas quatro forças; são elas que regem a dança e a organização da matéria**

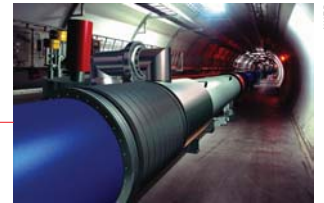
As três primeiras forças, agregadas no que hoje é chamado de modelo padrão para as interações fundamentais da natureza – ou simplesmente modelo padrão –, são descritas por uma estrutura matemática única, chamada teoria de campos com simetrias de ca-

libre, que, por sua vez, está baseada na mecânica quântica e na relatividade restrita, esta publicada por Einstein em 1905, portanto há exatos cem anos. Unificar – ou, pelo menos, harmonizar – a gravitação com as outras três forças tem se mostrado um problema formidável, desafiando os mais brilhantes cérebros da ciência – inclusive o do próprio Einstein – desde o início de século passado, quando surgem as primeiras tentativas de juntar, em uma só teoria, a gravitação e o eletromagnetismo. A própria harmonização da gravitação com a mecânica quântica é um problema ainda sem solução.

### 1.2.2. Do macro ao microcosmo

Grande parte dos experimentos que investigam as dimensões microscópicas da matéria é hoje muito complexa, envolvendo tipicamente centenas de físicos, engenheiros e técnicos. O conhecimento necessário para construir um experimento nessa escala foge à competência de um único laboratório

ou mesmo de um país. Os aceleradores de partículas, nos quais ocorrem os choques extremamente energéticos entre constituintes da matéria, têm dimensões de quilômetros. Outros experimentos são realizados em minas profundas ou até mesmo no pólo Sul. Os sensores empregados nessas experiências – para captar as partículas criadas nos choques ou aquelas que vêm do espaço – têm centenas de toneladas e são dotados de um circuito eletrônico sofisticados. A administração da construção de um desses empreendimentos científicos – com cientistas analisando dados espalhados pelo mundo e com componentes vindo de diversos fornecedores – é um desafio bastante exigente. A *World Wide Web* (WWW) surgiu como ferramenta para coordenar esses experimentos no **CERN** – atualmente, denominado Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear –, localizado na Suíça e o maior laboratório do mundo de física de partículas.



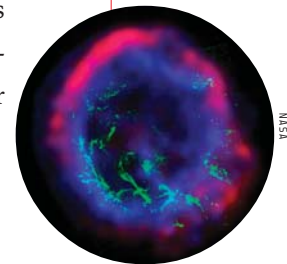
As propriedades microscópicas da matéria estão conectadas com a estrutura do universo. A descoberta, em 1964, da radiação cósmica de fundo – radiação na frequência de microondas que banha todo o universo e pode ser entendida como um ‘eco’ do Big Bang – foi um grande salto ao dar suporte experimental às previsões da cosmologia (área que estuda a origem e a evolução do universo como um todo). Podemos mapear a história do universo até cerca de 14 bilhões de anos atrás, quando é identificado o que pode ser chamado seu início. Essa história é consistente tanto com as medidas da taxa de expansão do universo – taxa com que as galáxias distantes da Terra se afastam umas das outras – quanto com a abundância de elementos leves, como deutério, hélio, lítio no universo.

**A *World Wide Web* surgiu como ferramenta para coordenar experimentos no campo das partículas elementares**

**Podemos mapear a história do universo até cerca de 14 bilhões de anos atrás, quando é identificado o que pode ser chamado seu início**

Os elementos mais pesados são sintetizados no interior das galáxias, em explosões de estrelas no final da vida, fenômeno denominado **supernova**. O próprio significado de início do espaço-tempo é assunto de acalorados debates, mas compreender seu sentido está associado a compreender a unificação de todas as forças da natureza. As teorias idealizadas para atacar esses problemas levam a noções como:

- i) a existência de dimensões além das quatro que constituem o espaço-tempo (altura, largura, comprimento e tempo),



sendo que essas dimensões extras não são perceptíveis aos nossos instrumentos e sentidos;

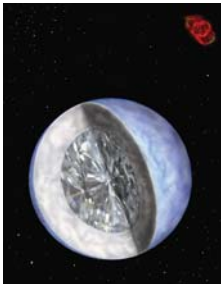
- ii) a de objetos fundamentais que oscilam nessas dimensões invisíveis e se comportam como cordas, laços e membranas, desempenhando o papel das partículas elementares.

O próprio espaço-tempo não é um cenário passivo para os fenômenos, mas uma estrutura dinâmica. Entre as dimensões cosmológicas e as escalas subatômicas, está a matéria ordinária, que também tem comportamento rico e complexo. A matéria está organizada em estruturas com todas as

escalas de dimensão. As partículas fundamentais se organizam em núcleos e átomos. Estes em moléculas, tomado formas líquidas, gasosas e sólidas, formando estruturas complexas, com notáveis variações de propriedades, dependendo de

Estrelas colapsam, restando-lhes um núcleo gigante formado apenas por nêutrons – outras têm núcleos cristalizados na forma de um imenso diamante; mas, certamente, a mais fascinante organização da matéria ocorre na formação dos seres vivos

ligeiras variações ambientais. Vide o congelamento da água, com sua rica estrutura de cristais de gelo. Estrelas colapsam, restando-lhes um núcleo gigante formado apenas por nêutrons – outras têm núcleos cristalizados na forma de um imenso diamante. Mas, certamente, a mais fascinante organização da matéria ocorre na formação da matéria orgânica e dos seres vivos.



### 1.2.3. Reduccionismo e universalidade

O programa reducionista – que procura dissecar cada componente da matéria e identificar a estrutura da relação entre seus componentes – tem um sucesso impressionante. O modelo padrão das partículas elementares estabelece relações entre propriedades da matéria que podem ser testadas com resultados com incrível precisão. As estruturas de aglomerados da matéria podem ser vinculadas às leis formuladas estabelecidas por esse modelo. Mas essa abordagem enfrenta enormes dificuldades para derivar as propriedades da matéria em grande escala a partir das leis fundamentais. O problema tem origem nas limitações de nossas ferramentas analíticas e computacionais. Para o estudo da estrutura da matéria aglomerada, acabamos por estabelecer outra estratégia de abordagem, formulando leis e regras próprias, criando

sua consistência através da validação experimental e testando os limites de sua aplicação. Essa contingência gerou a necessidade de se organizar o estudo dos sistemas materiais nas várias ciências naturais: a física, a química, a biologia, a geologia etc.

Uma abordagem no estudo de aglomerados de matéria que tem tido grande sucesso nas últimas décadas procura abstrair os detalhes das interações dos componentes de um sistema, deslocando o foco para o comportamento coletivo de sistemas complexos. No último terço do século passado, descobriu-se o fenômeno da universalidade, ou seja, o de que os sistemas complexos de várias áreas do conhecimento – por exemplo, da física à antropologia – têm propriedades em comum. O estudo dessas características similares revelou que os fenômenos realmente relevantes apresentados pelos sistemas complexos podem ser entendidos sem que se percorra toda a cadeia de causalidade, que vai do comportamento dos átomos ao comportamento do sistema em sua coletividade.

Na verdade, o significado da universalidade é exatamente este: o comportamento coletivo de um corpo com número muito grande de partículas frequentemente apresenta leis que não são sensíveis aos detalhes da interação entre suas partículas constituintes – essas leis decorrem apenas de simetrias contidas no sistema e das interações das partículas. Por isso, as mesmas leis podem ser observadas em sistemas inteiramente diferentes em seus aspectos microscópicos. As leis do comportamento coletivo do sistema de partículas – em outras palavras, as leis macroscópicas do sistema – se classificam em um número relativamente reduzido de classes, as chamadas classes de universalidade, cuja existência simplifica enormemente o estudo da complexidade e está sendo explorada com grande êxito. Na verdade, mesmo sistemas dinâmicos que não podem ser classificados como sistemas físicos – por exemplo, o mercado financeiro – estão sendo abordados com base nas leis de universalidade.

O aumento exponencial do poder dos computadores tem permitido a realização de cálculos baseados no comportamento dos átomos constituintes

Para o estudo da estrutura da matéria aglomerada, acabamos por estabelecer uma abordagem com leis e regras próprias; isso gerou a necessidade de se organizar o estudo dos sistemas materiais nas várias ciências naturais

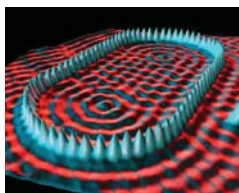
Mesmo sistemas dinâmicos que não podem ser classificados como sistemas físicos – por exemplo, o mercado financeiro – estão sendo abordados com base nas leis de universalidade



Atualmente, já é possível programar as propriedades de grande parte dos novos materiais antes que eles tenham sido produzidos, o que permite o rápido desenvolvimento deles e o aprimoramento de materiais já existentes

e nas propriedades de sistemas cada vez mais complexos. O exemplo mais emblemático dessa conquista é a chamada química quântica, que investiga teoricamente as moléculas a partir de seus componentes atômicos e das leis da

mecânica quântica. As propriedades de moléculas cada vez mais complicadas podem ser explicadas – ou até mesmo previstas – pelos métodos dessa disciplina, que também estão sendo usados cada vez mais e com grande êxito na ciência dos materiais. Atualmente, já é possível programar as propriedades de grande parte dos novos materiais antes que eles tenham sido produzidos, o que permite o rápido desenvolvimento deles e o aprimoramento de materiais já existentes.



IBM/ALAMEN

Os métodos da física têm sido aplicados com sucesso em várias ciências naturais. Além disso, físicos têm criado poderosos instrumentos que têm permitido grandes avanços em outras ciências e na medicina. Exemplos relativamente recentes desses instrumentos são o microscópio de tunelamento eletrônico e suas variantes, que permitem a visualização e a manipulação da matéria na escala atômica; os lasers de pulsos ultracurtos, que tornaram possíveis o desenvolvimento da femtoquímica, área que estuda as reações químicas praticamente em tempo real; e os diversos instrumentos de diagnóstico por imagem empregados amplamente pela medicina. O prêmio Nobel de medicina e fisiologia de 2003 foi dado a um físico e a um químico pela invenção do método de imagens por ressonância magnética nuclear. Por sinal, este e outros equipamentos hoje largamente empregados pela medicina foram desenvolvidos a partir de descobertas feitas por físicos trabalhando em pesquisas que inicialmente não tinham nenhum objetivo prático. Muitos desses físicos acabaram levando o Nobel de química ou de medicina e fisiologia.

Equipamentos hoje largamente empregados pela medicina foram desenvolvidos a partir de descobertas feitas por físicos trabalhando em pesquisas que inicialmente não tinham nenhum objetivo prático

### 1.3. A NATUREZA DA PESQUISA CIENTÍFICA

A pesquisa científica é um instrumento essencial na abordagem dos desafios e na busca de soluções para os problemas sociais e econômicos. Cada vez mais, a sociedade – inclusive no Brasil – demanda



transparência na aplicação dos recursos públicos e, dessa forma, passa a exigir também a explicitação dos resultados dos investimentos feitos no parque científico e tecnológico. Em nível mundial, a progressiva limitação dos recursos disponíveis para o financiamento do crescente, complexo e diverso esforço científico levou à superação do modelo linear de financiamento da pesquisa básica e aplicada dominante desde o final da Segunda Guerra Mundial. Prioridades e escolhas passam a fazer parte do projeto estratégico de desenvolvimento de cada nação.

**Pesquisas não aplicadas podem gerar a invenção de instrumentos cujas aplicações na têm relação direta com a motivação original**

O investimento em pesquisas não aplicadas – como a investigação sobre buracos negros ou a estrutura microscópica da matéria – pode gerar a invenção de instrumentos que encontram aplicações sem nenhuma relação direta com a motivação original. Citaremos só um exemplo recente cujo impacto na economia internacional é praticamente incalculável: a invenção da WWW (*World Wide Web*) – o mecanismo usado para estabelecer a rede mundial de comunicação entre computadores – foi fruto de experimentos em física básica realizados no CERN.

A invenção do WWW – que, curiosamente, nunca foi patenteada e, provavelmente, por isto teve tão vasto impacto – justifica todo o investimento realizado pelos países europeus ao longo dos anos no CERN. A crescente pressão para que a ciência mostre prontamente sua relevância para a sociedade – através da prestação de serviços, da invenção e do desenvolvimento de produtos – é fruto da incompreensão dos mecanismos de relacionamento entre a ciência e a sociedade.

**A invenção da WWW justifica todo o investimento realizado pelos países europeus no CERN, o maior laboratório de física de partículas do mundo**

### 1.3.1. Investimento, empresas e avaliação

Nos Estados Unidos, onde a relação entre as companhias privadas, as universidades e os institutos de pesquisa está entre as melhores do mundo, o financiamento de pesquisas científicas em universidades pelo setor privado é muito pequeno: a fração dos investimentos privados em pesquisa nas univer-



sidades norte-americanas é de 7%. Lá, o MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) – que é um caso extremo de investimento privado – recebe 15% de seus fundos de pesquisa de companhias privadas. Por outro lado, examinando com cuidado essas empresas, vê-se que uma parte significativa delas tem suas pesquisas subsidiadas pelo governo norte-americano, na forma de pesquisas para o setor de segurança (militar). Os industriais dos Estados Unidos são conscientes

da importância da pesquisa científica, tanto que, recentemente, quando os fundos de fomento científico começaram a diminuir naquele país, eles foram os primeiros a exigir publicamente o aumento do investimento do governo no setor, chamando a atenção para a sua importância.

Os desdobramentos sociais e econômicos do investimento em pesquisa básica são notados em escalas de tempo diferentes. No curto prazo, é o mais eficiente mecanismo de formação de pessoal para atuar em todas as etapas do processo produtivo. O elemento humano é o principal produto do processo científico – é ele que transfere a cultura científica para o processo produtivo. Em médio prazo, induz a cultura científica em todo processo produtivo e, em longo prazo, gera os alicerces para o progresso e as mudanças de paradigmas na sociedade.

**O financiamento de pesquisas científicas em universidades pelo setor privado é muito pequeno: a fração dos investimentos privados em pesquisa nas universidades norte-americanas é de 7%.**

Os gestores da política de ciência e tecnologia se defrontam com o problema de avaliar em que tipo de projetos alocar seus recursos e como garantir que eles tenham efeitos multiplicadores. A neces-

sidade desse tipo de decisão obviamente decorre do fato de os fundos serem limitados, os investimentos em ciência terem que concorrer com prioridades sociais mais prementes à primeira vista. Vale adiantar que não há país que tenha encontrado uma solução ótima para esse problema. Uma vez encontrada a definição política sobre os eixos estratégicos de um programa de desenvolvimento científico e tecnológico nacional, um critério usualmente praticado em países com longa tradição científica é o da avaliação por pares para a escolha dos projetos mais promissores que atendam às definições de objetivo, escala e cronograma de desenvolvimento específico.

Programas científicos têm sempre cronogramas e metas que podem ser bem definidos. Assim, para uma gestão eficiente dos recursos, mecanismos

de avaliação e acompanhamento bem elaborados são ferramentas essenciais. Já faz parte da cultura científica de vários países – inclusive do Brasil – o processo de avaliação e acompanhamento pelos pares. Ele permite, se realizado criteriosamente, aferir a evolução de programas de pesquisa, redirecionando-os ou, eventualmente, finalizando-os, quando apropriado.

**Não há país que tenha encontrado uma solução ótima para o problema de avaliar em que tipo de projetos alocar seus recursos e como garantir que eles tenham efeitos multiplicadores**

### 1.3.2. Educação científica e inovação

A educação em ciência, em todos os níveis e áreas, dá ao estudante uma visão do mundo fundamentada na observação objetiva. Esse tipo de treinamento é um instrumento essencial numa sociedade democrática contemporânea. A incorporação do conhecimento científico à cultura popular é outro aspecto dessa mesma questão. Estamos, hoje, diante de questões cujo entendimento, debate e encaminhamento de possíveis soluções exigem cada vez mais da população uma base mínima de conhecimento científico. Alguns exemplos em que essa premissa se aplica: o cultivo e o uso de produtos transgênicos; o aquecimento global; o uso de águas; a disseminação da tecnologia de equipamentos de vigilância; o uso da clonagem terapêutica e mesmo da clonagem humana. Esses temas exigem decisões éticas e políticas que transcendem as opiniões de técnicos ou de grupos de especialistas e que, em última análise, devem necessariamente ser feitas por toda a sociedade. Assim, sem alguma alfabetização científica, o indivíduo ficará incapacitado para exercer plenamente sua cidadania.

O processo de inovação tecnológica tem como participantes não apenas engenheiros ou cientistas com doutorado. Todos os elementos da cadeia de um processo de produção – que vai do pátio de uma fábrica à sua diretoria – são seus agentes. A cultura da invenção e da experimentação deve ser estimulada desde cedo na formação dos estudantes. Um bom programa de inovação tecnológica – o que vale também para o Brasil – deve, necessaria-

**Sem alguma alfabetização científica, o indivíduo ficará incapacitado para opinar sobre questões como transgênicos, aquecimento global ou clonagem e, portanto, será incapaz de exercer plenamente sua cidadania**



mente, contemplar a melhoria do ensino científico no nível fundamental. As ações apropriadas devem ser tomadas em conjunto com os agentes responsáveis pelo ensino fundamental no país.

Portanto, um bom programa de desenvolvimento científico e tecnológico:

- i) gera o conhecimento necessário para os avanços tecnológicos que sustentam o desenvolvimento econômico;
- ii) contribui decisivamente para a montagem da infra-estrutura tecnológica;
- iii) provê pessoal capacitado para enfrentar os desafios das novas descobertas e utilizar os frutos dos avanços científicos;
- iv) contribui para a melhoria da qualidade de vida da população;
- v) estabelece paradigmas de competição/cooperação que são referências para o balizamento das relações internacionais;
- vi) é uma peça essencial na democratização da sociedade, pela disseminação do conhecimento científico e de seus métodos de investigação e análise.

### 1.3.3. Breve panorama brasileiro

O Brasil, que teve extraordinário desenvolvimento econômico no século passado, experimentou, nos últimos 50 anos, um processo de industrialização acelerada e uma enorme expansão de suas universidades e centros de pesquisa. A instalação e a consolidação da pesquisa científica como um esforço nacional no País, ocorrida ao longo da última geração, está entre os mais bem sucedidos – e menos reconhecidos – exemplos de

**A instalação e a consolidação da pesquisa científica como um esforço nacional no País, ocorrida ao longo da última geração, está entre os mais bem sucedidos e menos reconhecidos exemplos de sucesso do Brasil**

sucesso de nosso país. Por exemplo, em 1981, o Brasil tinha uma participação de 0,44% das publicações mundiais em revistas científicas indexadas no ISI (sigla para Instituto para a Informação Científica). Dez anos depois, nossa contribuição passou para 1,44%. Hoje, o número total de doutores é estimado em 40 mil, sendo que 7 mil deles são formados a cada ano. A taxa de formação de doutores cresce 16% ao ano, e, já em 2007, o Brasil formará 10 mil deles. Para termos de comparação, os Estados Unidos formam 40 mil doutores por ano.

Contudo, esse enorme progresso interno se fez em um contexto internacional que se transformava de modo bastante acentuado, impondo ao País novos desafios. A imperiosa necessidade de melhora dos padrões de vida da população somada à crescente demanda pelo aumento da competitividade tecnológica e comercial de nossas empresas industriais e de modernização de seu setor de serviços requer urgente mudança nos patamares de integração entre o conhecimento científico e a inovação tecnológica no País. A isso, se junta a crescente percepção da importância do conhecimento científico e tecnológico autóctone para a preservação da defesa dos interesses nacionais.

No Brasil, apesar do grande progresso alcançado nos últimos 30 anos na formação de recursos humanos qualificados, o número acumulado de pesquisadores e a quantidade de cientistas e engenheiros por 100 mil habitantes nos colocam a uma distância ainda considerável dos países ditos desenvolvidos. Assim, um esforço considerável precisa ser ainda feito para ampliar a base científica e de conhecimento instalada. Ao mesmo tempo, o processo de recuperação do atraso histórico do Brasil no domínio de tecnologias-chave requer a priorização de certas áreas e setores, segundo uma agenda de nação. Esse processo de priorização requer a colaboração entre cientistas e formuladores de políticas para o País. Como a cadeia do conhecimento é complexa – e as relações entre desenvolvimento de produtos ou processos e a pesquisa básica são difíceis de planejar e antever –, a conciliação entre a essencial expansão da base e a definição de uma agenda científica nacional requer o equilíbrio de compatibilizar urgências e prioridades com necessidades sistêmicas de natureza mais permanente.

Em relação à educação em ciência, temos no Brasil um longo caminho pela frente, uma vez que é necessário mudar comportamentos culturais profundamente arraigados. O primeiro passo nessa direção é o fortalecimento efetivo da cultura científica nas escolas de primeiro e segundo graus, com prioridade para um equilíbrio entre teoria e experimento. Para isso, é preciso equipar os laboratórios com instrumentos modernos e treinar os professores para instigar seus alunos ao gosto pelo desafio intelectual e pelos métodos empíricos de investigação.

**Em relação à educação em ciência, temos no Brasil um longo caminho pela frente, uma vez que é necessário mudar comportamentos culturais profundamente arraigados**

## 2. DESAFIOS CIENTÍFICOS



### 2.1. PROCESSOS FUNDAMENTAIS DA NATUREZA

Dissecar a estrutura da matéria, investigar os componentes elementares que a compõem, estabelecer as leis que regem as relações entre os entes elementares têm sido uma parte essencial da estratégia dos cientistas na busca da compreensão da estrutura da natureza. O século 19 foi caracterizado pelo amadurecimento das noções da estrutura atômica da matéria, qualificando e quantificando as propriedades dos átomos. Na primeira metade do século passado, foi desvendada a estrutura do átomo, composto por um núcleo maciço cercado por uma nuvem de elétrons, ambos regidos pelas leis da mecânica quântica, teoria que lida com os fenômenos na escala atômica e molecular.

**O século 19 foi caracterizado pelo amadurecimento das noções da estrutura atômica da matéria, qualificando e quantificando as propriedades dos átomos; na primeira metade do século passado, foi desvendada a estrutura do átomo**

O núcleo atômico, por sua vez, é composto por prótons e nêutrons. Três forças, além da gravitacional, atuam sobre as partículas que compõem o átomo:

- i) a eletromagnética, que ocorre entre elétrons e prótons e entre os próprios prótons ou elétrons;
- ii) a força forte, que mantém coeso o núcleo atômico.
- iii) a fraca, que já havia sido identificada ainda na primeira metade do século passado.

Esta última força se manifesta nos processos ligados à radioatividade (emissão de partículas pelo núcleo atômico, o que faz o átomo emissor se transformar em outro elemento químico) e de fusão nuclear (processo responsável pela **geração de energia no interior das estrelas** e no qual núcleos atômicos se fundem para gerar um mais pesado).

Para explicar peculiaridades de processos nos quais a força fraca está envolvida, o físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) foi compelido a conjecturar uma nova partícula, o neutrino, sem nenhuma prova experimental para sua existência. Sua motivação foi manter a validade do princípio de conservação da energia em todos os processos físicos.

Na primeira metade do século, eram duas as ferramentas experimentais para explorar a estrutura dos átomos e seu núcleo:

i) colisões de partículas em aceleradores, equipamentos que na época cabiam num pequeno galpão;

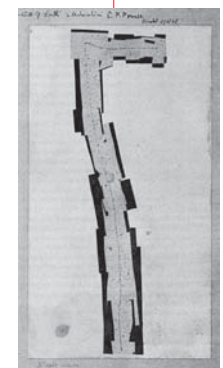
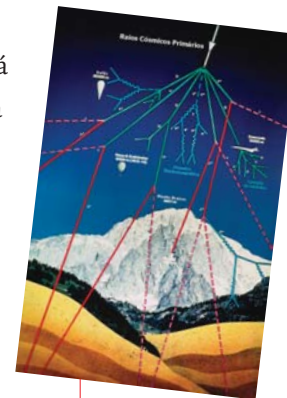
ii) **choque de raios cósmicos** contra núcleos atômicos da atmosfera terrestre – esses processos, que podem chegar a ser 100 milhões de vezes mais energéticos que os choques obtidos no mais moderno acelerador deste início de século, eram detectados com a ajuda de chapas fotográficas especiais, as chamadas emulsões nucleares.

Usando raios cósmicos, foram descobertos o pósitron (a antipartícula do elétron), os múons (elétrons pesados) e, logo após a Segunda Guerra Mundial, o pión (também denominado méson pi). Na descoberta desta última partícula, o físico brasileiro César Lattes teve um papel-chave, expondo **filmes sensíveis** aos raios cósmicos no monte Chacaltaya (Bolívia), a mais de 5 mil metros de altitude. Logo após a descoberta dos píons, em 1947, houve uma mudança bastante significativa nas ferramentas de investigação usadas pelos físicos, iniciando a época dos aceleradores.

Quanto mais detalhado se quiser o exame da matéria, maior a energia que se deverá empregar. Esse fato decorre de uma relação fundamental da mecânica quântica: partículas mais energéticas têm comprimento de onda menor e, por isso, são usadas para estudar suas estruturas com melhor precisão. Para analisar dimensões menores que as dos prótons e nêutrons as energias requeridas exigem aceleradores muito maiores que aqueles encontrados em um laboratório universitário. A era dos grandes aceleradores significou uma mudança no paradigma de cooperação entre os cientistas. A complexidade dessas máquinas e de seus periféricos levou à formação de grandes laboratórios nacionais,

**Choques de raios cósmicos contra núcleos atômicos da atmosfera terrestre chegam a ser 100 milhões de vezes mais energéticos que aqueles obtidos no mais moderno acelerador deste início de século**

**A era dos grandes aceleradores significou uma mudança no paradigma de cooperação entre os cientistas**



C. LATTES ET AL. / NATURE (1947)



como o Fermilab, Brookhaven e outros nos Estados Unidos; o DESY, na Alemanha; KEK no Japão. A Europa, por sua vez, optou pela construção de um laboratório multinacional, o CERN.

Ao longo da segunda metade do século passado, a estrutura dos prótons e nêutrons foi dissecada, e seus componentes mais elementares, os quarks e glúons, foram identificados – glúons são as partículas responsáveis pela força forte, que mantém quarks confinados dentro de prótons e nêutrons. Novas partículas, os taus – análogos ao elétron e ao múon – foram desco-

**A estratégia de colisões envolvendo altas energias é o único acesso experimental que temos à estrutura das partículas**

bertas, juntamente com seus respectivos neutrinos. As partículas responsáveis pela força fraca, o  $W^+$ , o  $W^-$  e o  $Z^0$ , cuja existência era prevista em modelos teóricos, foram detectadas em aceleradores construídos especialmente para identificá-

las. A estratégia de colisões envolvendo altas energias é o único acesso experimental que temos à estrutura das partículas. No entanto, as dificuldades experimentais levaram à formulação de instrumentos teóricos poderosos para investigar a estrutura das interações fundamentais da natureza.

A identificação das simetrias existentes nas interações entre as partículas fundamentais tem sido uma ferramenta eficiente nesse estudo. Há vários tipos de simetrias na natureza, e, para se ter uma idéia de como elas se manifestam, devemos primeiramente imaginar uma partícula se transformando em outra. Assim, três das principais simetrias são:

- i) a paridade (simetria P) – esta simetria tem a ver com a relação entre um fenômeno e sua imagem especular. Caso o fenômeno e sua imagem sejam descritos pelo mesmo tipo de lei física, dizemos que a paridade está sendo conservada; nem todos os fenômenos naturais preservam essa simetria, com é o caso, por exemplo, da força fraca;
- ii) a inversão temporal (T) – se pudéssemos filmar a transformação de

uma partícula em outra e, ao assistir ao filme de trás para diante, não notássemos diferença alguma no fenômeno, diríamos que a simetria temporal estaria mantida; um caso típico em que a inversão temporal é violada: um copo de vidro que cai no chão e se quebra – o filme, ao reverso, denunciaria que a ordem dos eventos foi invertida;

- iii) a conjugação de carga (C) – por fim, essa simetria está associada à transformação de uma partícula em sua

Laboratório KEK,  
no Japão





antipartícula – esta simetria seria perfeita se um mundo feito de antimatéria fosse idêntico ao nosso; no entanto, a força fraca não tem essa propriedade e viola a simetria da conjugação de carga.

Em muitas situações, avanços relevantes não resultaram da descoberta de uma simetria, mas da identificação de sua violação. É o caso da violação da paridade em processos dominados pela força fraca, como a emissão de partículas (prótons, nêutrons, elétrons ou neutrinos) pelo núcleo atômico, a chamada radioatividade. Essa violação foi proposta pelos físicos sino-americanos Tsung-Dao Lee e Chen Ning Yang e, logo depois, comprovada experimentalmente, o que rendeu a Yang e Lee o Nobel de física de 1957. Esse foi um passo importante na formulação de uma teoria consistente para a força fraca. A identificação de regularidades nos mésons (partículas formadas por um quark e um antiquark) e nos bárions (partículas formadas por três quarks, como prótons e nêutrons) levou o físico norte-americano Murray Gell-Mann, prêmio Nobel de física de 1969, a formular um modelo de quarks, posteriormente identificados experimentalmente.



Laboratório DESY,  
na Alemanha

### 2.1.1. Modelo padrão

No final do século passado, chegamos a uma teoria que descreve adequadamente as forças – ou, mais tecnicamente, as interações – fortes, eletromagnéticas e fracas: o chamado modelo padrão para as interações fundamentais da natureza. Geralmente denominado apenas modelo padrão – e que pode ser entendido como a teoria sobre as interações (forças) e a natureza da matéria –, ele tem dois setores:

- i) a cromodinâmica quântica – mais conhecida pela sigla inglesa QCD –, que descreve as interações fortes;
- ii) a teoria das interações eletrofracas, que unifica as interações eletromagnéticas e fracas.

O modelo padrão pode ser entendido como a teoria sobre as interações (forças) e a natureza da matéria

As previsões extraídas do modelo padrão foram extensivamente testadas em centenas de experimentos e, em particular, naqueles realizados na última década no LEP (sigla inglesa para Grande Colisor de Elétrons e Pósitrons), acelerador do CERN. Não há desvio conhecido das previsões do modelo,

pelo menos até a edição deste texto. Mas há um ingrediente-chave, do qual trataremos a seguir, faltando ser identificado experimentalmente. É o chamado bóson de Higgs.

As características das partículas que compõem o modelo padrão estão sumarizadas no quadro ao lado. A incorporação da interação gravitacional numa descrição quântica e unificada com as outras três interações é um desafio ainda em aberto. Segundo o modelo padrão, as partículas elementares são divididas em três tipos: quarks (seis tipos diferentes), léptons (três tipos mais seus respectivos neutrinos) e bósons vetoriais (partículas associadas às quatro interações fundamentais).

Partículas elementares modelo padrão

	LÉPTONS		QUARKS	
<b>partículas de massa</b> Toda a matéria comum está neste grupo	<b>Elétron</b> Responsável pela eletricidade e reações químicas. Carga -1 (o pósitron tem carga +1).	<b>Neutrino do elétron</b> Não tem carga elétrica. Massa possivelmente muito pequena	<b>Up</b> carga + 2/3 Prótons têm 2 e nêutrons 1	<b>Down</b> carga -1/3 Prótons têm 1 e nêutrons têm 2
<b>Partículas produzidas logo após o Big Bang.</b> Hoje, são encontradas em raios cósmicos ou fabricadas em aceleradores	<b>Múon</b> Mais pesado que o elétron. Vive cerca de 2 milionésimos de segundo. Carga +/- 1	<b>Neutrino do múon</b> Não tem carga elétrica. Criado juntamente com múons quando certas partículas decaem	<b>Charm</b> Carga +2/3. Descoberto em 1974. Mais pesado que o up	<b>Strange</b> Carga -1/3. Descoberto em 1963. Mais pesado que o down
	<b>Tau</b> Ainda mais pesado. Extremamente instável. Descoberto em 1975. Carga +/-1	<b>Neutrino do tau</b> Não tem carga elétrica. Descoberto em 2000	<b>Top</b> Carga +2/3. Descoberto em 1995. Ainda mais pesado	<b>Botton</b> Carga -1/3. Descoberto em 1977. Ainda mais pesado
<b>Partículas de forças</b> Estas partículas transmitem as quatro interações fundamentais (grávitons ainda não foram descobertos)	<b>Glúons</b> Portadores da força forte entre os quarks. Sentidos por quarks e glúons. A liberação explosiva de energia nuclear é resultado da força forte		<b>Fótons</b> Partículas de luz portadoras da força eletromagnética. Sentidos por partículas carregadas. Eletricidade, magnetismo e química são resultados da força eletromagnética	
			<b>Bósons vetoriais intermediários</b> $W^+$ $W^-$ $Z^0$ Portadores da força fraca. Sentidos por quarks e léptons. Algumas formas de radioatividade resultam da força fraca	
			<b>Grávitons</b> ? Portadores da força gravitacional. Sentidos por todas as partículas. O peso que experimentamos é resultado da força gravitacional	

Antimatéria: cada partícula tem sua antipartícula, com a mesma massa e carga elétrica oposta

## 2.1.2. Interações eletrofracas

A descrição matemática da interação eletromagnética entre partículas carregadas – ou seja, dos fenômenos eletromagnéticos – foi inicialmente feita pelas equações idealizadas pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879). A chamada eletrodinâmica clássica é, no entanto, uma teoria denominada clássica e, de certo modo, incapaz de descrever corretamente fenômenos na escala atômica. Sua extensão quântica, a eletrodinâmica quântica, foi criada com sucesso somente em meados do século passado por físicos como os norte-americanos Julian Schwinger (1918-1994) e Richard Feynman (1918-1988), bem como o japonês Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979), o que lhes valeu o Nobel de física de 1965. Foi principalmente com esses trabalhos que o tratamento quântico dos fenômenos eletromagnéticos ganhou consistência matemática.

A partir da década de 1920, na qual surgiu a mecânica quântica, passou-se, então, a tentar aplicá-la à descrição de fenômenos que, até então, eram descritos por teorias denominadas clássicas. Uma dessas

Com o surgimento da mecânica quântica, na década de 1920, passou-se a tentar aplicá-la à descrição de fenômenos que, até então, eram descritos por teorias denominadas clássicas

tentativas se deu com os fenômenos eletromagnéticos, descritos, até então, pela eletrodinâmica de Maxwell. No entanto, o tratamento quântico encontrou um obstáculo: as equações apresentavam como resultado divergências matemáticas – os chamados infinitos – que as inviabilizam como descrições dos fenômenos eletromagnéticos, a não ser como descrições de escopo limitado. Na verdade, o problema dos infinitos surge sempre que se tenta dar um tratamento quântico a teorias que usam a noção de campo para descrever fenômenos físicos – talvez, a noção mais intuitiva de campo seja a modificação que um ímã causa no espaço ao seu redor, o que é denominado campo magnético.

No entanto, essas inconsistências matemáticas podem ser retiradas através de um processo matemático denominado renormalização, quando as teorias são dotadas de certas propriedades – grosso modo, as equações que descrevem o campo não se alteram quando uma mesma operação é aplicada a todas as partículas no espaço. Esse é o caso da eletrodinâmica quântica. Mas o processo de remoção das divergências tem seu preço: exige que a

A interação eletromagnética e a fraca foram unificadas em uma única, a eletrofraca

descrição da teoria faça referência apenas às quantidades fisicamente mensuráveis, como a massa, a carga das partículas ou a seções

de choque de espalhamento. Algumas grandezas ainda permanecem infinitas, mas não aparecem nas predições feitas com a teoria e, portanto, não geram dano prático. Resolver essas inconsistências foi a contribuição de Feynman, Schwinger e Tomonaga.

A formulação consistente das interações fracas foi realizada em 1967 pelo físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996) e pelo norte-americano Steven Weinberg, de forma independente. Na verdade, a teoria de Weinberg-Salam unificou a descrição das interações eletromagnéticas com as fracas no que hoje é denominada teoria das interações eletrofracas. Essa formulação foi precedida pelo trabalho de centenas de físicos que, pouco a pouco, foram identificando as simetrias e suas violações subjacentes aos fenômenos envolvendo a interação. Um trabalho pioneiro nessa direção foi realizado pelo físico brasileiro José Leite Lopes, quando, em 1957, propôs que na interação fraca haveria um equivalente ao fóton, que, na época, ele chamou partícula X e, atualmente, é denominada  $Z^0$  – vale lembrar que a interação (ou força) fraca é intermediada por três partículas (ou bósons vetoriais):  $Z^0$ ,  $W^+$  e  $W^-$ . O Nobel de 1979 foi dado a Salam, Weinberg e ao norte-americano Sheldon Glashow pela unificação das interações fracas com as eletromagnéticas.

A demonstração da consistência matemática da teoria das interações eletrofracas, levada a cabo pelos holandeses Martinus Veltman e Gerardus 't Hooft, em 1971, foi instrumental na descrição das interações fortes pela mesma classe de teorias, a cromodinâmica quântica. O trabalho rendeu a eles o Nobel de física de 1999.

A noção mais importante que está subjacente ao modelo padrão é a de que certos elementos (as simetrias) que caracterizam a teoria em seu nível fundamental não estão refletidos necessariamente no mundo real. Uma conseqüência dessa disparidade entre teoria e realidade é o fato de o modelo

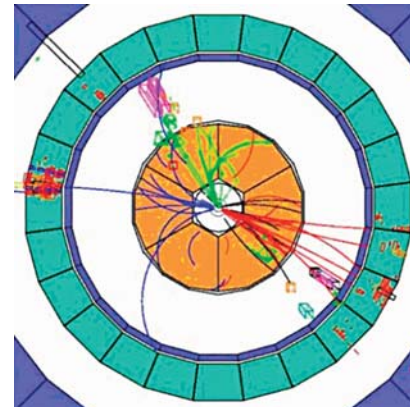
padrão ter como ponto de partida massa nula para todas as partículas responsáveis pelas interações. No entanto, somente o fóton tem massa nula; o  $W^+$  e  $W^-$ , bem como o  $Z^0$ , têm massas quase cem vezes maiores que a do

A massa do  $Z^0$  foi medida com uma precisão equivalente a 10 metros na medida da distância (429 km) entre as cidades do Rio de Janeiro e São Paulo

próton – o gráviton, bóson responsável pela interação gravitacional, que não está incluída no modelo padrão, também teria massa nula, mas até agora essa partícula não foi detectada.

Assim, a origem da massa das partículas fundamentais surgiria da interação complexa entre elas e o campo gerado pelo bóson de Higgs – o nome é uma homenagem ao físico britânico Peter Higgs, que previu sua existência em meados da década de 1960. Porém, o bóson de Higgs ainda não foi detectado. Limites impostos pelos resultados experimentais asseguram que sua massa será, pelo menos, 120 vezes maior que a do próton.

Na década de 1990, os parâmetros do modelo padrão foram determinados em experimentos de grande precisão realizados no acelerador LEP (sigla inglesa para Grande Colisor de Elétrons e Pósitrons), no CERN.



Evento elétron + pósitron  $\rightarrow$   $W^+ W^-$  no Delphi

### 2.1.3. Cromodinâmica quântica

A QCD (sigla inglesa para cromodinâmica quântica) é uma parte integral do modelo padrão. O nome cromodinâmica vem do fato de as partículas que interagem através da força forte terem uma propriedade, denominada cor, que pode ser dita um análogo da carga elétrica. É universalmente aceita como a teoria fundamental das interações fortes. A estrutura dessa teoria guarda relação com a eletrodinâmica quântica (QED). As interações eletromagnéticas não diferenciam partículas que tenham a mesma carga elétrica. Assim, um elétron e um antipróton – ambos negativos – pareceriam ser a mesma partícula do ponto de vista de um fóton, não fosse a diferença de massas entre as duas partículas. O fóton só distinguirá a estrutura de um próton se tiver uma energia muito grande – ou seja, comprimento de onda curto.

De modo semelhante, do ponto de vista dos glúons – cujo papel é análogo ao que o fóton desempenha na QED –, os quarks são essencialmente idênticos, tenham o sabor que tiverem – os quarks se apresentam com seis sabores (ou tipos): *up*, *down*, *strange*, *charm*, *top* e *bottom*. Como dissemos,

**A interação forte pode ser descrita por uma teoria dinâmica da cor, a cromodinâmica quântica**

na natureza, qualquer carga elétrica pode ser formada a partir de dois elementos básicos. Em contraste, a cor forma uma tríade, o que faz com que cada sabor de quark venha em três formas (cores) diferentes.

Essa sutil diferença – ou seja, a mudança de duas para três possibilidades – tem conseqüências profundas. A mais relevante é que o glúon, a partícula intermediária da força forte, também tem cor e, por isso, a força entre os quarks aumenta com a distância de separação – vale lembrar que, na QED, a força diminui com o quadrado da distância. Como a força não pode aumentar indefinidamente, ao se separarem dois quarks, a energia contida na ligação entre eles se transforma em pares de quarks-antiquarks, ou seja, em mésons. Na colisão entre prótons e antiprótons em aceleradores, vários quarks são criados e se materializam na forma de dezenas de variedades de mésons, a maioria píons. Assim, torna-se impossível isolar quarks ou glúons, pois eles são confinados em mésons ou bárions.

Os quarks e os glúons estão confinados em regimes de baixas energias e livres em processos de altas energias

Em contraste, os experimentos que levaram à identificação dos quarks como entidades reais – realizados com o espalhamento de elétrons e, posteriormente, neutrinos, com energias muito altas por núcleo – mostraram também que os quarks se portam como se fossem livres, quando examinados por feixes de partículas com comprimentos de onda muito curtos.

O experimento que demonstrou a realidade dos quarks foi liderado pelos norte-americanos Jerome Friedman e Henry Kendall (1926-1999), bem como pelo canadense Richard Taylor, que receberam o Nobel de 1990 pela descoberta. A prova teórica de que a QCD tem a propriedade da liberdade assintótica – ou seja, de que os quarks são livres quando examinados de perto – deu esse prêmio em 2004 a três norte-americanos, David Gross, Frank Wilczek e David Politzer.

Portanto, a QCD tem esses comportamentos complementares: confina os quarks e glúons em regimes de baixas energias e permite que eles sejam livres em processos de altas energias.

Dentro dos prótons e nêutrons, os quarks são entidades extremamente leves. Porém, os prótons e nêutrons são centenas de vezes mais pesados. Esse aparente paradoxo é resolvido com o conceito de geração espontânea de massa, que prevê a existência de um estado ligado quark-antiquark que é muito mais leve que o próton ou o nêutron. Essa partícula, o pión (ou méson



pi), foi observada primeiramente em 1947 – como já mencionado – nos choques de raios cósmicos contra núcleos da atmosfera terrestre, e um ano mais tarde no acelerador de partículas da Universidade da Califórnia, em Berkeley (Estados Unidos). Essas duas detecções do pión – batizadas, respectivamente, natural e artificial – tiveram participação determinante do físico brasileiro César Lattes. A troca de píons entre os prótons e nêutrons é uma parte importante do mecanismo pelo qual a interação forte mantém o núcleo atômico coeso.

Dada a complexidade dos fenômenos hadrônicos – partículas que interagem através da força forte –, a QCD não pode ser estudada com base na aplicação de técnicas tradicionais analíticas. O fenômeno do confinamento – que impede observar quarks isolados – é um obstáculo à análise das interações fortes em baixas energias. Para solucionar esse problema, usa-se um artifício matemático denominado QCD na rede. O nome – na rede – vem do fato de que, nessa técnica, o espaço-tempo – uma entidade contínua – é transformado em uma rede quadridimensional de pontos ou, no vocabulário técnico, é discretizado. Com isso, os fenômenos da QCD se tornam passíveis de serem simulados em computador. Com a QCD na rede é possível extrair previsões confiáveis mesmo quando o acoplamento entre os quarks é forte.

Um dos maiores objetivos da QCD na rede é calcular as massas e outras propriedades básicas das partículas que interagem fortemente, tanto para testar os limites de validade da própria QCD quanto para calcular quantidades físicas adicionais que não estão bem determinadas experimentalmente. Além disso, a QCD na rede fornece uma maneira de efetuar cálculos dos efeitos de interações fortes sobre processos de interação fraca e, portanto, vem com a promessa de fornecer testes cruciais do modelo padrão nos seus pontos mais vulneráveis.



Vista aérea do anel de colisões do Tevatron

Com um artifício matemático denominado QCD na rede é possível simular em computador os fenômenos da cromodinâmica quântica

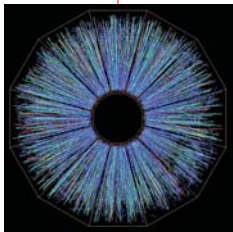
Estudos de QCD na rede sugerem que, logo após o Big Bang, nosso universo era composto de uma sopa de quarks e glúons não confinados; no entanto, as evidências sobre a obtenção desse fenômeno em laboratório ainda são ambíguas

Estudos de QCD na rede sugerem que, logo após o Big Bang, nosso universo era composto de uma sopa de quarks e glúons não confinados, o chamado plasma de quarks e glúons. Esse estado inicial da matéria pode ser recri-

ado em colisões de íons pesados relativísticos, em aceleradores como o RHIC (sigla para Colisor de Íons Relativísticos Pesados), em Brookhaven (Estados Unidos). Um dos grandes desafios atuais dos físicos nucleares é a identificação de sinais da formação desse tipo de plasma. Como os resultados experimentais dessas colisões estão na forma de hádrons, a dificuldade maior está em distinguir se essas partículas vieram de processos hadrônicos normais ou se tiveram origem numa fase não confinada da matéria. Sobre a obtenção do plasma de quarks e glúons, as evidências ainda são ambíguas.

Cálculos definitivos em QCD na rede requerem um poder computacional muito maior que aquele disponível até o momento. Contudo, o progresso nesse campo na última década foi resultado de importantes melhoramentos nos algoritmos e nas técnicas computacionais, bem como no rápido aumento da capacidade computacional disponibilizada. As questões que estão sendo tratadas pelos teóricos de QCD na rede referem-se à transição entre o estado ordinário da matéria a baixas temperaturas e o estado do plasma de quarks e glúons a altas temperaturas. As perguntas básicas a serem respondidas envolvem a determinação da temperatura em que essa transição ocorre e as propriedades físicas do plasma. Por exemplo, entre os maiores sucessos alcançados pela QCD na rede encontram-se:

- i) demonstração de que quarks e glúons estão confinados a baixas temperaturas;
- ii) cálculos mais precisos de espectros de massas, acelerados enormemente na última década;
- iii) estimativa da temperatura de transição entre o estado ordinário da matéria e o plasma de quarks e glúons;
- iv) cálculos dos parâmetros de decaimentos fracos, incluindo uma determinação do parâmetro de mistura;
- v) determinação da constante de acoplamento forte na escala de energia de 5 GeV a partir de um estudo de partículas formadas pelo quark *charm* e sua antipartícula.



RHIC/BNL



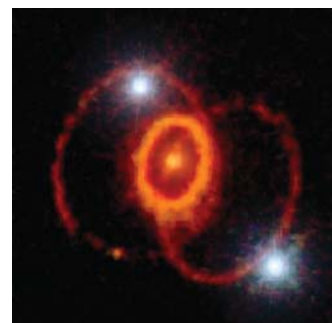
## 2.1.4. Neutrinos

Em menos de um século, o neutrino passou de uma partícula fantasma – proposta em 1930 pelo físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958) para explicar o balanço de energia em uma forma de radioatividade, o chamado decaimento beta – numa sonda capaz de perscrutar o interior de estrelas e da própria Terra. Devido ao fato de interagir muito raramente com a matéria, neutrinos levaram 26 anos para serem observados experimentalmente. Para isso, foi preciso esperar pelo advento de reatores nucleares e aceleradores de partículas capazes de produzir fluxos muito elevados dessa partícula. Expostos a detectores de grande massa, os neutrinos puderam ser finalmente observados. Sabemos hoje que existem três sabores (tipos) de neutrinos: o neutrino do elétron, cuja descoberta, em 1956, deu o Nobel de 1995 ao norte-americano Frederick Reines (1918-1998); o neutrino do múon, descoberto em 1962 e que valeu o prêmio de 1988 aos norte-americanos Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger; e o neutrino do tau, cuja existência foi aferida pela descoberta do tau (um lépton), em 1975, e detectado apenas em 2000, no Fermilab, pelo grupo Donut.

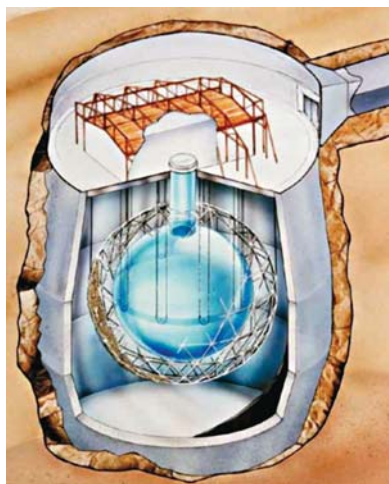
Com o desenvolvimento das técnicas de detecção, fomos capazes de medir neutrinos produzidos por fontes naturais, ou seja, neutrinos produzidos pelas reações termonucleares no interior do Sol e neutrinos gerados pelo choque de raios cósmicos contra núcleos atômicos atmosféricos. Em 1987, quase que acidentalmente, os detectores dos experimentos IMB (Estados Unidos) e Kamiokande (Japão) observaram uma dezena de neutrinos correlacionados com a explosão da supernova SN1987A.

Experimentos que se iniciaram na década de 1980 e que continuam até hoje têm demonstrado que o número de neutrinos do múon produzidos na atmosfera terrestre que chegam aos detectores não é consistente com o que esperaríamos teoricamente: eles parecem estar desaparecendo. Em 1998, o experimento SuperKamiokande, também no Japão, mostrou, pela primeira vez, que esse desaparecimento tem uma dependência com a distância percorrida pelo neutrino. Os diversos experimentos com neutrinos solares, desde o pioneiro Homestake (Estados Unidos), em 1968, vêm observando um déficit no número de neutrinos provenientes do Sol. A detecção de neutrinos cósmicos deu o Nobel de 2002 ao nor-

SN1987A:  
primeira explosão de  
supernova observada  
em neutrinos



NASA



te-americano Raymond Davis Jr. e ao japonês Masatoshi Koshihba.

Em 2001 e 2002, o experimento Sudbury Neutrino Observatory (Canadá) mostrou que o déficit de neutrinos solares diz respeito a neutrinos do elétron que, de alguma forma, parecem estar mudando de sabor em seu caminho do interior do Sol até nós. Em 2003, o experimento KamLAND (Japão) observou, pela primeira vez, o desaparecimento de antineutrinos do elétron produzidos por reatores nucleares. Todos esses resultados são compatíveis com a hipótese de oscilação quântica de sabor de neutrinos, ou seja, os neutrinos que têm massa bem de-

finida devem ser combinações daqueles que interagem com a matéria e vice-versa. Para que esse fenômeno ocorra, neutrinos precisam ter massa não nula. Cálculos indicam que a soma da massa dos neutrinos não pode ser inferior a um décimo de milionésimo da massa do elétron ( $9,11 \times 10^{-31}$  kg).

O neutrino também poderá ter um papel importante na compreensão do mecanismo de geração de massa. Como essas partículas são férmions sem

**O neutrino poderá ter um papel importante na compreensão do mecanismo de geração de massa das partículas**

carga elétrica – que, segundo as evidências experimentais, devem ter massa muito pequena – , não sabemos se neutrinos e antineutrinos são partículas idênticas ou distintas. O mecanismo de geração de massa dessas partículas pode ser

o mesmo de outras partículas – ou seja, uma interação complexa com o bóson de Higgs – ou pode ser de natureza completamente diferente e estar relacionado, por exemplo, com a escala de energia de unificação das forças.

### 2.1.5. Simetrias fundamentais e núcleos atômicos

Devido à grande complexidade da QCD, não é possível estabelecer uma ligação entre a teoria fundamental e a interação nuclear forte. O estabelecimento dessa conexão é um dos grandes problemas em aberto da física. A complexidade do problema nuclear de muitos corpos forçou os físicos a desenvolverem técnicas para tratar sistemas quânticos de muitos corpos fortemente correlacionados. O estudo da estrutura nuclear lida com ques-

tões fundamentais que permeiam a ciência moderna, como ‘como os sistemas complexos surgem de ingredientes simples?’ e ‘como aparecem as simplicidades e regularidades em sistemas complexos?’.

O objetivo da teoria da estrutura nuclear é construir um modelo microscópico unificado no qual as propriedades nucleares do caroço – incluindo massas, raios e momentos –, as excitações nucleares – incluindo os fenômenos coletivos – e as reações nucleares possam ser todas tratadas. Uma teoria microscópica também fornece uma fundação sólida para modelos fenomenológicos e esquemas de acoplamento, que têm sido aplicados com sucesso na explicação de propriedades nucleares específicas.

Os núcleos exóticos de vida curta – ou seja, que estão fora da região onde se encontram os núcleos estáveis – se destacam na busca de uma teoria da estrutura nuclear. Nesses núcleos, o enorme isospin – uma propriedade que permite distinguir prótons e nêutrons quando eles estão interagindo somente através da força forte – e a ligação extremamente fraca entre seus constituintes são um desafio para o entendimento de importantes aspectos do problema nuclear de muitos corpos. Esses núcleos são o novo ingrediente na construção de uma fundação teórica unificada para entender os núcleos em todas as suas manifestações, desde núcleos estáveis que existem em torno de nós aos núcleos mais exóticos, incluindo, até mesmo, formas exóticas de matéria nuclear que podem existir, por exemplo, em estrelas de nêutrons. Os estudos com esses núcleos já permitem observar alterações drásticas no comportamento das camadas nucleares, além de efeitos de estrutura como uma capacidade maior que a esperada de atingir estados de momento angular elevados.

Outro objetivo importante da área é a ligação entre o que se conhece sobre a estrutura nuclear e os mecanismos de reações nucleares. No caso dos núcleos leves, os métodos conhecidos estão próximos de permitir cálculos diretos de processos de espalhamento a baixas energias – incluindo aqueles que são relevantes para a astrofísica nuclear – e testes das simetrias fundamentais. Na estrutura nuclear para núcleos pesados, o modelo de

O estudo da estrutura nuclear lida com questões fundamentais que permeiam a ciência moderna, como ‘como os sistemas complexos surgem de ingredientes simples?’ e ‘como aparecem as simplicidades e regularidades em sistemas complexos’

Núcleos exóticos de vida curta podem ajudar a entender até mesmo formas exóticas de matéria nuclear que podem existir em estrelas de nêutrons

camadas no contínuo e as teorias de campo médio modernas permitem um tratamento consistente de canais abertos, ligando dessa forma os estados nucleares ligados e os não ligados com as reações diretas. Do lado da reação, um tratamento mais adequado dos aspectos da estrutura nuclear é igualmente necessário. Novamente, se mostram importantes os núcleos fracamente ligados, para os quais os aspectos de estrutura e reação estão

**O entendimento microscópico da dinâmica coletiva nuclear é um objetivo de longo prazo**

entrelaçados e nos quais a interpretação de novos dados experimentais levarão a avanços no entendimento dos mecanismos de reação.

O entendimento microscópico da dinâmica coletiva nuclear é um objetivo de longo prazo. Movimentos coletivos de grandes amplitudes – como os existentes na fissão e fusão, só para citar dois entre muitos fenômenos nucleares em que essa propriedade se manifesta – fornecem um desafio particularmente importante. Alguns desses fenômenos são manifestações do tunelamento quântico de muitos corpos, um mecanismo intrigante que aparece numa multiplicidade de contextos físicos. O tunelamento quântico pode ser entendido como a capacidade de uma partícula atravessar uma barreira (de potencial) sem ter a energia suficiente para isso. Daí, o nome do efeito, pois é como se, segundo as leis da física clássica, a partícula conseguisse abrir um túnel através de um obstáculo – caso usemos esta última para representar a barreira de potencial.

**Os físicos nucleares tiveram recentemente um papel importante no avanço do entendimento das armadilhas em gases atômicos frios**

As teorias nucleares têm sido aplicadas com sucesso em outras áreas. Exemplos: no estudo de gases atômicos frios, da condutância em sistemas mesoscópicos (um estado intermediário entre o macro e o micro), bem como nos testes da QCD a baixas energias em sistemas atômicos. Os físicos nucleares tiveram recentemente um papel importante no avanço do entendimento das armadilhas em gases atômicos frios. As teorias resultantes expandiram nosso conhecimento sobre a dinâmica de formação de condensados e o estado fundamental de gases rarefeitos de bósons e férmions.

Mesmo nos casos em que as interações fundamentais são simples, comportamentos complexos podem surgir em sistemas quânticos. Técnicas empregadas para entender o chamado espalhamento – ou seja, o choque de partículas contra obstáculos, como ocorre, por exemplo, em aceleradores – têm sido úteis

para entender como a matéria na escala mesoscópica (entre o micro e o macroscópico) conduz eletricidade. Um exemplo dessas estruturas são os pontos quânticos, fragmentos de matéria em que a inclusão ou retirada de um simples elétron pode alterar significativamente suas propriedades físicas.

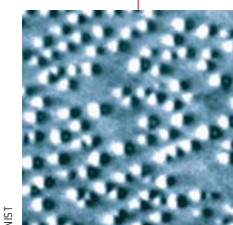
Outra ferramenta da física nuclear empregada para entender comportamentos quânticos complexos é a teoria da matriz randômica, originalmente desenvolvida para descrever densidades de níveis nucleares. Recentemente, essa teoria ajudou a entender as propriedades dos pontos quânticos, levando a um melhor entendimento sobre o comportamento da matéria na escala mesoscópica. O mesmo acontece com o caos quântico, importante para tratar a quebra da simetria tanto do isospin quanto da paridade. Essa mesma área também forneceu um método poderoso para estudar a transição entre estados caóticos e ordenados no núcleo, bem com a transição de metais desordenados para isolantes na matéria.

Avanços na teoria de muitos corpos – por exemplo, o método do tempo imaginário, o método das coordenadas geradoras, técnicas de projeção de operador –, bem como algoritmos numéricos mais poderosos, além do aumento significativo nos recursos computacionais, prometem um progresso nesse campo da dinâmica nuclear, no qual um dos desafios para o avanço científico é a obtenção de dados de alta resolução. Há vários exemplos de áreas em que esses dados existem: espectroscopia de elementos superpesados, novos tipos de deformações nucleares associados a correntes e spins nucleares, bem como acoplamentos entre estados nucleares coexistentes.

Essas ferramentas teóricas permitirão achar respostas satisfatórias para vários problemas, como, por exemplo, a descrição microscópica da fissão espontânea – um tipo de decaimento nuclear que ocorre em núcleos com muitos constituintes. Isso, juntamente com a identificação de novas simetrias estruturais e esquemas de acoplamento, trarão esclarecimentos sobre simplicidades e regularidades surpreendentes que os núcleos complexos exibem.

O uso de elétrons e fótons como sondas no estudo das propriedades do núcleo atômico apresenta vantagens fundamentais:

- i) o processo de excitação, que é devido à bem conhecida interação eletromagnética dos elétrons ou fótons com propriedades



**As ferramentas da física nuclear  
deverão esclarecer simplicidades  
e regularidades surpreendentes  
que os núcleos complexos exibem**

eletromagnéticas do núcleo (densidades de carga, de corrente e de magnetização);

- ii) o fato de a interação eletromagnética ser suficientemente fraca para que o processo seja estudado através de uma técnica – denominada teoria da perturbação.

Apesar de trabalhar com aproximações, esse técnica permite que informações significativamente precisas e detalhadas – muitas vezes, independentemente de modelos – possam ser obtidas sobre a estrutura nuclear através do processo de fotoexcitação, seja com fótons reais ou virtuais.

A parte experimental em física fotonuclear através do emprego das chamadas reações exclusivas tem conseguido determinar parâmetros relevantes com a identidade, a energia cinética e o ângulo de emissão das partículas emitidas, sendo que a determinação dessas características é muito importante não só por permitir o aprimoramento dos modelos teóricos para esses processos, mas também por fornecer informações essenciais para o funcionamento adequado de programas de transporte, utilizados nos cálculos de dose e proteção radiológica.

Núcleos ricos em nêutrons têm sido objeto de grande interesse para a física nuclear. Isso se dá em função basicamente de duas razões:

**Núcleos ricos em nêutrons têm sido objeto de grande interesse para a física nuclear**

- i) a importância deles para se entender como se formam os próprios núcleos – a chamada nucleossíntese – e, assim, um teste para modelos nucleares;

- ii) a crescente utilização de feixes de núcleos instáveis (exóticos) como uma técnica experimental que permite a investigação de novos aspectos da estrutura do próprio núcleo quanto a aspectos relacionados aos fenômenos que ocorrem no interior das estrelas.

Nos núcleos, à medida que aumenta o excesso de nêutrons, as energias de ligação entre essas partículas diminuem, enquanto os prótons ficam cada vez mais ligados. A baixa energia de ligação dos nêutrons mais externos permite que eles sejam distribuídos numa extensão espacial muito além daquela dos prótons, o que contribui para a formação da ‘pele’ (ou halo) nuclear.

Um grande impacto advém do advento de aceleradores capazes de produzir feixes de núcleos exóticos emissores de elétrons energéticos – por isso, denominados núcleos exóticos beta radioativos. A maioria dos estudos ex-



perimentais envolvendo núcleos instáveis tem sido feita utilizando esses feixes com energias intermediárias – de 30 a 100 MeV por constituinte nuclear – em função do mecanismo de produção de feixes exóticos através do processo de fragmentação do núcleo-projétil.

Com a instalação do sistema de duplo solenóide supercondutor Ribras (sigla inglesa para Feixes de Íons Radioativos no Brasil), o Pelletron-Linac, instalado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, tornou-se o primeiro laboratório experimental do hemisfério Sul a dispor de feixes radioativos em condições favoráveis para estudar problemas relacionados à astrofísica nuclear, ao ‘halo’ nuclear, à fusão de núcleos, entre outros.



FOTO EDUARDO CESARI/FAPESP

Sistema Ribras: os solenóides supercondutores estão no interior dos criostatos cilíndricos

### 2.1.6. Supersimetria

Teorias supersimétricas – baseadas em simetrias relacionando bósons (fótons, glúons etc.) e férmions (quarks, elétrons, neutrinos etc.) – prevêm uma miríade de novas partículas fundamentais. Segundo essas teorias, cada partícula elementar conhecida ou prevista pelo modelo padrão teria uma parceira supersimétrica. Por enquanto, a mais popular entre essas teorias é a de supercordas, em que as partículas elementares são tratadas, como o nome diz, como diminutas cordas, sendo que cada modo de vibração dessas entidades – que teriam comprimento de ordem de  $10^{-33}$  cm – representaria uma partícula elementar, assim como cada modo de vibração da corda de um violino, por exemplo, gera uma nota musical.

Mais ainda, teorias de cordas prevêm a existência de mais do que as três dimensões espaciais (comprimento, largura e altura) a que estamos acostumados. Acredita-se que essas dimensões extras poderão ser observadas colidindo partículas com energia suficientemente alta. Aceleradores de

**Teorias supersimétricas implicam uma miríade de novas partículas fundamentais e podem ser a resposta para a matéria escura**



partículas, como o LHC (sigla inglesa para Grande Colisor de Hádrons), no CERN, poderão permitir a descoberta dessas novas dimensões, possibilitando a medida de seu tamanho e abrindo, desse modo, uma nova fronteira para a física.

Um dos candidatos mais promissores para explicar a matéria escura – que, supõe-se, constitui parte significativa do universo e não interage eletromagneticamente com a matéria comum – é a partícula supersimétrica mais leve, um remanescente do universo primordial. Caso isso seja verdade, espera-se que sejamos capazes de produzi-la já nos próximos anos, quando os aceleradores ultrapassarem a escala de energia dos trilhões ( $10^{12}$ ) de elétrons-volt (TeV), cerca de mil vezes a energia equivalente à massa de um próton em repouso.

Para poder separar claramente a física das interações fortes e a das interações eletrofracas de efeitos que poderiam surgir da física além do

modelo padrão, precisamos de métodos que permitam fazer previsões precisas para processos envolvendo hádrons (partículas formadas por quarks) e que usem as interações elementares fundamentais. Méto-

Por que existe no universo visível a assimetria entre matéria e antimatéria?; qual o mecanismo que produz a violação da paridade e da conjugação de cargas nas transformações entre partículas?

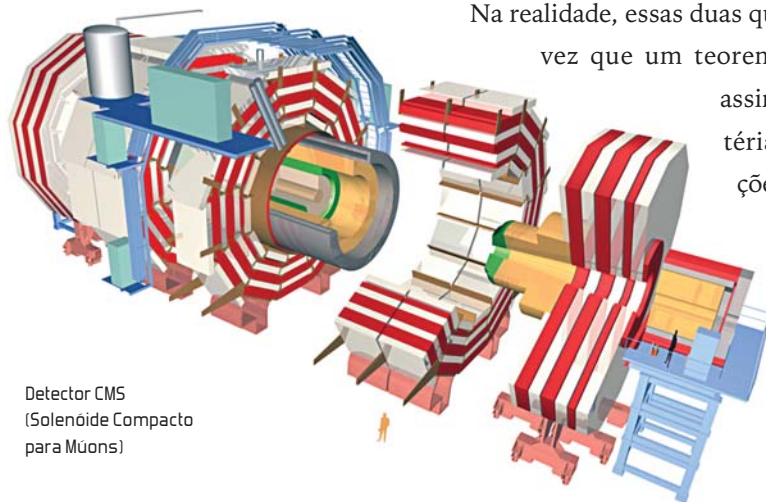
dos baseados em simetrias oferecem alguns dos meios mais poderosos pelos quais isso pode ser executado. Outros enigmas da física contemporânea: Por que existe no universo visível essa assimetria entre matéria e antimatéria? Qual o mecanismo que produz a violação da paridade e da conjugação de cargas nas transformações entre partículas?

Na realidade, essas duas questões estão relacionadas, uma

vez que um teorema fundamental mostra que a

assimetria entre matéria e antimatéria só pode aparecer em condições fora do equilíbrio. Em meados da década de 1960, o físico

russo Andrei Sakharov (1921-1989) propôs, com base em cálculos teóricos, três condições para explicar por que, no Big Bang, houve



Detector CMS  
(Solenóide Compacto  
para Múons)

uma ligeira preferência pela matéria em detrimento da antimatéria. São elas:

- i) o universo passou por uma fase de expansão extremamente rápida;
- ii) matéria e antimatéria devem ter tido uma evolução temporal ligeiramente diferente, o que pode ser entendido como uma necessidade de haver uma violação da simetria conjunta paridade e conjugação de carga;
- iii) o próton deve sofrer decaimento – apesar de isso nunca ter sido observado experimentalmente; o tempo envolvido nesse processo de transformação – o limite experimental inferior é  $10^{32}$  anos – é muito superior à idade do próprio universo;

Portanto, estudos sobre a diferença de comportamento de matéria e antimatéria em experimentos em aceleradores, bem como estudos de violação da simetria CP em decaimentos hadrônicos, deverão ajudar na busca de respostas para essas questões ou, pelo menos, de comprovações experimentais para parte delas.

### 2.1.7. Detecção, massa e oscilação dos neutrinos

Neutrinos poderão nos ensinar muito sobre o universo. Apesar de termos evidências de que essas partículas sem carga elétrica se transformem de um tipo em outro – tecnicamente, diz-se que elas sofrem oscilação de sabor –, não conhecemos precisamente os valores dos parâmetros envolvidos nessa oscilação, que é determinada por três ângulos – os chamados ângulos de mistura – e duas diferenças de massas, já que os neutrinos se apresentam em três tipos: neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau.

Num futuro breve, os experimentos com neutrinos solares e os produzidos por fontes distantes deverão permitir a determinação de uma das diferenças de massas e de um dos ângulos de mistura com precisão de algumas unidades por

cento. Vários experimentos vêm sendo propostos com base no uso de reatores nucleares ou aceleradores, com o objetivo de determinar o único ângulo de mistura sobre o qual muito pouco se sabe, relacionado à transformação do neutrino do elétron em neutrino do múon ou do tau. Alguns

Apesar de termos evidências de que os neutrinos se transformam de um tipo em outro, não conhecemos precisamente os valores dos parâmetros envolvidos nessa oscilação

desses experimentos poderão ser sensíveis a testes de violação da simetria CP no setor de neutrinos e, assim, poderão ajudar a esclarecer a diferença entre matéria e antimatéria no universo.

Experimentos de oscilação não são sensíveis diretamente ao valor das massas dos neutrinos, mas só às diferenças dos quadrados das massas. Assim, esses experimentos não permitem determinar a escala absoluta das massas. Essa escala será explorada por experimentos de alta precisão que usam decaimentos beta (emissão de elétrons energéticos pelos núcleos). Além disto, diversos experimentos para tentar medir o decaimento beta duplo sem neutrinos estão sendo propostos para o futuro. Esse processo só pode ocorrer se o neutrino e o antineutrino forem a mesma partícula. Esse tipo de experimento é também sensível à escala absoluta das massas dos neutrinos.

Não sabemos ainda quantos neutrinos existem; temos apenas certeza de que são pelo menos três, mas haveria mais?; talvez, pois não há nada que proíba a existência de outros neutrinos na natureza

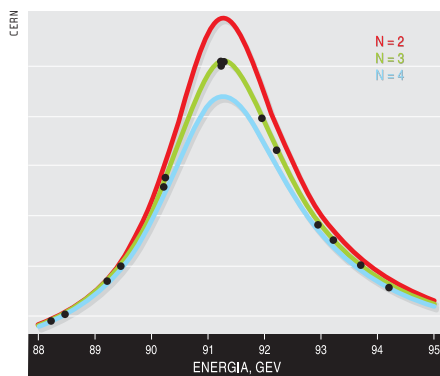
Esse tipo de experimento é também sensível à escala absoluta das massas dos neutrinos.

Não sabemos ainda quantos neutrinos existem. Temos apenas certeza de que são pelo menos três. Mas haveria mais? Talvez.

De fato, não há nada que proíba a existência de outros neutrinos de massa bem definida que de interação. Como neutrinos são tremendamente abundantes na natureza, isso pode ter consequências importantes em cosmologia, pois parte da massa do universo pode ser constituída de neutrinos.

Espera-se que se consiga medir em breve – e pela primeira vez – geoneutrinos (neutrinos produzidos pela radiação natural da Terra). Sabemos muito pouco sobre a história térmica da Terra, sobre a quantidade de urânio e tório no

interior de nosso planeta. A medida de geoneutrinos nos possibilitará investigar não só o conteúdo radioativo das camadas mais superficiais, mas também das camadas terrestres internas. Os experimentos deverão também em breve ter sensibilidade para medir neutrinos gerados por explosões de estrelas gigantes que chegam ao final da vida – fenômeno denominado supernova.



Com os dados coletados pelo Delphi foi possível confirmar, com grande precisão, que são três os tipos de neutrinos existentes na natureza, conforme previsão teórica do modelo padrão

Experimentos realizados no gelo abaixo do Pólo Sul, como o Amanda (sigla inglesa para Detector Antártico de Neutrinos e Múons), que já está em funcionamento, e seu sucessor, o Ice-Cube, com volume  $1 \text{ km}^3$ , irão estudar neutrinos altamente energéticos produzidos por fontes astrofísicas, como supernovas e explosões que geram raios gama, por exemplo. Pode-se dizer que esses detectores agem como telescópios de neutrinos, utilizando os neutrinos como um tipo de sonda cósmica, já que essas partículas não têm carga elétrica e interagem muito fracamente com a matéria, o que permite apontar diretamente para a fonte que as produziu.

Finalmente, observar neutrinos da radiação cósmica de fundo é um dos grandes desafios experimentais que temos pela frente.



AMANDA COLLABORATION

### 2.1.8. Física a altas energias e densidades

O comportamento da matéria nuclear em situações extremas de temperatura e densidade de energia pode ser estudado em colisões de íons de núcleos pesados a altas energias. Essas altas densidades são alcançadas quando se consegue confinar massas de um a três prótons em volumes equivalentes ao de um cubo com arestas de um milionésimo de bilionésimo de metro ( $1$  a  $3 \text{ GeV/fm}^3$ ). Isso abre uma janela para reproduzir as condições da matéria cerca de 20 milésimos de segundo após o Big Bang. Acredita-se que densidades da mesma ordem de grandeza estejam presentes no centro de corpos celestes como as estrelas de nêutrons.

A teoria da cromodinâmica quântica (QCD) prevê que, em condições termodinâmicas extremas, as forças que mantêm os hádrons confinados podem ser sobrepujadas, resultando em uma transição de fase do estado da matéria hadrônica para um novo estado conhecido

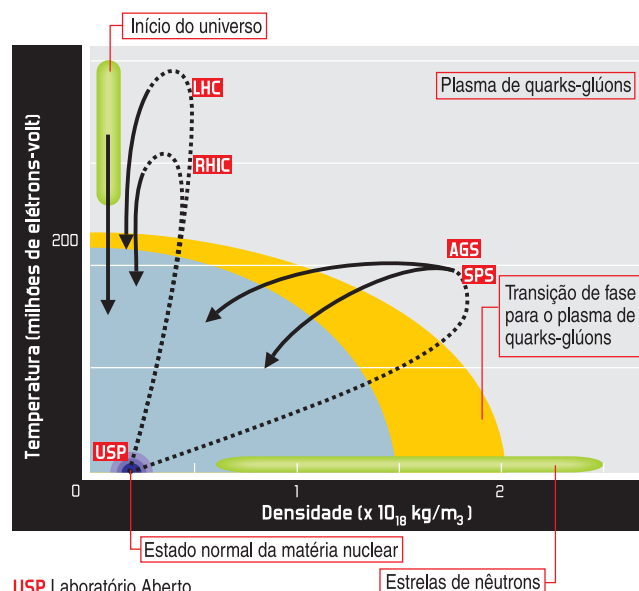
como o plasma de quarks e glúons. Cálculos de QCD prevêem que, em temperaturas acima de  $2,3 \times 10^{12} \text{ K}$  – ou o equivalente a  $200 \text{ MeV}$  –, o vácuo quântico se torna um meio condutor de cor, a propriedade dos quarks e glúons equivalente à carga elétrica. Isso permitiria a livre propagação des-

A obtenção de altas densidades em laboratório abre uma janela para reproduzir as condições da matéria cerca de 20 milésimos de segundo após o Big Bang

sas partículas. Nessa transição, associada ao desconfinamento da matéria, espera-se observar rápidas variações da densidade da energia e do grau de organização do sistema.

Nesse caso, a seqüência de eventos pode ser separada nas seguintes etapas:

Diagrama massa versus temperatura da matéria nuclear



USP Laboratório Aberto de Física Nuclear

LHC (Grande Colisor de Hádrons)

RHIC (Colisor de Íons Pesados Relativísticos)

AGS (Síncrotron de Gradiente Alternado)

SPS (Supersíncrotron de Prótons)

i) após o tempo de formação ( $10^{-23}$  s), o sistema atinge um equilíbrio térmico na forma de um plasma de quarks e glúons;

ii) em seguida, esse sistema se expande e sofre um resfriamento, até atingir a temperatura crítica para a transição de fase, quando começa a formação de hádrons;

iii) um gás de hádrons interagentes é então formado – possivelmente, em equilíbrio térmico;

iv) à medida que a expansão do volume desse sistema continua, uma densidade crítica de congelamento é atingida, na qual os hádrons não mais interagem entre si.

O Brasil tem grupos experimen-

tais envolvidos diretamente nas experiências STAR e Phenix, no RHIC (sigla inglesa para Colisor de Íons Pesados Relativísticos), do Laboratório Nacional de Brookhaven (Estados Unidos). Nas energias em que ocorrem as colisões do RHIC, os núcleos se tornam transparentes e se ‘atravessam’, deixando para trás, na região de colisão, um volume de alta densidade de energia em que se espera que as condições sejam propícias à formação do plasma de quarks e glúons. O sistema formado evolui através de um processo de expansão e esfriamento e,

Nas colisões do RHIC, os núcleos se tornam transparentes e se ‘atravessam’, deixando para trás um volume de alta densidade de energia em que se espera achar o plasma de quarks e glúons

por meio de uma transição de fase, volta à matéria nuclear normal. Vários hádrons e léptons são produzidos nesse processo.



O estudo da formação de núcleos no interior das estrelas, assim como dos mecanismos de formação e extinção de sistemas estelares, está se configurando como uma nova fronteira da física nuclear de baixas energias

extinção de sistemas estelares, estão se configurando como uma nova fronteira da física nuclear de baixas energias. Processos nucleares envolvendo núcleos instáveis – ou exóticos, pois são dotados de estruturas

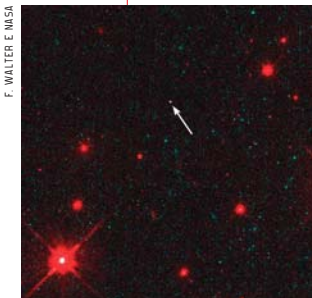
não convencionais – abrem novos temas de investigação. Para isso, novos núcleos instáveis requerem tratamento experimental diferenciado, por serem esses núcleos raros, terem vidas médias curtas, um elevado valor do isospin e densidades nucleares que diferem das distribuições convencionais – ou seja, núcleos exóticos são dotados de halos (ou ‘pele’).

O estudo da estrutura e da dinâmica de núcleos instáveis tem um papel relevante no entendimento tanto da evolução da formação de núcleos mais pesados que o ferro e o níquel quanto dos processos explosivos ou daqueles longe da linha de estabilidade, como é o caso da captura rápida de nêutrons e prótons.

### 2.1.10. Astrofísica nuclear

O físico russo Lev Landau (1908-1968) propôs a existência de **estrelas de nêutrons** depois que essas partículas foram descobertas, em 1932, pelo físico inglês James Chadwick (1891-1974). Dois anos depois, sugeriu-se que essas estrelas eram formadas depois de uma explosão de supernova, fenômeno que acontece quando o caroço de uma estrela maciça sofre um colapso gravitacional. Quando a massa da estrela colapsada é cerca de oito vezes superior à do Sol, o fenômeno supernova dará origem a uma estrela de protonênútrons – partículas que diferem dos prótons e dos nêutrons apenas em relação à estrutura interna.

Em sua evolução inicial, uma estrela de protonênútrons contém neutrinos aprisionados. Nesse estado, elas esfriam lentamente até formar estrelas de nêutrons, que são objetos compactos estáveis e frios em que não são mais encontrados neutrinos. A estrutura das estrelas de nêutrons e protonênútrons caracteriza-se por sua massa e raio, que podem ser calculados a partir de equações de estado apropriadas para densidades da ordem de dez





vezes a densidade observada em núcleos comuns. Nessas densidades, os efeitos relativísticos são certamente importantes.

A crosta de uma estrela de protonênútrons ou nêutrons, na qual a densidade é mais baixa, pode ser bem descrita pelas teorias da matéria hadrônica. Seu interior, no entanto, ainda precisa ser mais bem compreendido. Hipóteses sugerem que ele seja uma mistura de hádrons e quarks – conhecida por fase mista – ou apenas de quarks, que podem estar tanto emparelhados – como num supercondutor – quanto desemparelhados, como no chamado modelo de sacolas. Essas estrelas, com matéria composta de diferentes fases, são conhecidas por estrelas híbridas.

Vale observar que os mesmos modelos relativísticos que são capazes de descrever a matéria formada numa colisão de íons pesados podem ser utilizados na descrição da matéria estelar, sendo que, para isso, certos parâmetros da teoria devem ser ajustados.

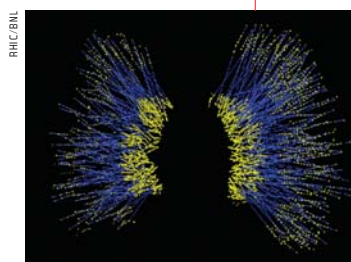
O interior de uma estrela de protonênútrons ou nêutrons ainda precisa ser mais bem compreendido; hipóteses sugerem que ele seja uma mistura de hádrons e quarks ou simplesmente quarks

### 2.1.11. Astropartículas

Um dos grandes desafios atuais está em entender a origem e a natureza dos raios cósmicos de altíssimas energias que atingem a Terra. Os UHCRs – sigla inglesa para raios cósmicos ultra-energéticos – têm energia acima de  $10^{19}$  elétrons-volt (eV), portanto de 10 milhões a 100 milhões superiores àquelas obtidas nas colisões nos aceleradores de partículas atuais.

Do ponto de vista de um UHCR, a radiação de microondas de fundo – que banha todo o universo e pode ser entendida como um ‘eco’ do Big Bang – tem energias na região da ressonância para fotoprodução de píons. Ou seja, devido a fatores relativísticos, um próton – isolado ou em um núcleo pesado – com energia superior a  $5 \times 10^{18}$  eV acaba ‘vendo’ um fóton de microondas como se fosse um raio gama. Este acaba interagindo com o próton e fazendo com que ele emita mésons pi (ou píons), o que

Um dos grandes desafios atuais está em entender a origem e a natureza dos raios cósmicos de altíssimas energias que atingem a Terra



Não há modelos de aceleração de partículas baseados em processos eletromagnéticos capazes de explicar os raios cósmicos ultraenergéticos; portanto, eles devem ser produzidos por novos fenômenos físicos

lhe degrada a energia. Por conta desse processo, há um corte que limita a propagação dos UHCRs, impondo que suas fontes fiquem a distâncias inferiores a cerca de 50 megaparsecs da Terra – cada parsec equivale a 3,26

anos-luz. Esse corte é conhecido como limite GZK, em homenagem aos seus idealizadores, o físico norte-americano Kenneth Greisen, e os russos Giorgi Zatsepin e Vadim Kuz'min, que chegaram a esses resultados em meados da década de 1960.

Não há modelos de aceleração de partículas baseados em processos eletromagnéticos capazes de explicar os UHCRs. Portanto, eles devem ser produzidos por novos fenômenos físicos, caso contrário fontes astrofísicas já conhecidas terão que apresentar processos inusitados associados à sua produção.

Atualmente, está sendo construído na Argentina um observatório capaz de atacar esse desafio de forma sistemática, medindo raios cósmicos com grande precisão e acumulando uma estatística grande o suficiente para iluminar o problema. O Observatório Pierre Auger – homenagem ao físico francês Pierre Auger (1899-1993) – localizado nas proximidades dos Andes, ao sul da cidade de Mendoza, é o resultado do esforço de cientistas de 14 países, com forte participação de físicos brasileiros – de vários estados – e argentinos.

A indústria brasileira tem fornecido muitos dos componentes do Observatório Auger. Outros projetos em andamento para estudar esse problema prevêem a colocação de sensores de raios cósmicos em órbita para a medir as características de chuveciros com altíssimas energias e gerados na atmosfera.

Tanque  
do Observatório  
Pierre Auger



## 2.1.12. Matéria escura

Temos assistido, nos últimos anos, ao nascimento de um novo paradigma na física: 90% do universo parecem ser constituídos de algum tipo de matéria invisível à observação, chamada matéria escura, sobre a qual ainda quase nada sabemos. A característica principal dessa forma de matéria é o fato de ela não emitir radiação eletromagnética.

A existência de matéria escura foi pela primeira vez aventada no início da década de 1930, quando o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898-1974) observou que a distribuição das velocidades das galáxias em vários conglomerados implicava que nesses conjuntos de galáxias deveria haver de dez a cem vezes mais massa que a da matéria associada às estrelas ali existentes. No entanto, essa observação permaneceu ignorada por quase 40 anos. Apenas no início da década de 1970 é que se descobriu que a matéria escura não só se encontra em aglomerados longínquos de galáxias, mas também está presente no interior da Via Láctea.

As velocidades orbitais das estrelas mais externas em torno do centro de uma galáxia refletem a quantidade de massa nela existente: quanto maior forem, mais massa terá de estar presente. Assim, observa-se que o movimento giratório do disco espiralado e chato da Via Láctea é rápido demais para ser explicado pela gravidade de estrelas e gases visíveis. Quando cálculos são efetuados chega-se à conclusão que a massa total da Via Láctea é cerca de dez vezes superior à massa total que nela conseguimos observar nas diferentes regiões do espectro eletromagnético, desde rádio até raios X.

Essa matéria escura parece preencher toda a Via Láctea, formando um halo aproximadamente esférico – na verdade, uma esfera achatada – no centro do qual nossa galáxia se encontra. Através da determinação das velocidades orbitais de estrelas em outras galáxias, chega-se invariavelmente à mesma conclusão: cerca de 90 por cento da sua massa – por vezes, até mais – encontram-se sob a forma de matéria escura.

Por intermédio das velocidades das galáxias na nossa região do universo chegou-se à conclusão que mesmo o aparentemente espaço vazio entre as galáxias é preenchido por matéria escura que pode representar até mais de 90 por cento da matéria existente no universo.

Há duas possibilidades sobre a natureza da matéria escura:

- i) que ela seja formada por matéria bariônica;
- ii) matéria não bariônica.

No primeiro caso, portanto, ela seria matéria normal, ou seja, constituída de prótons, nêutrons e elétrons, mas formando objetos compac-

Cerca de 90% do universo parecem ser constituídos de algum tipo de matéria invisível à observação, chamada matéria escura, sobre a qual ainda quase nada sabemos

A matéria escura parece preencher toda a Via Láctea, formando um halo aproximadamente esférico no centro do qual nossa galáxia se encontra



Múltiplas imagens  
de uma galáxia  
distante  
Telescópio Hubble

W. COHEN / JPL / NASA

tos que emitem pouca ou nenhuma radiação, como estrelas muito pouco luminosas ou buracos negros. No segundo caso, seria matéria não bariônica, sobretudo ainda desconhecida, constituída por partículas elementares neutras que ainda não foram descobertas e que não interagem com a luz. Felizmente, ambas as hipóteses são testáveis.

Objetos astronômicos maciços e escuros, formados de matéria bariônica, poderão ser detectados através do chamado efeito de lente gravitacional. Previsto pela teoria da relatividade geral do físico alemão Albert Einstein (1879-1955), esse efeito resulta no aumento do brilho de uma estrela quando um objeto qualquer se interpõe entre o observador e a estrela – a massa gravitacional do objeto atua como lente, focando os raios luminosos provenientes da estrela. Um exemplo concreto é a imagem abaixo obtida com o telescópio norte-americano Hubble que mostra imagens múltiplas de uma galáxia azul distante produzida pela grande concentração de massa de um aglomerado de galáxias mais próximo.

A probabilidade do efeito de lente gravitacional ocorrer para uma dada estrela na Via Láctea é muito reduzida. Por essa razão, as várias experiências hoje em funcionamento seguirão continuamente o brilho de milhões de estrelas por um período de anos para observar um número de eventos estatisticamente relevante. Até agora, o efeito de lente já foi observado dezenas de vezes. A conclusão preliminar é que cerca da metade da matéria escura em nossa galáxia poderá ser constituída ou por estrelas muito antigas de fraca luminosidade – denominadas anãs brancas e marrons –, ou por objetos resultantes da explosão de estrelas maciças (supernovas), isto é, estrelas de

nêutrons ou buracos negros. Esses objetos são genericamente denominados Machos (sigla inglesa para objetos maciços do halo compacto).

Partículas elementares que podem agir como matéria escura são chamadas de Wimps (sigla inglesa para partículas maciças fracamente interagentes). A única Wimp que conhecemos – e que, por isso, seria candidata natural à matéria escura – é o neutrino. No entanto, as evidências experimentais atuais parecem indicar que neu-

**Cerca da metade da matéria escura em nossa galáxia poderá ser constituída ou por estrelas muito antigas de fraca luminosidade, ou estrelas maciças**

trinos não têm massa suficiente para dar conta de toda a matéria escura observada. Como neutrinos são partículas relativísticas, eles também rapidamente desfariam as flutuações de densidade em escalas pequenas, ou seja, inibiriam a formação de galáxias e, desse modo, não poderiam ser parte dominante da matéria escura. Calcula-se que existam de 300 a 600 neutrinos por centímetro cúbico de universo. Portanto, mesmo que neutrinos tenham uma massa muito pequena, poderão ainda constituir até 20% da matéria invisível.

Se os Wimps forem responsáveis pela matéria escura do universo, devem também estar presentes no halo de nossa galáxia e, portanto, podem ser observados por experimentos na Terra. Matéria escura constituída de novas Wimps exóticas têm sido alvo de buscas experimentais indiretas em diversos laboratórios do mundo. Até agora, todas as experiências obtiveram resultados negativos ou de pouca confiança. Como observar essas partículas? Imagina-se que colisões entre Wimps e alvos atômicos sejam semelhantes a colisões entre bolas de bilhar: a Wimp muda de direção, diminui um pouco a velocidade e, conseqüentemente, o átomo recua. O recuo do átomo pode ser observado de três formas diferentes:

- i) em semicondutores, bem como em alguns líquidos e gases, a carga elétrica liberada pelo átomo por ionização pode ser coletada;
- ii) em alguns cristais e líquidos, flashes de luz – que podem ser observados – são produzidos à medida que o átomo diminui de velocidade;
- iii) em cristais, a energia de recuo é transformada em vibrações (fônons) que podem ser detectadas a temperaturas extremamente baixas.

Em geral, esses três tipos de experiências estão localizados no fundo de minas, para reduzir ao mínimo a possibilidade de o detector ser perturbado por partículas normais resultantes da radioatividade natural ou de raios cósmicos.

Várias teorias fornecem partículas que são candidatas a Wimps para formarem a maior parte da matéria escura. A classe de teorias favorita da maioria dos pesquisadores são as chamadas teorias supersimétricas, em que cada partícula elementar está associada a uma congênere ainda não observada e que é, de certo modo, sua complementar (ou parceira). Só aquela que tem a menor massa nesse par é estável, o que significa que todas as outras eventualmente se transformarão nela com o decorrer do tempo. Essa

partícula complementar de menor massa, o neutralino, é assim o melhor candidato no momento para constituir a maior parte da matéria escura existente no universo.

Experimentos de partículas em aceleradores no Fermilab e no CERN deverão investigar a existência dessas partículas supersimétricas nas próximas décadas. Por outro lado, os neutralinos das teorias supersimétricas também podem ser capturados pela Terra e pelo Sol, aniquilando-se em pares e produzindo neutrinos de alta energia que poderão também ser observados pelos telescópios de neutrinos construídos no pólo Sul.

Apesar de nenhuma partícula exótica constituinte da matéria escura ter sido ainda detectada, sua existência é bastante provável, pois uma combinação de resultados teóricos e observacionais permite-nos afirmar que a quantidade de matéria normal formada pouco depois do início do universo terá sido bem inferior à quantidade de matéria escura que sabemos existir hoje.

O enigma da matéria escura é um dos mais importantes problemas da física deste início de século; com base em novas experiências e novos instrumentos, esperam-se avanços significativos nos próximos anos

O enigma da matéria escura é um dos mais importantes problemas da física deste início de século. Com base em novas experiências e no desenvolvimento de novos instrumentos, esperam-se avanços significativos nos próximos anos.

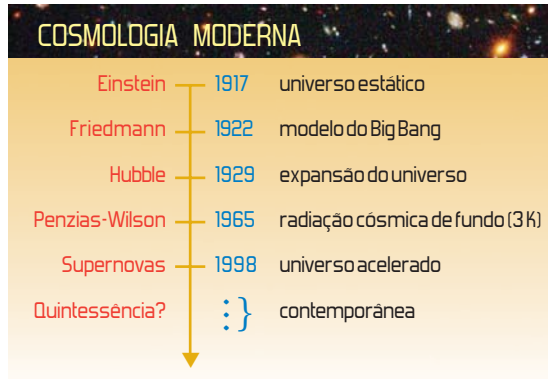
## 2.2. ESTRUTURA E EVOLUÇÃO DO UNIVERSO

Em 1998, as medidas acumuladas de distância e velocidade de afastamento das supernovas mostraram, com grande precisão, que o universo está expandindo aceleradamente. Esse resultado alterou drasticamente nossa visão do cosmo, pois, sendo a gravidade uma força atrativa, a expansão deveria ser desacelerada, conforme se acreditou por décadas.

Na teoria da relatividade geral, publicada em 1916 pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955), esse fenômeno pode ser explicado pela existência da chamada energia escura, ou seja, uma componente extra e desconhecida de energia cujo efeito



Capa da *Science* de 18 de dezembro de 1998



A cosmologia moderna foi iniciada por Einstein em 1917, quando ele propôs um modelo de universo estático. Friedmann obteve as soluções expansionistas, posteriormente denominadas de cosmologias do Big Bang por Fred Hoyle. Desde aquela época, se acreditava que o universo expandia desaceleradamente, pois a gravidade é uma força atrativa. Em 1998, as observações de supernovas do tipo IA mostraram que a expansão está acelerada. Esse resultado marcou o início da cosmologia contemporânea.

gravitacional líquido é repulsivo e supera a atração gravitacional ordinária entre as partes do universo. Isoladamente, essa descoberta também gerou mais um desafio às próprias leis da física, pois essa nova componente não é prevista pelo modelo padrão da física de partículas.

A expansão cósmica ou recessão das galáxias foi prevista pelo matemático e meteorologista russo Aleksandr Friedmann (1888-1925) através de seus modelos de Big Bang. A cosmologia moderna é um produto direto da teoria gravitacional de Einstein com as observações astronômicas dos grandes telescópios. Portanto, como os demais ramos da física moderna, é tipicamente uma disciplina criada pela física do século passado.

Será a energia escura um campo cósmico fundamental que existe desde os primórdios do universo e se manifesta no presente apenas devido ao alto grau de diluição da matéria cósmica? Como serão as últimas fases da evolução do universo se a energia escura for a componente dominante, ou seja, qual o destino do cosmo na presença dessa componente extra? O presente estado de aceleração do universo nos remete a outras perguntas: sabemos que o universo se expande, mas desde quando está acelerado? Se não existir a energia escura, que teoria de gravidade substituirá a relatividade geral?

**Sabemos que o universo se expande, mas desde quando está acelerado?; se não existir a energia escura, que teoria de gravidade substituirá a relatividade geral?**

As questões acima fazem parte das indagações mais candentes e palpantes da ciência contemporânea e, como ocorreu no Renascimento, essas e outras perguntas relacionadas empurram novamente a astronomia e a cosmologia para a fronteira do conhecimento científico.



### 2.2.1. Os pilares do Big Bang

Em grande escala, o universo é homogêneo e isotrópico, ou seja, tem a mesma densidade de matéria e energia, bem como as mesmas propriedades, em todas

O universo se expandiu e se esfriou rapidamente, um efeito que permitiu a formação das galáxias, das estrelas e, finalmente, da própria vida

as direções. Ele iniciou sua evolução a partir de uma grande explosão – o chamado Big Bang – com densidade e temperatura extremamente altas, da ordem da chamada densidade de Planck

( $10^{94}$  gramas/cm<sup>3</sup>) e temperatura de Planck ( $10^{32}$  K), valores que caracterizam o chamado estado singular inicial.

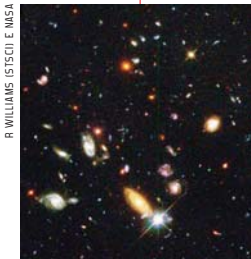
Nas fases subseqüentes, o universo se expandiu e se esfriou rapidamente, um efeito que permitiu a formação das galáxias, das estrelas e, finalmente, da própria vida. A fantástica variação de temperatura ao longo de sua evolução significa que o universo é um sistema físico ímpar, para o qual os conceitos e as técnicas matemáticas desenvolvidas nos mais variados campos da física – de altas energias a baixas temperaturas – podem ser relevantes para estabelecer os detalhes da história cósmica.

As principais descobertas observacionais que sustentam a cosmologia do Big Bang são:

- i) a lei de Hubble, a manifestação mais direta da expansão universal;
- ii) a nucleossíntese cosmológica, que permitiu determinar a abundância cósmica dos elementos leves, sendo que esse processo desempenha um papel crucial para entender os primeiros instantes do Big Bang, e também limitar os parâmetros físicos dos modelos – as abundâncias observadas dos elementos mais leves, como hidrogênio, deutério, hélio e lítio, não são explicáveis por uma síntese exclusivamente estelar;
- iii) a radiação cósmica de fundo (2,7 K) tem sido a ‘pedra da Roseta’ para a cosmologia, pois permitiu estabelecer as chamadas eras cósmicas, relacionando tempo com temperatura e, assim, determinando as condições físicas em cada fase da evolução do universo.

Uma descrição dinâmica do universo exige o conhecimento de pelo menos três parâmetros físicos:

- i) a constante de Hubble, que mede a presente taxa de expansão;
- ii) o parâmetro de desaceleração, que mede



R. WILLIAMS / ISTOCK E NASA

a variação da taxa de expansão, ou seja, se o universo se acelera ou desacelera;

iii) o parâmetro de densidade, que mede a contribuição relativa de cada componente do fluido cósmico.

No modelo padrão, o universo seria uma mistura de quatro componentes:

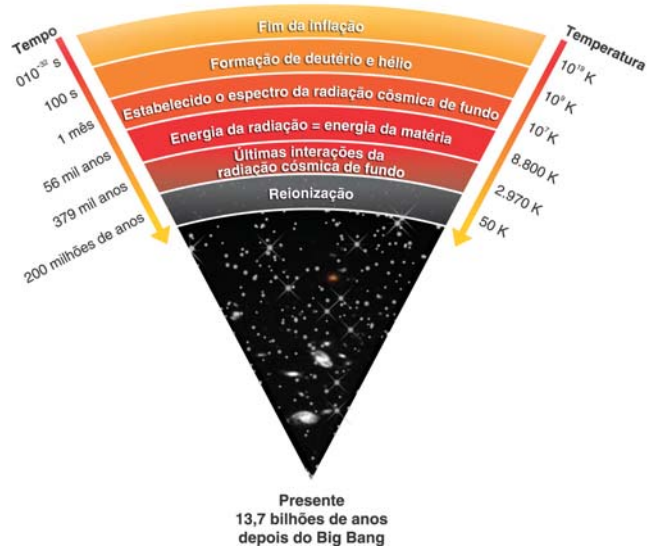
- i) bárions (prótons e nêutrons), que, juntamente com os elétrons, são responsáveis pela luz das galáxias;
- ii) os fótons da radiação cósmica de fundo;
- iii) os neutrinos;
- iv) a matéria escura.

Esse quadro não é ainda completamente coerente, pois há dois problemas com o chamado modelo padrão, um teórico e outro relativo às observações.

Nesse cenário, o parâmetro de densidade total – ou seja, a soma dos parâmetros das quatro componentes – é igual a 1, sendo o universo espacialmente plano. Essa condição foi teoricamente prevista, no início da década de 1980, pelos chamados cenários inflacionários. No entanto, diversas observações independentes indicam a densidade total igual a 0,3, um valor bem menor do que a unidade.

Há também o problema da idade. As estruturas mais velhas observadas no universo, os aglomerados globulares – grupos com cerca de  $10^5$  a  $10^6$  estrelas – apresentam uma idade entre 13 e 14 bilhões de anos, bem maior do que os 9,9 bilhões de anos calculados pelo modelo com matéria escura fria e densidade total igual a 1

Até meados da década de 1990, o cenário padrão era um modelo plano com matéria escura fria – *cold dark matter*, na literatura inglesa – e desacelerado. Um universo acelerado não era sequer considerado como hipótese de trabalho pelos teóricos, pois a gravidade é uma força atrativa. Esse quadro foi drasticamente alterado com as observações de supernovas que, como veremos, permitiu fazer medidas precisas das distâncias das galáxias.



O universo é um sistema que se expande e esfria. A descoberta da radiação cósmica de fundo permitiu traçar a história térmica do universo, pelo menos desde o final do período inflacionário

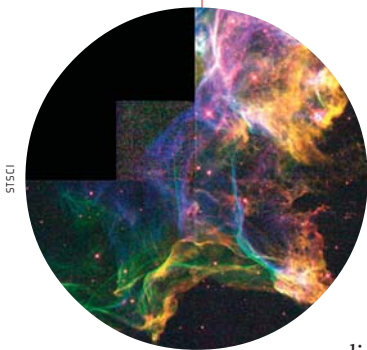
Até meados da década de 1990, o cenário padrão era um modelo plano com matéria escura fria e desacelerado; um universo acelerado não era sequer considerado como hipótese, pois a gravidade é uma força atrativa

Para se ter mais informações sobre a geometria do universo e o seu estado de expansão, é preciso medir velocidades e distâncias de objetos cada vez mais afastados, de preferência situados nos confins do universo

Para se ter mais informações sobre a geometria do universo e o seu estado de expansão, é preciso medir velocidades e distâncias de objetos cada vez mais afastados, de preferência situados nos confins do universo

objetivo central era medir o parâmetro de desaceleração. Embora as galáxias fossem os candidatos naturais, a determinação de sua luminosidade absoluta envolve muitas dificuldades, pois galáxias são entidades compostas, formadas por uma infinidade de estrelas. No início da década de 1990, começou a ficar claro que, para seguir adiante, era preciso apelar para o brilho extremo das supernovas.

A **supernova** é uma gigantesca explosão que representa a destruição termonuclear de uma estrela. Nesse processo, lança-se energia no espaço em quantidades extraordinárias. O brilho total de uma supernova é igual ao de 10 bilhões de estrelas como o Sol e, portanto, rivaliza com o brilho de uma galáxia inteira, tendo uma vantagem adicional: sendo um único corpo, sua luminosidade pode ser determinada com grande precisão.

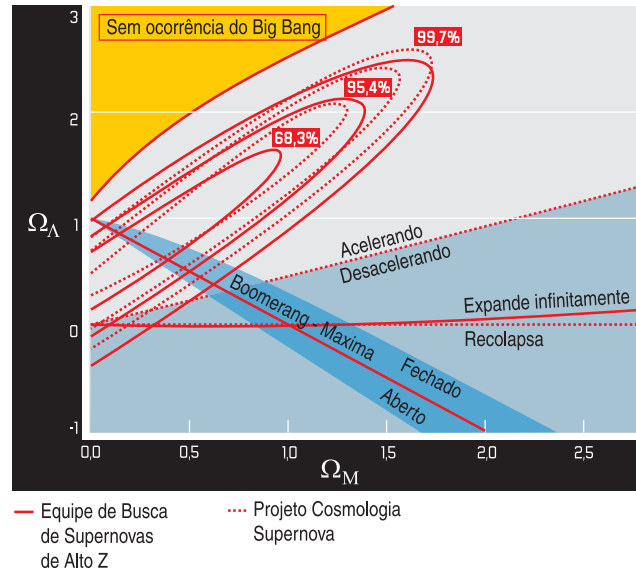


Duas equipes independentes de astrônomos – envolvendo diversas universidades, em vários continentes, liderados, respectivamente, pelos norte-americanos Brian Schmidt e Saul Perlmutter – adotaram a seguinte metodologia na caça das supernovas. No lugar de se observar uma única galáxia com um grande telescópio, fazem-se duas imagens consecutivas da mesma região do céu envolvendo cerca de mil galáxias em diferentes distâncias. Repetindo a mesma estratégia para 100 regiões distintas, obtém-se no total cerca de 100 mil galáxias observadas.

As duas imagens dos mesmos campos de galáxias são finalmente superpostas. Qualquer ponto luminoso adicional é um bom candidato a supernova, um evento cuja ocorrência deve ser altamente provável num total de 100 mil galáxias. Uma vez identificado o ponto luminoso adicional, aponta-se imediatamente o telescópio espacial Hubble para a supernova e determina-se a sua luminosidade relativa, o que permite calcular a que distância da Terra esse evento ocorreu.

Os resultados das observações de supernovas foram complementados por muitos experimentos independentes:

Os contornos representam as análises realizadas pelos dois grupos. Os valores dos parâmetros se encontram na região acelerada (cinza claro), com um elevado nível de confiança estatística. A faixa transversal azul representa os dados da radiação cósmica de fundo (RCF) obtidos pelos experimentos do Boomerang e Máxima, em 2001. Esses experimentos foram os primeiros na história da cosmologia a fixar  $\Omega_{\Lambda} = 1$ . A ortogonalidade dos resultados de supernovas e da RCF é referido como concordância cósmica



- i) a homogeneidade da radiação cósmica de fundo;
- ii) estimativas mais precisas da idade de aglomerados globulares, bem como dados relativos à emissão de raios X por parte deles;
- iii) estatística de lentes gravitacionais (conglomerados de matéria que têm comportamento semelhante às lentes ópticas, desviando ou focando a radiação emitida por corpos celestes ou galáxias);
- iv) dados provenientes da distribuição de matéria e sua estrutura de larga escala.

Esse conjunto de observações implica também que o universo visível é basicamente formado por bárions (elementos pesados), fótons, neutrinos, matéria escura, além da ‘substância’ extra que acelera o universo, usualmente chamada energia escura ou quintessência.

Existem atualmente vários candidatos ao posto de energia escura convivendo na literatura. Todos compatíveis com os dados existentes até o presente. Portanto, mesmo considerando que o problema da multiplicidade de candidatos não foi ainda resolvido pelo confronto direto com os dados obtidos até o presente, muitas questões estão sendo investigadas. A mais importante delas, sem dúvida, é saber qual a sua natureza, pois sua abundância cósmica – caso essa componente exista – já está determinada: cerca de 65% a 70% de todo o conteúdo cósmico.

A questão mais importante é saber qual a natureza da energia escura, pois sua abundância cósmica – caso essa componente exista – já está determinada: cerca de 65% a 70% de todo o conteúdo cósmico

### 2.2.2. A aceleração do universo

As observações de supernovas implicam uma expansão universal acelerada, um fenômeno que, no contexto da relatividade geral, só pode ser explicado se existir uma componente extra de energia com pressão suficientemente negativa – ou seja, exercendo o papel de uma força repulsiva. Embora essa nova componente modifique a visão tradicional do universo, o desconhecimento de sua natureza – ou, equivalentemente, a inexistência de um candidato natural oriundo da física de partículas – vem provocando um intenso debate e estimulando especulações. A propriedade comum desses candidatos é ter pressão negativa. E, como esta é a condição básica para um universo acelerado, existem outras possibilidades, ocasionalmente discutidas na literatura.

A constante cosmológica – introduzida por Einstein em 1917 – é a mais simples do ponto de vista matemático – justamente por ser constante. É uma proposta de energia escura espacialmente uniforme e independente do tempo, interpretada como um fluido relativístico. É um tipo de energia – denominado energia do vácuo – que se manifesta através de fenômenos quânticos, como no desvio de Lamb (desvio espectral das linhas do átomo de hidrogênio) e no chamado efeito Casimir (atração de placas metálicas eletricamente descarregadas no vácuo).

Mesmo considerando que estamos atravessando um período extraordinário na cosmologia observacional, os dados existentes ainda são insuficientes para determinar qual o melhor entre os vários candidatos a energia escura

No entanto, há um problema fundamental associado com esse candidato, o qual tem sido denominado problema da constante cosmológica. O limite cosmológico da densidade de energia do vácuo difere das expectativas teóricas em 120 ordens de magnitude ( $10^{120}$ ). Esse

é um problema localizado na interface unindo astrofísica, cosmologia e teoria quântica de campos e que tem sido considerado por autores como a maior crise da física contemporânea. Esse quebra-cabeça tem estimulado propostas alternativas.

Mesmo considerando que estamos atravessando um período extraordinário na cosmologia observacional, os dados existentes ainda são insuficientes para determinar qual o melhor entre os vários candidatos ao posto de energia escura. Um claro sinal de que observações mais precisas são necessárias para testar as hipóteses e suas previsões básicas. No momento, sabe-

mos apenas que o universo é espacialmente plano, como originalmente sugerido pelas medidas da radiação cósmica de fundo pelo recente experimento do WMAP (Sonda Wilkinson de Anisotropia de Microondas). Em particular, isso significa que a determinação de parâmetros cosmológicos continuará a ser a meta central das investigações neste início de século.

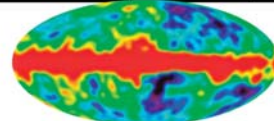
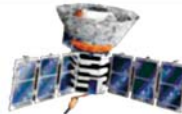
Um objetivo fundamental da pesquisa atual em cosmologia é descobrir a natureza da energia escura. O paradigma emergente é mais complexo que o cenário tradicional proporcionado pelo modelo de Einstein-de Sitter – um modelo cosmológico que assume um universo homogêneo, isotrópico e com constante cosmológica igual a zero. Além disso, existe a matéria escura, o que se pode induzir a pensar que estamos diante de mais uma geração de epíclis, como ocorreu no modelo ptolomaico. Contudo, é bom lembrar que as naturezas da matéria escura e da energia escura são bem distintas. Embora a matéria escura não tenha também sido detectada em laboratório, há vários candidatos vindos da física de partículas cuja natureza é bem estabelecida. Atualmente, muitos experimentos visando à sua detecção em laboratórios terrestres estão em andamento.

A energia escura juntamente com a matéria escura respondem por cerca de 95% do conteúdo total de matéria e energia que preenche o cosmo – os 5% restantes correspondem às outras três componentes: matéria bariônica, radiação cósmica de fundo e neutrinos. Distintamente da matéria escura, que é não relativística e sem pressão, a energia escura é relativística e tem pressão negativa. Embora dominante, sua densidade é extremamente pequena, e provavelmente a fraca interação

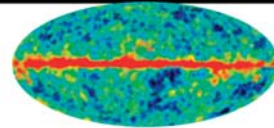
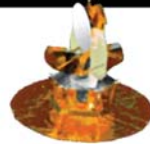
1965 Penzias e Wilson



1992 COBE (Satélite Explorador da Radiação de Fundo)



2003 WMAP (Sonda Wilkinson de Anisotropia em Microondas)



Desde a descoberta da radiação cósmica de fundo, por Penzias e Wilson, em 1965, vários experimentos com satélite foram efetuados para medir a distribuição angular da temperatura do fundo de microondas na esfera celeste. No mais recente deles (WMAP), muitos parâmetros cosmológicos foram determinados com precisão jamais obtida. A posição do primeiro pico acústico no espectro de potências da RCF favoreceu um universo espacialmente plano

**Embora dominante, a densidade da energia escura é extremamente pequena, e provavelmente a fraca interação dela com a matéria ordinária tornará impossível sua identificação em laboratório**



Caso a energia escura não exista, nossa melhor teoria gravitacional sofrerá um golpe fatal, pois aparentemente não há outra maneira de acelerar o universo no âmbito da relatividade geral

com a matéria ordinária tornará impossível sua identificação em laboratório.

É realmente um tempo de conflitos e dúvidas. No entanto, estamos vivenciando o momento mais excitante do de-

seenvolvimento da cosmologia, pois, embora preservando aspectos da física básica, um novo protagonista, invisível, que não foi previsto pela física de partículas, parece ter definitivamente tomado a cena. A energia escura é responsável por uma gravidade repulsiva e, potencialmente, pode alterar profundamente nossa visão tradicional de espaço, tempo e matéria.

Por outro lado, caso a quintessência não exista, nossa melhor teoria gravitacional sofrerá um golpe fatal, pois aparentemente não há outra maneira de acelerar o universo no âmbito da relatividade geral. Uma alternativa que vem sendo examinada na literatura é que a gravidade possa ser diluída em dimensões extras do espaço. Esse é o esquema mais promissor oferecido pela atual teoria de cordas e de membranas.

Um conflito de doutrinas será inevitável. Contudo, esse choque não deve ser visto como uma catástrofe para a ciência do cosmo, mas, sim, como uma grande oportunidade para os espíritos mais criativos. Na atual fase da física, para avançarmos no entendimento da natureza, é preciso investir na compreensão do cosmo – nosso sistema maior –, a última fronteira na busca do conhecimento. Nesse contexto, a natureza da ener-

A natureza da energia escura – ou sua negação –, juntamente com outros problemas da cosmologia e da astrofísica, serão extremamente relevantes na construção do novo paradigma que norteará a ciência deste século

gia escura – ou sua negação –, juntamente com outros problemas da cosmologia e da astrofísica, serão extremamente relevantes na construção do novo paradigma que norteará a ciência deste século.

### 2.3. MANIPULAÇÃO QUÂNTICA DE ÁTOMOS, MOLÉCULAS E FÓTONS

Na última década, foram desenvolvidas, em diversos laboratórios, técnicas que permitem a manipulação individual de átomos, moléculas e fótons. Essa nova tecnologia envolve tanto a construção de dispositivos quanto sua operação



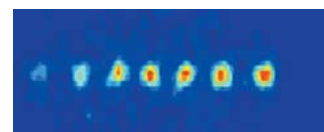
inteiramente no nível quântico. Através de campos eletromagnéticos, é possível aprisionar e manipular um único átomo ou molécula e fazê-lo interagir com um outro átomo ou molécula, também aprisionados, ou ainda com um único corpúsculo de luz (fóton) aprisionado em uma cavidade. Esses experimentos têm permitido a investigação de sutis propriedades do mundo quântico e podem levar a novas tecnologias, com aplicações que incluem o desenvolvimento de novos materiais, a construção de instrumentos de medida de altíssima sensibilidade, a implementação de computadores quânticos e a análise de moléculas biológicas.

Através de campos eletromagnéticos, é possível aprisionar e manipular um único átomo ou molécula e fazê-los interagir com um outro átomo ou molécula, também aprisionados, ou ainda com um único corpúsculo de luz (fóton) preso em uma cavidade

### 2.3.1. Laser de átomos

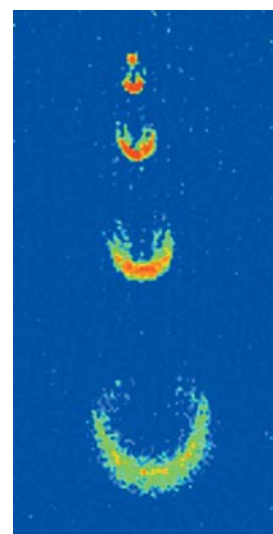
A aplicação de forças em moléculas biológicas, como o DNA, aprisionadas por feixes de laser (pinças óticas), tem permitido o estudo de suas propriedades mecânicas. Grupos de átomos aprisionados em armadilhas eletromagnéticas têm sido levados a um único estado quântico, o condensado de Bose-Einstein, constituindo-se, assim, um sistema macroscópico que exibe notáveis propriedades quânticas. Através da aplicação de feixes de radiofrequência, força-se a saída ordenada desses átomos da armadilha, formando-se um feixe com propriedades análogas às de um laser e que, por isso, tem sido chamado laser de átomos.

Esses feixes poderiam ser aplicados em técnicas litográficas de altíssima resolução – a litografia consiste em imprimir informação sobre um substrato, resultando, por exemplo, em circuitos impressos –, levando a um aumento substancial da capacidade de armazenamento de informação, com relação à litografia feita com luz ou com elétrons. Podem também ser usados para medidas de alta precisão, em aparelhos denominados interferômetros, que permitiriam, por exemplo, a medida do campo gravitacional na superfície da Terra com precisão suficiente para detectar poços de petróleo.



Ions presos em campos magnéticos

RAMER BLATT / UNIVERSIDADE DE INNSBRUCK (ÁUSTRIA)



Laser de átomos

WU FANG KETTERE (MIT/USA)

### 2.3.2. Chips atômicos

Uma nova geração de *chip* começa a ser investigada em vários laboratórios: os chips atômicos, em que, em vez de elétrons, temos átomos individuais ou mesmo condensados de Bose-Einstein sendo conduzidos através de um circuito integrado. Diferentemente dos chips eletrônicos – nos quais

Nos chips atômicos, em vez de elétrons, teríamos átomos individuais ou em conjunto sendo conduzidos através de um circuito integrado

os elétrons fluem através dos fios condutores impressos em uma placa de silício –, os átomos são mantidos a alguns microns de uma superfície de silício por meio de campos magnéticos

criados pelo circuito integrado. A sensibilidade de um interferômetro feito com partículas é inversamente proporcional ao produto da massa pela velocidade da partícula. O fato de ser a massa de um átomo muito maior que a de um elétron permitiria a construção de interferômetros extremamente precisos, úteis para a navegação interestelar, para a medida de constantes fundamentais e para aplicações em prospecção geológica e mineral.

Ondas eletromagnéticas estacionárias, numa configuração análoga à de uma corda vibrante, com vales e picos alternando-se espacialmente, têm sido usadas para aprisionar átomos, numa estrutura tridimensional semelhante a uma caixa de ovos, permitindo a realização de redes cristalinas ópticas e a demonstração de fenômenos característicos de redes cristalinas – como transições de fase quânticas – em situações controladas, difíceis de se alcançar com cristais usuais. Aplicações desses sistemas para a compu-

tação quântica têm sido consideradas.

O controle individual de fótons e a produção de estados emaranhados de dois fótons – chamados de fótons gêmeos, pois são produzidos simultaneamente por um cristal excitado por um laser, em que as propriedades dos dois fótons estão correlacionadas – têm levado a aplicações em criptografia quântica e a demonstrações de novos processos quânticos, como a teleportação.



Possível esquema de um chip atômico. O ponto luminoso é um condensado de Bose-Einstein, mantido por campos magnéticos a uma distância de alguns microns da superfície do circuito integrado – a mosca dá uma idéia do grau de miniaturização

### 2.3.3. Computadores quânticos

Esses desenvolvimentos têm encorajado novas idéias que podem levar a uma revolução na arquitetura de computadores e à utilização da física quântica para implementação de novos algoritmos que poderiam ser exponencialmente mais rápidos que os atuais.

Os computadores ‘clássicos’, que utilizamos hoje em dia, codificam a informação através de uma seqüência de *bits* que assumem os valores 0 e 1. Esses dois dígitos formam uma base binária que permite expressar qualquer número inteiro. Esses *bits* – que podem ser associados fisicamente, por exemplo, a cargas de capacitores – são processados por dispositivos eletrônicos que permitem a realização de operações básicas, em termos das quais qualquer computação pode ser realizada.

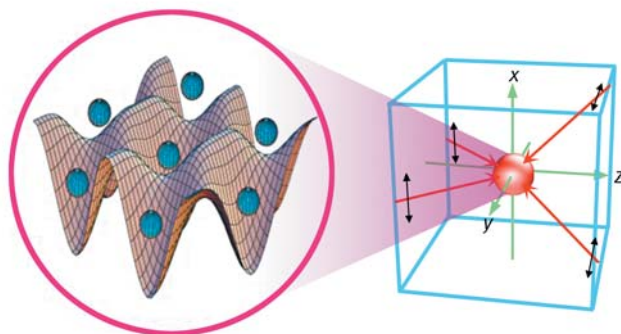
Já os computadores quânticos codificariam a informação através dos chamados *qbits* (ou *bits* quânticos), que apresentam uma propriedade extremamente sutil do mundo quântico:

eles podem ser colocados em uma superposição de estados correspondentes aos valores 0 e 1. Isso poderia ser materializado através, por exemplo, de um átomo que poderia

Os computadores quânticos codificariam a informação através dos chamados *bits* quânticos, que podem ser colocados em uma superposição de estados correspondentes aos valores 0 e 1

estar em uma superposição de dois de seus estados. Um conjunto de  $N$  *qbits* pode ser colocado, da mesma forma, em uma superposição de  $2^N$  estados, cada um desses deles correspondendo a certos *qbits* no estado 0 e outros no estado 1: (000... 0), (100... 0), (010... 0), (111... 0), ... (111... 1). Esses estados codificam todos os números passíveis de serem representados por  $N$  bits. Isso permite aplicar uma operação física que corresponderia a um cálculo computacional simultâneo a todos as entradas possíveis, realizando-se, assim, uma computação em paralelo, em vez de se calcular seqüencialmente o resultado para cada uma das entradas.

São duas as motivações para o desenvolvimento de computadores quânticos. Em primeiro lugar, a observação, feita, já na década de 1960, por Gordon Moore – um dos fundadores da empresa norte-americana de microprocessadores Intel –, de que o número de transistores na unidade central de processamento, bem como a velocidade de processamento, dobram a cada 18 meses. Ao mesmo tempo, cai à metade o número de



Rede de átomos

átomos necessários para codificar um *bit* de informação. Nessa progressão, chegaríamos ao limite de um átomo por bit em torno de 2015, o que implicaria a saturação da lei de Moore. Torna-se, então, natural pensar na utilização das propriedades quânticas dos átomos para a implementação de algoritmos computacionais que permitissem aumentar a velocidade de processamento apesar da saturação da lei de Moore.

C. MONROE, NATURE 21.08.97, NEWS AND VIEWS, pp. 719-720

### 2.3.4. Criptografia quântica

A segunda motivação veio precisamente em 1994 com a descoberta, feita pelo matemático Peter Shor, dos Laboratórios AT&T Bell (Estados Unidos), de um algoritmo quântico para a decomposição de um número em seus fatores primos exponencialmente mais rápido que o melhor algoritmo clássico conhecido. A importância prática dessa descoberta resi-

**Um computador quântico permitiria a quebra de mensagens criptografadas em um tempo exponencialmente menor que o necessário para um computador clássico – atualmente, da ordem de milhares de anos**

de no fato de que a dificuldade para fatorar números grandes é a base de um método criptográfico bastante utilizado hoje em dia, o método RSA. Um computador quântico permitiria a quebra de

mensagens criptografadas em um tempo exponencialmente menor que o necessário para um computador clássico – atualmente, da ordem de milhares de anos.

Outros algoritmos quânticos foram descobertos posteriormente. Sistemas atualmente considerados para demonstrações de operações computacionais quânticas incluem íons em armadilhas magnéticas, átomos e fótons em cavidades, redes cristalinas ópticas, moléculas em soluções líquidas manipuladas através de técnicas de ressonância nuclear magnética, pontos quânticos e impurezas em semicondutores.

### 2.3.5. Informação quântica no Brasil

Já existem no Brasil laboratórios que realizam experiências com átomos frios (Universidade Federal de Pernambuco; Universidade de São Paulo, campus São Paulo e São Carlos; Universidade Estadual de Campinas), com fótons emaranhados (Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Alagoas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense), com pinças óticas (UFMG, Unicamp, UFRJ), pontos quânticos (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron) e ressonância magnética nuclear (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, UFPE, USP-São Carlos).

Grupos teóricos no CBPF, UFRJ, Universidade Federal de São Carlos, Unicamp e UFMG investigam propostas de realização de operações elementares de computação quântica em diversos sistemas físicos, propriedades de estados emaranhados, efeitos do ambiente em sistemas quânticos, algoritmos computacionais.

O Instituto do Milênio de Informação Quântica, criado no final de 2001, reúne diversos desses grupos, apoiando esforços experimentais e promovendo reuniões de trabalho e escolas sobre esse tema. Procura-se, assim, realizar o potencial interdisciplinar de uma área que, em outros países, reúne físicos, químicos, matemáticos, engenheiros e cientistas da área de computação.

Deve-se notar, no entanto, que ainda não foi produzido no Brasil um condensado de Bose-Einstein, e inexistem pesquisas experimentais sobre armadilhas de íons, redes cristalinas óticas e *chips* atômicos. Esses temas de fronteira atraem a atenção de grupos de pesquisa em vários países pelo seu grande potencial tanto no âmbito da pesquisa básica quanto no das aplicações. Deveriam ser incentivados em nosso país, através de uma política seletiva de formação de pessoal, bem como estágios de pesquisadores experientes em grupos de alto nível, envolvidos com esses temas de pesquisa.

O Instituto do Milênio de Informação Quântica, criado no final de 2001, reúne diversos grupos, apoiando esforços experimentais e promovendo reuniões de trabalho e escolas sobre esse tema

Ainda não foi produzido no Brasil um condensado de Bose-Einstein, e inexistem pesquisas experimentais sobre armadilhas de íons, redes cristalinas óticas e *chips* atômicos

A complementação e a modernização dos equipamentos dos laboratórios existentes, bem como a formação de novos grupos, aumentará a competitividade do Brasil nessa área, na qual a inovação tecnológica é ainda incipiente, o que abre a possibilidade de ocupação de nichos por parte de países que se iniciam nesse tipo de atividade.

## 2.4. MATERIAIS NOVOS E AVANÇADOS

A ciência e a tecnologia dos materiais tiveram enorme desenvolvimento no século passado, com importantes resultados na sociedade. Muitas tecnologias que marcaram esse século se baseiam em propriedades especiais de materiais, sejam materiais já conhecidos, sejam novos materiais desenvolvidos no decorrer daquele século. Nas últimas três décadas, o

**Nas últimas três décadas, o desenvolvimento de materiais especiais atingiu uma dinâmica efervescente devido à combinação de três fatores: rápido desenvolvimento de computadores; criação de novas técnicas de síntese; e criação de técnicas de visualização e manipulação em nível atômico**

desenvolvimento de materiais especiais atingiu uma dinâmica efervescente devido à combinação de três fatores.

Um deles foi o rápido desenvolvimento dos computadores baseados em *chips* de silício, o material mais investigado no século passado. Esse desenvolvimento contribuiu decisivamente para que muitas propriedades dos materiais possam ser hoje explicadas com base unicamente em sua composição e estrutura – cristalina ou não – através de cálculos computacionais. Tornou também possível antever propriedades de novos materiais apenas imaginados ou arquitetados. Esses cálculos computacionais se baseiam na mecânica quântica e em métodos de aproximação poderosos para cálculos de átomos, moléculas e sólidos, desenvolvidos principalmente por físicos. Destaca-se aqui o trabalho do físico Walter Kohn, que por ele ganhou o prêmio Nobel de química em 1998.

O segundo fator de alto impacto no desenvolvimento de novos materiais – principalmente, de heteroestruturas de multicamadas e de outros compósitos – foi a criação de novas técnicas de síntese em condições de ultra-alto vácuo, como epitaxia por feixe molecular – MBE, na sigla inglesa –, deposição química de vapor metal-orgânico – MOCVD, na sigla inglesa –

e *sputtering*. Essas técnicas, principalmente a de MBE, permitem o crescimento de multicamadas – cristalinas ou não – com controle atômico na espessura dos filmes e também a produção de sistemas antes totalmente imprevisíveis, pelo fenômeno de auto-organização.

Alguns dos mais importantes avanços na área de materiais se inserem na nanociência e nanotecnologia

O terceiro fator determinante na nova dinâmica adquirida pelo desenvolvimento de novos materiais foi a criação de técnicas de visualização e de manipulação de superfícies sólidas em nível atômico, no conjunto denominadas microscopia por varredura de sonda, da microscopia eletrônica de transmissão com resolução atômica e de um diversificado elenco de técnicas avançadas de caracterização, tanto do interior quanto da superfície dos materiais. Alguns dos mais importantes avanços na área de materiais se inserem na nanociência e nanotecnologia (ver ‘Nanociência e Nanotecnologia’)

### 2.4.1. Desenvolvimento da física da matéria condensada

A descrição de processos e fenômenos físicos da matéria macroscópica se deu paralelamente ao desenvolvimento da formulação das leis básicas da física. De fato, o primeiro passo nessa direção ocorreu com a teoria cinética dos gases, culminando com os trabalhos do escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e do austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) no final do século 19. Três questões fundamentais foram abordadas: a descrição microscópica de um sistema macroscópico; a probabilidade como conceito inerente aos processos físicos; e a formulação de uma equação cinética com propriedade explícita de irreversibilidade. O norte-americano Josiah Willard Gibbs (1839-1903) generalizou essas idéias para fundamentar a mecânica estatística de equilíbrio. No cerne dessas questões, está o conceito de entropia e do equilíbrio de fases da matéria.

A irreversibilidade da equação de Boltzmann coloca, pela primeira vez, o problema da seta do tempo, em contradição com a reversibilidade da mecânica newtoniana

Com base na teoria molecular, o holandês Johannes van der Waals (1837-1923) apresentou a primeira teoria da transição líquido-gás, incluindo tanto a equação de estado e o ponto crítico quanto a lei de estados correspon-



dentos, o que lhe valeu o prêmio Nobel de física de 1910. Esses progressos possibilitaram ao escocês James Dewar (1842-1923) e ao holandês Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926) determinarem o ponto de liquefação de gases. Este último foi laureado com o Nobel de física de 1913 pela liquefação do hélio a 4,2 K e a descoberta da supercondutividade no mercúrio, inaugurando, com isso, a física de baixas temperaturas. As idéias de Boltzmann também influenciaram os alemães Max Planck (1858-1947) e Albert Einstein (1879-1955) nos primórdios da mecânica quântica, respectivamente na descrição da radiação do corpo negro – de onde nasceu o conceito de quantum de energia – e do calor específico dos sólidos em baixas temperaturas, com que Einstein inaugurou, em 1906, a teoria quântica do estado sólido.

As idéias de Boltzmann influenciaram Planck e Einstein, respectivamente nas teorias da radiação do corpo negro e do calor específico dos sólidos em baixas temperaturas

A mecânica quântica trouxe um elemento essencial para o entendimento da física da matéria condensada: o comportamento coletivo distinto dos férmions e dos bósons. Os primeiros – assim denominados em homenagem ao italiano Enrico Fermi (1901-1954), Nobel de física em 1938 – são partículas que obedecem ao princípio de exclusão de Pauli, segundo o qual duas delas, em um dado sistema, não podem ocupar o mesmo estado quântico. Os elétrons são os férmions mais importantes na matéria condensada. Já os bósons – homenagem ao indiano Satyendra Nath Bose (1894-1974) – não obedecem ao princípio de Pauli e podem ser agrupados coletivamente num mesmo estado quântico, sendo o mais conhecido deles o chamado condensado de Bose-Einstein (ver ‘Manipulação quântica de átomos, moléculas e fótons’)

A baixas temperaturas, sistemas de muitos férmions ou bósons têm comportamentos característicos e muito distintos, responsáveis por vários fenômenos importantes e, até agora, apenas parcialmente entendidos. Em especial, eles podem formar os chamados líquidos de Fermi ou líquidos de Bose. O comportamento de férmions altamente correlacionados, seja no estado líquido ou no estado gasoso, apresenta desafios ainda não solucionados.

O advento da teoria quântica e a ‘busca do zero absoluto de temperatura’ tiveram grande impacto na física do século passado. Em 1938, o russo Pyotr Kapitsa (1894-1984) – Nobel de física de 1978 – descobriu a superfluidiez

do hélio-4 (um átomo de comportamento bosônico), gerando intensa atividade teórica na descrição desse fenômeno, com destaque para outro russo, Lev Landau (1908-1968), ganhador do Nobel de física de 1962; para o teuto-americano Fritz London (1900-1954) e o húngaro Laszlo Tisza, com o modelo de dois fluidos; para o norueguês Lars Onsager (1903-1976) e o norte-americano Richard Feynman (1918-1988) – estes dois últimos, respectivamente, prêmios Nobel de química (1968) e de física (1965).

Onsager e Feynman formularam a quantização dos vórtices no superfluido, observada experimentalmente, em 1961, enquanto Landau formulou uma teoria de quasi-partículas (estados coletivos de partículas correlacionadas que matematicamente podem ser manipulados como se fossem uma única partícula) apropriada para líquidos quânticos. Entretanto, a superfluidez do hélio-3 – cujo comportamento é fermiônico – só foi observada em 1972, pelos norte-americanos David Lee, Douglas Osheroff e Robert Richardson, ganhadores do Nobel de física de 1996. Por outro lado, em 1957, John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e John Robert Schrieffer – esse trio de norte-americanos recebeu o Nobel de física de 1972 – formularam a teoria que ficaria conhecida pelas iniciais de seus sobrenomes, BCS, de caráter microscópico, invocando a formação de pares de elétrons correlacionados (pares de Cooper) e explicando, com sucesso, as características da supercondutividade dos metais e das ligas metálicas.

Em particular, outro norueguês, Ivar Giaever (Nobel de física de 1973), usou o tunelamento quântico para medir a energia de ligação dos pares de Cooper previsto pela teoria BCS. Nesse contexto, o britânico Brian Josephson (Nobel de 1973) previu a existência de uma supercorrente gerada pelo tunelamento numa junção de supercondutores. As junções Josephson são largamente utilizadas em voltímetros e magnetômetros ultra-sensíveis (SQUIDS), fornecendo medidas precisas da razão  $h/e$  (constante de Planck/carga do elétron). Além disso, uma modificação da teoria de Landau para líquidos de Fermi proposta por Anthony Legget previu as propriedades básicas do hélio-3 superfluido.

A década de 1950 testemunhou também uma formulação fenomenológica de forte impacto na descrição do efeito do campo mag-

O advento da teoria quântica e a 'busca do zero absoluto de temperatura' tiveram grande impacto na física do século passado

As junções Josephson são largamente utilizadas em voltímetros e magnetômetros ultra-sensíveis

nético nos supercondutores, levando à previsão da existência de dois tipos de materiais supercondutores: tipo I e tipo II. Neste último, o campo magnético penetra no material na forma de tubos (denominados vórtices) que formam uma rede triangular – mais tarde, denominada rede de Abrikosov. Essa teoria é denominada Ginzburg-Landau. Os russos Vitaly Ginsburg e Alexei Abrikosov dividiram com o inglês Legget o Nobel de 2003.

Surpreendentemente, em 1986, o suíço Karl Müller e o alemão Georg Bednorz sintetizaram uma nova classe de cerâmicas de óxido de cobre supercondutoras em temperaturas acima de 30 K, limite teórico da teoria BCS. No ano seguinte, foram sintetizadas cerâmicas com temperatura crítica

O mecanismo da supercondutividade em altas temperaturas é um dos importantes desafios para a física deste século

acima da temperatura de liquefação do nitrogênio. Nesse mesmo ano, Bednorz e Müller receberam o Nobel de física, iniciando uma revolução na pesquisa de novos materiais supercon-

dutores (ver ‘Cerâmicas supercondutoras’). A identificação do mecanismo microscópico responsável pela supercondutividade de alta temperatura é um dos importantes desafios da física contemporânea.

A mecânica quântica é a base da teoria eletrônica de metais, isolantes e semicondutores. Desde a invenção do transistor, em 1947, pelos norte-americanos William Shockley (1910-1989), Bardeen e Walter Brattain (1902-1987), que receberam por esse trabalho o Nobel de física de 1956, os dispositivos com base em materiais semicondutores protagonizaram uma revolução científica e tecnológica. Em 1958, o japonês Leo Esaki – que dividiu o Nobel de 1973 com Giaever e Josephson – usou o efeito de tunelamento quântico para explicar as características anômalas observadas na curva corrente-voltagem em junções semicondutoras (diodo túnel).

Posteriormente, o desenvolvimento de heteroestruturas complexas (ver ‘A tecnologia do silício’) proporcionou a descoberta, em 1980, do efeito Hall quântico pelo alemão Klaus von Klitzing (Nobel de física de 1985), o qual consiste na quantização da resistência Hall, ou seja, a resistência elétrica gerada por um campo magnético na direção perpendicular a ele e à corrente. O efeito Hall quântico é resultante de uma seqüência de transições localização-deslocalização nos diversos níveis de Landau (níveis quânticos de um gás de elétrons bidimensional na presença de campo magnético). Essa é uma das manifestações mais

notáveis da transição metal-isolante proposta em 1958 pelo norte-americano Philip Anderson (Nobel de física de 1977), com localização eletrônica por efeito de desordem.

Outra notável descoberta foi o efeito Hall quântico fracionário – em que a resistência Hall torna-se quantizada em números fracionários racionais –, em 1982, pelo alemão Horst Störmer e o sino-americano Daniel Tsui, ganhadores do Nobel de física de 1998. A interpretação desse fenômeno foi feita pelo norte-americano Robert Laughlin, que dividiu o Nobel de 1998 com os dois primeiros (ver ‘Nanociência e Nanotecnologia’). A interpretação de Laughlin prevê a existência, no gás de elétrons, de quasi-partículas cuja carga é uma fração da carga do elétron, fenômeno já comprovado experimentalmente. O aparecimento de cargas fracionárias tem estimulado intensa atividade na física de elétrons fortemente correlacionados, e sua explicação é um dos grandes desafios da física atual.

O fenômeno do magnetismo permeia grande parte da física, tanto na escala microscópica (partículas, átomos e moléculas) quanto na macroscópica. De fato – seja na forma de dopagem por impurezas magnéticas, seja em materiais que exibem várias formas de ordenamento magnético –, os sistemas magnéticos têm oferecido uma diversidade de desafios científicos e aplicações tecnológicas (ver ‘Materiais magnéticos’, ‘Spintrônica’, ‘Nanoestruturas com magneto-resistência gigante’ e ‘Partículas magnéticas porosas’).

Deve-se aos franceses Pierre Curie (1859-1906) – Nobel de física de 1903 – e Pierre Weiss (1865-1940), bem como ao norte-americano John van Vleck (1899-1980) – Nobel de física de 1977 –, os estudos pioneiros sobre o ferromagnetismo e paramagnetismo, e a Louis Néel (1904-2000) – Nobel de física de 1970 – as hipóteses dos ordenamentos antiferro e ferromagnéticos e dos domínios magnéticos, confirmados experimentalmente por espalhamento de nêutrons a partir de 1949 pelo canadense Bertram Brockhouse (1918-2003) e o norte-americano Clifford Shull (1915-2001), prêmios Nobel de física de 1994. Essa dupla desenvolveu trabalhos pioneiros no uso dessa técnica em física da matéria condensada.

No caso dos metais, destaca-se a contribuição do britânico Nevill Mott (1905-1996), que dividiu o Nobel de 1977 com

O aparecimento de cargas fracionárias tem estimulado intensa atividade na física de elétrons fortemente correlacionados, e sua explicação é um dos grandes desafios da física atual

Anderson e van Vleck. Mott sugeriu que a repulsão coulombiana é responsável pela transição metal-isolante em diversos materiais, inclusive materiais magnéticos. Nesse contexto, uma transição metal-isolante pode ser induzida por dopagem ou por pressão.

Outro desenvolvimento fundamental na área de física da matéria condensada e física estatística foram os conceitos de leis de escala e classes de universalidade, particularmente no contexto de transições de fase e fenômenos críticos e multicríticos. A introdução, em 1971, do método do grupo de renormalização (grupo das operações em que a escala de visualização do sistema é sucessivamente ampliada), pelo norte-americano Kenneth Wilson (Nobel de física de 1982), permitiu a formalização das idéias de escala

A teoria de escala e o grupo de renormalização permitiram a descrição de inúmeros sistemas e fenômenos da matéria condensada, estabelecendo uma estreita ligação entre a teoria quântica de campos e a física estatística

apresentadas ao longo da década de 1960, culminando com o conceito de universalidade.

As idéias do grupo de renormalização tiveram suas origens na teoria quântica de campos, permitindo uma estreita ligação entre os desenvolvimentos teóricos

dessa área e aqueles da física estatística e matéria condensada. Além disso, ressaltamos as novas abordagens dos fenômenos não lineares, a geometria fractal e o conceito de auto-similaridade (ver ‘Sistemas complexos’). O grupo de renormalização tornou-se uma ferramenta básica na descrição de sistemas e fenômenos da matéria condensada, por exemplo sistemas magnéticos, sistemas desordenados, sistemas fortemente correlacionados. Em particular, a utilização dessa abordagem conceitual e técnica permitiu ao francês Pierre-Gilles de Gennes (Nobel de física de 1991) a descrição de sistemas da chamada matéria condensada macia (*soft condensed matter*), como os sistemas poliméricos (ver ‘Materiais poliméricos’), cristais líquidos, microemulsões e fluidos complexos.

### 2.4.2. A tecnologia do silício

A informação envolve dois processos cujo avanço vem ocorrendo simultaneamente e se reforçando mutuamente: o processamento da informação (computação) e sua transmissão (comunicação). O passo seminal

para a computação foi a descoberta do efeito transistor, em cristais semicondutores dopados de forma não homogênea, em 1947 pelos físicos norte-americanos John Bardeen (1908-1991), Walter Bratain (1902-1987) e o anglo-americano William Shockley (1910-1989), que, por isso, ganharam o Nobel de física de 1956.

Vários tipos de transistores e de outros dispositivos semicondutores similares foram desenvolvidos desde então. Entre eles, o mais importante para a computação é o transistor por efeito de campo – **FET**, na sigla inglesa –, inventado em 1959. No início da década de 1960, Jack Kilby, um engenheiro elétrico norte-americano, desenvolveu os primeiros circuitos integrados, circuitos contendo grande quantidade de FETs e outros dispositivos fabricados em uma pequena pastilha de cristal de silício, e liderou a construção do primeiro computador com base em circuitos integrados.

Em 1967, foi desenvolvido o primeiro sistema de memória tipo DRAM – sigla inglesa para memória dinâmica de acesso aleatório – e, em 1971, o primeiro microprocessador, os dois tipos de circuitos integrados que compõem os modernos computadores.

Desde então, como notou o físico e empresário norte-americano Gordon Moore, o número de transistores contidos em um circuito integrado

tem duplicado a cada 18 meses, fato empírico conhecido como lei de Moore. Nesse período, as heteroestruturas metal-óxido-semicondutor (MOS) – em que o semicondutor é um cristal de silício e, por isso, o sistema é denominado Si-MOS – têm olímpicamente se mantido como a base tanto dos microprocessadores quanto das memórias DRAM. A indústria de semicondutores, envolvida na síntese dos semicondutores e na fabricação dos dispositivos microeletrônicos, tem um faturamento global de US\$ 200 bilhões, e a indústria eletrônica como um todo, que envolve a indústria de semicondutores e a produção dos equipamentos, fatura globalmente cerca de US\$1 trilhão.

Até o momento, o óxido envolvido nos sistemas Si-MOS é o próprio óxido de silício, ( $\text{SiO}_2$ ). No contínuo processo de miniaturização, a espessura da camada de  $\text{SiO}_2$  vem se reduzindo e, hoje, é de 1,3 nanômetro (1,3 bilionésimo de metro). Para espessuras menores do cerca de 1,0 nm, há



**A indústria de dispositivos semicondutores fatura US\$200 bilhões/ano e alavanca uma indústria eletrônica que fatura US\$ 1 trilhão**

Os semicondutores da família do arseneto de gálio desempenham na optoeletrônica papel equivalente ao que o silício tem desempenhado na microeletrônica

fuga significativa de corrente entre o metal e o semicondutor por tunelamento quântico através do óxido. Por isso, há intenso esforço

no sentido de se substituir o  $\text{SiO}_2$  por um dielétrico com alto valor para a constante dielétrica, o que permitirá reduzir a espessura do filme sem que as correntes de tunelamento assumam um caráter deletério. Esse é o maior desafio científico atualmente envolvido na tecnologia dos sistemas Si-MOS.

Os semicondutores da família do arseneto de gálio (GaAs) desempenham na optoeletrônica papel equivalente ao que o silício tem desempenhado na microeletrônica. Com esses materiais, se produzem os diodos emissores de luz – LED na sigla inglesa –, que são a fonte dos lasers de semicondutores. Em 1969, o físico russo Zhores Alferov produziu o primeiro laser de semicondutor capaz de operar em regime contínuo à temperatura ambiente, baseado numa heteroestrutura do tipo AlGaAs/GaAs, camadas superpostas de arseneto de gálio e arseneto de gálio-alumínio.

Em 2000, Kilby, Alferov e o físico teórico alemão Herbert Kroemer ganharam o prêmio Nobel de física por seus trabalhos na tecnologia da informação. Com as heteroestruturas AlGaAs/GaAs, também se constroem os mais rápidos transistores já conhecidos, mas a tecnologia do Si-MOS – MOS tendo o silício como semicondutor – adquiriu um avanço tal que sua substituição por outra alternativa não foi economicamente viável.



### 2.4.3. Fibras ópticas

Em 1977, após uma década de pesquisas, foi instalado o primeiro sistema de telecomunicações por fibra óptica, uma linha 2,5 km, e, já em 1983, foi instalado o primeiro cabo submarino com esse material. Na telecomunicação por fibra óptica, o sinal é carregado pela luz modulada de um laser de semicondutor, canalizada – pelo fenômeno da reflexão interna total – em uma fina fibra de quartzo vítreo de altíssima pureza. Os lasers são baseados na heteroestrutura InGaAsP/GaAs (arseneto de gálio e arsênio-fosfeto de gálio-alumínio), cujo comprimento de onda corresponde ao mínimo da absorção da fibra.



A fibra óptica tem extraordinária transparência, e a luz percorre centenas de quilômetros antes que sua atenuação de intensidade requeira reamplificação. Inicialmente, essa reamplificação era feita com lasers similares aos usados na geração do sinal, o que gerava complexos problemas de confiabilidade e de manutenção. Posteriormente, descobriu-se que fibras ópticas dopadas com érbio tinham o efeito de amplificar a luz do sinal sem alterações em suas características.

A introdução dos amplificadores baseados em fibras dopadas deu um enorme impulso às comunicações ópticas.

Cerca de 20 milhões de quilômetros de fibras ópticas são instalados anualmente, e a fabricação de fibras atingiu US\$ 30 bilhões em 2003

As telecomunicações ópticas possibilitaram um salto espetacular – em capacidade e diminuição de custo – na telefonia e noutros tipos de comunicações. No intervalo de 2000 a 2015, serão instalados no mundo cerca de 700 milhões de telefones, o mesmo número instalado no século passado. Nesse mesmo período, serão instalados 300 milhões de conexões de TV a cabo, mais que as existentes atualmente. Cerca de 20 milhões de quilômetros de fibras ópticas são instalados anualmente, e a fabricação de fibras atingiu US\$ 30 bilhões em 2003. Além do mais, a taxa de informação por fibra tem crescido espetacularmente, duplicando a cada nove meses, e já entramos na faixa de terabytes ( $10^{12}$  bytes) por segundo (Tbps). Tudo isso tem também impulsionado o crescimento da *World Wide Web*.

Deve-se salientar que o Brasil chegou a desenvolver, até nível de avanço comparável com o estado da arte na época, a tecnologia das fibras ópticas, mas decidiu, no âmbito do Governo Federal, optar pelo uso de fibras importadas para sua telefonia, na época totalmente controlada por empresas estatais.

Hoje, na área das comunicações ópticas, os esforços estão voltados para manter a evolução na taxa de transmissão de informação por fibra, uma vez que essa taxa já está entrando na faixa do infravermelho

Hoje, na área das comunicações ópticas, os esforços estão voltados para manter a evolução na taxa de transmissão de informação por fibra. Uma vez que essa taxa já está entrando na faixa do infravermelho, importantes problemas e desafios científicos estão em nosso caminho.

Na década de 1990, o engenheiro japonês Shuji Nakamura iniciou e liderou uma nova revolução no uso de semicondutores para a produção de

luz convencional e luz laser. Até então, os LEDs e lasers baseados em semicondutores apenas emitiam luz na região do vermelho e infravermelho. Nakamura produziu os primeiros LEDs e lasers na região do azul e verde, baseados em heteroestruturas do tipo AlGaAs/GaN (nitreto de gálio e arseneto de gálio-alumínio) e InGaAs/GaN (nitreto de gálio e arseneto de gálio-índio). Acrescentando uma cobertura fosforescente nos LEDs azuis, produziu luz branca de origem semicondutora.

Hoje, a faixa de emissão dos LEDs baseados no GaN já entrou na região do violeta e ultravioleta. As aplicações dessas novas fontes de luz são diversas, e algumas certamente terão grande impacto econômico. Por um lado,

**LEDs brancos deverão substituir as lâmpadas incandescentes, com enorme aumento de durabilidade e de eficiência; a economia de energia elétrica, em escala global, será enorme**

os lasers azuis já permitem a leitura de CDs com capacidade três vezes maior que os tradicionais, lidos com lasers de AlGaAs/GaAs. Por outro, os LEDs brancos, em futuro próximo, deverão substituir as lâmpadas incandescentes, in-

ventadas pelo norte-americano Thomas Edison (1847-1931) em 1874, com enorme aumento de durabilidade e de eficiência das lâmpadas. A economia de energia elétrica, em escala global, será enorme. Essas lâmpadas já são usadas em escala limitada, inclusive em faróis de automóveis. Como é comum na área de novas tecnologias, o grande desafio aqui é o de baixar o custo de produção de luminárias baseadas em LEDs azuis.

#### 2.4.4. Materiais magnéticos

Materiais magnéticos estão presentes em inúmeras áreas da vida moderna, dos motores elétricos aos discos de computador, passando por carros, televisores e cartões de crédito. Sua importância e complexidade fazem com que as pesquisas sobre magnetismo sejam intensas, com grandes avanços nas últimas décadas. Forças magnéticas fazem funcionar motores e alto-falantes usados para converter energia elétrica em movimento e som. São ainda responsáveis pelas imagens que aparecem nas telas da televisão ou do computador.

O magnetismo permite também visualizar o interior do corpo – através das imagens por ressonância magnética –, faz levitar trens de alta velocidade.

de, permite captar sinais eletromagnéticos codificando sons e imagens para o rádio ou a TV, possibilita a gravação e a leitura de informações em fitas de áudio e vídeo, discos de computador, cartões de banco e cartões de crédito. Atuam também em geradores e transformadores para fornecer eletricidade para casas e indústrias.

Um exemplo concreto do enorme progresso da tecnologia de materiais magnéticos foi a recente descoberta, em 1983, de novos ímãs – chamados magnetos ‘duros’ ou ‘permanentes’ – de neodímio-ferro-boro, com vezes mais potentes que os ímãs de aço-carbono até então usados. Com isso, centenas de aplicações tecnológicas – em especial motores e alto-falantes – tiveram drástica redução de peso e tamanho e grande aumento na eficiência. Por outro lado, melhorias em materiais magnéticos ‘doces’ ou ‘moles’ – de fácil magnetização e desmagnetização –, muito usados em transformadores, permitem economizar bilhões de dólares todos os anos ao diminuir perdas energéticas na distribuição de eletricidade.

O desafio nesse campo é a obtenção de materiais magnéticos extremamente moles, bem como daqueles com o máximo valor da magnetização permanente.

Enorme progresso foi obtido com a descoberta recente dos chamados magnetos ‘duros’ ou ‘permanentes’, com vezes mais potentes que os ímãs de aço-carbono até então usados

### 2.4.5. Materiais poliméricos

A introdução dos materiais poliméricos – assim como os cerâmicos que serão descritos mais abaixo – com ativos em aplicações nas áreas de eletrônica, optoeletrônica e fotônica, é bem mais recente do que a dos semicondutores mais tradicionais. Abaixo, faremos uma breve introdução desses materiais e do atual estado da arte de suas pesquisas e aplicações.

A palavra polímero é de origem grega e significa ‘muitos meros’, indicando ser uma macromolécula composta por um número grande de um determinado segmento molecular, que é denominado de unidade monomérica. Podemos usar o polietileno como exemplo de um polímero orgânico, o qual tem como fórmula estrutural  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ . O índice  $n$  é denominado o grau de polimerização da macromolécula e indica o número de vezes que a unidade monomérica  $-(\text{CH}_2)-$  se repete ao longo da cadeia.

A invenção do náilon revolucionou a indústria têxtil e, imediatamente, propagou a penetração dos plásticos em outras áreas da atividade industrial

A natureza é pródiga na síntese de polímeros orgânicos, os quais são essenciais para a determinação e o controle de funções da vida dos ani-

mais e vegetais. O ácido desoxirribonucléico (DNA), a molécula essencial de todos os seres vivos, é o melhor exemplo dos polímeros naturais, mas as proteínas, a celulose etc. compõem o grande espectro do mundo macromolecular polimérico na natureza.

A síntese de moléculas poliméricas tem início na segunda década do século passado, quando o químico alemão Hermann Staudinger (1881-1965), ganhador do Nobel de 1953, estabeleceu o conceito de macromolécula, na época duramente contestada, porque os químicos acreditavam num limite de agregação para os elementos químicos e, portanto, como esdrúxula a hipótese das moléculas gigantes. No entanto, Staudinger conseguiu mostrar que estava certo e, já nas décadas de 1920 e 1930, químicos da envergadura do norte-americano Wallace Carothers (1896-1937) realizavam as primeiras sínteses de polímeros orgânicos sintéticos.

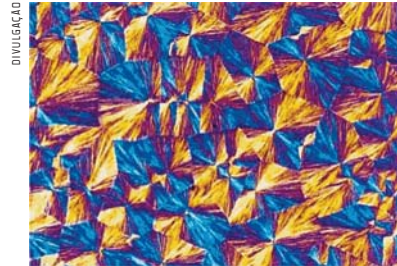


A invenção do náilon por Carothers revolucionou a indústria têxtil e, imediatamente, propagou a penetração dos plásticos em outras áreas da atividade industrial. As indústrias de plásticos, de elastômeros e, na seqüência, de pigmentos (tintas e resinas) sofreram uma explosão, sobretudo logo depois da Segunda Guerra.

No início da década de 1950, os trabalhos do químico alemão Karl Ziegler (1898-1973) e do italiano Giulio Natta (1903-1979), ganhadores do Nobel de 1963, foram decisivos no avanço dos processos de síntese em grande quantidade de moléculas poliméricas.

A rigor, os materiais poliméricos – em sua maioria sintéticos – não podem ser classificados nem como sistemas sólidos, nem como líquidos. Eles, em verdade, são uma combinação desses dois estados da matéria. Podemos dizer que a estrutura de um material polimérico é formada por microrregiões sólidas (pequenos cristais) embebidas numa matriz líquida (desordenada). As macromoléculas das regiões amorfas entrelaçam-se fisicamente, conferindo ao material um estado líquido de elevada viscosidade; os pequenos cristais têm, em geral, estruturas complexas, formadas a partir de lamelas onde as macromoléculas se organizam numa ordem quase perfeita e, assim, definindo uma célula unitária.

Essas lamelas chegam a ter dimensões de micrômetros de comprimento, mas sua espessura não ultrapassa a escala nanométrica. As lamelas podem se agrupar radialmente formando estruturas esféricas, denominadas de esferulitas (figura), ou o sistema polimérico pode ainda ter uma morfologia fibrilar. Devido a essa complexa morfologia, esses materiais apresentam interessantes propriedades termomecânicas que lhes conferem versatilidade e facilidades de processamento.



Micrografia óptica polarizada de uma estrutura esferulítica de um copolímero de 90% de óxido de polietileno e 10% de estireno/hidroxiestireno

#### 2.4.6. Polímeros aplicados a dispositivos eletromecânicos

Membranas de determinados materiais poliméricos, como o poli(tetrafluoretileno), são usados em dispositivos eletroacústicos, pois combinam suas propriedades mecânicas com as de armazenamento de cargas elétricas por períodos de tempo longos. Esses materiais são denominados eletretos.

Hoje, novos polímeros – como os que apresentam microporos – têm uma polarização de volume intensa e elevadas atividades piezelétricas. Polarização em escala molecular tem sido

**Novos polímeros são muito usados nas indústrias automobilística e aeroespacial e aplicados como sensores na medicina e na agricultura**

tema de estudos, como o caso de certos polímeros fluorados. Estes são ferroelétricos e, em conseqüência, exibem atividades piezelétricas e pirolétricas. Esses dispositivos são aplicados como detectores de vibração e muito usados nas indústrias automobilística e aeroespacial. São também aplicados como sensores na medicina e na agricultura.

#### 2.4.7. Polímeros eletrônicos

No final dos da década de 1970, os ganhadores do Nobel de química de 2000, o neozelandês Alan MacDiarmid, o norte-americano Alan Heeger e

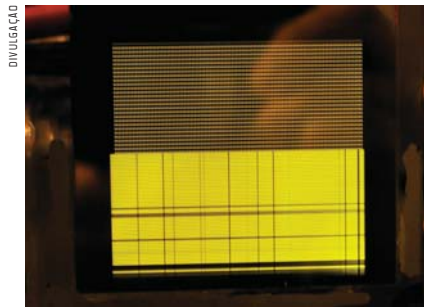
o japonês Hideki Shirakawa, descobriram que, sob dopagem química, o polímero conjugado poliacetileno, de estrutura química  $(-CH-)_n$ , tinha sua condutividade aumentada em cerca de 13 ordens de grandeza, ou seja, em dez trilhões de vezes. Portanto, esse plástico, que naturalmente é um isolante, sob dopagem, vira um excelente condutor. Com essa descoberta,

No final da década de 1970, descobriu-se que plásticos, naturalmente isolantes, podem virar excelentes condutores de eletricidade quando dopados quimicamente

nasceu uma nova e extensa área de pesquisa em materiais, sobretudo com a descoberta de outros polímeros com propriedades semelhantes à do poliacetileno, aí incluídos os semicondutores orgânicos.

Um nome mais geral para esses novos polímeros pode ser o de plásticos eletrônicos. Eles também são processados para exibirem propriedades semicondutoras. Hoje, já é uma realidade a aplicação desses sistemas como elementos ativos em diodos, transistores e dispositivos semelhantes. Desse dispositivos, derivam-se aplicações importantes como as dos diodos

emissores de luz orgânicos (OLEDs), que, além de servirem como dispositivos sinalizadores, são consideradas as unidades luminescentes que compõem o amplo mercado de telas ativas flexíveis (*flexible displays*), podendo ser usadas em telas pequenas para telefones celulares e calculadoras a telas planas de computadores e TVs. Os polímeros eletrônicos têm sido também aplicados na área de conversão fotovoltaica e de transistores orgânicos de dimensões moleculares.



As possibilidades de aplicações desses dispositivos à medicina e à agricultura são enormes e ainda pouco exploradas. Há muita pesquisa em desenvolvimento na área de sensores e detectores poliméricos – de radiação em geral e de gases –, e protótipos de sucesso já se tornam realidade.

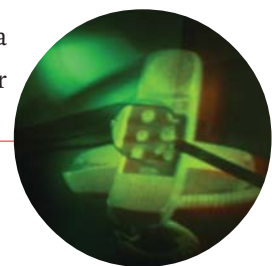
No Brasil, têm surgido trabalhos bem sucedidos, como é o caso da língua eletrônica e do nariz eletrônico. Além disso, esses materiais, devido a seu processamento relativamente simples, podem ter sua estrutura molecular orientada por processos de fabricação de filmes finos, como os de automontagem e de Langmuir-Blodgett. Nos sistemas luminescentes, a polarização da luz emitida dos OLEDs depende da orientação das moléculas no filme polimérico. Dispositivos como esses podem enviar, juntamente

com a luz emitida, códigos associados à morfologia molecular. Mais recentemente, iniciam-se investigações com sistemas nanométricos orgânicos de propriedades eletrônicas e optoeletrônicas.

#### 2.4.8. Polímeros fotônicos

Muitas moléculas conjugadas apresentam efeitos de óptica não linear e, com isso, podem ser aplicadas a dispositivos fotônicos e sistemas capazes de duplicar a frequência de um laser – criando lasers de ultravioleta a partir daqueles operando no visível.

A área de filmes finos proporciona ainda a confecção com sucesso de grades de relevo em superfícies poliméricas, em que o comprimento de onda das estruturas de canais fica em torno de 1 micrômetro e com profundidades não superiores a 200 nanômetros. Essas estruturas podem auxiliar na orientação de outros sistemas orgânicos – e mesmo inorgânicos – e servir de base a sistemas geradores de imagens holográficas.



#### 2.4.9. Sistemas supramoleculares

Devido à sua versatilidade química e às suas propriedades termomecânicas, os polímeros podem ser combinados de maneiras distintas. Por exemplo, reunindo diferentes unidades monoméricas numa só cadeia e formando os copolímeros. Ou combinando, em um mesmo material, moléculas poliméricas de diferentes origens – mas compatíveis química e termodinamicamente –, formando a chamada blenda polimérica. Esses materiais podem ainda se compor:

- i) com elementos metálicos, dando origem aos polímeros complexados com metais;
- ii) em forma iônica, formando os denominados ionômeros;
- iii) e, por fim, se compor com materiais cerâmicos, criando compósitos.

A todos esses sistemas, extremamente complexos, é dado o nome geral de sistemas supramoleculares.

Devido à sua versatilidade química e às suas propriedades termomecânicas, os polímeros podem ser combinados de várias maneiras



O mercado para polímeros eletrônicos pode chegar, em 2008, a US\$ 4,5 bilhões nos Estados Unidos

A ciência da copolimerização – seja em bloco, seja aleatória, seja ramificada – é conhecida há muito tempo. Hoje, ela desenvolve-se com rapidez e suas aplicações tornam-se cada vez mais

sofisticadas. Muitos sistemas poliméricos nanoestruturados, ainda em fase de pesquisa, mostram a excepcional propriedade de auto-organização quando depositados em substratos de rugosidade atômica – lâminas de silício, de mica etc.

A combinação das propriedades eletrônicas com a variedade de possíveis sistemas supramoleculares coloca os sistemas poliméricos como elementos de vanguarda na disputa da eletrônica molecular e da nanoeletrônica. Insere-se nesse campo a investigação de polímeros naturais, incluindo estudos eletrônicos do DNA, e a pesquisa em uma nova geração de sistemas integrados de altíssima densidade.

A título de ilustração, ficam registradas duas pesquisas sobre a demanda para polímeros eletrônicos nos Estados Unidos. Segundo pesquisa de mercado da empresa Freedomia Goup Inc., essa demanda vem crescendo 6,4 % anualmente. Isso projeta um mercado de cerca de U\$ 2,5 bilhões para 2010. Já a empresa *Advanced Packaging* prevê expansão anual de 13,3 % ao ano, com um movimento de U\$ 4,5 bilhões já em 2008.

#### 2.4.10. Materiais cerâmicos

As argilas são materiais de origem inorgânica tradicionalmente classificados como não metálicos. Apresentam estruturas cristalinas, inclusive na

natureza, e são formados por elementos metálicos e não-metálicos, como o óxido de cálcio (CaO), o nitreto de silício ( $\text{Si N}_{\frac{3}{4}}$ ), a alumina ( $\text{Al O}_{\frac{2}{3}}$ ) etc.

Hoje, o mercado para materiais cerâmicos é estimado em mais de U\$ 35 bilhões nos Estados Unidos

Do ponto de vista de sua microestrutura, esses materiais podem ser inteiramente vítreos (estrutura amorfa), inteiramente cristalinos ou ainda uma combinação vítreo-cristalina.

Suas propriedades físicas e químicas são muito variadas, o que lhes confere uma gama enorme de aplicações. Em geral, os materiais cerâmicos exibem as seguintes características: são duros, quebradiços, refratários, isolantes térmicos, isolantes elétricos, não magnéticos, resistentes à oxidação, qui-



NATIONAL GALLERY OF ARTS

micamente estáveis e pouco resistentes a choques térmicos. Devido a essas propriedades, eles são usados num amplo espectro de aplicações.

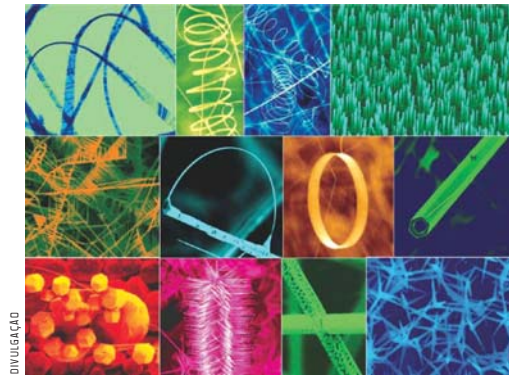
Em 1974, a indústria norte-americana de cerâmicas movimentava cerca de U\$ 20 milhões. Hoje, esse mercado é estimado em mais de U\$ 35 bilhões. Os materiais cerâmicos têm amplo uso na construção civil, na iluminação elétrica, na indústria eletroeletrônica, na área médica, no meio ambiente, em comunicações etc.

### 2.4.11. Cerâmicas avançadas

O grande desenvolvimento em pesquisa nos últimos 20 anos na área de materiais vem proporcionando a geração de novas estruturas cerâmicas e a modificação de outras, possibilitando novas aplicações na área de dispositivos eletroacústicos e piroelétricos – sistemas ferroelétricos, como o titanato de bário e derivados –, eletroópticos – como o niobato de lítio – e em capacitores de diversas características. Existe, hoje, também intensa atividade de pesquisa em cerâmicas ferroelétricas transparentes, como os niobatos de bário e chumbo (PBN) e os niobatos de magnésio e chumbo (PMN).

Outra área em franco desenvolvimento – e que gera inúmeras aplicações tecnológicas – é a das cerâmicas magnéticas, conhecidas por ferritas. As ferritas são óxidos à base de ferro, e suas aplicações mais destacadas são em dispositivos de microondas aplicados a telecomunicações, cabeças e sistemas de registros magnéticos e núcleos de transformadores de alta frequência. Na indústria mecânica, novas cerâmicas têm sido aplicadas à fabricação de motores leves e resistentes, de alto desempenho e baixos índices de poluição.

Além disso, as novas cerâmicas vêm ocupando cada vez mais espaço como materiais ativos nas áreas de eletrônica, optoeletrônica e fotônica. Apresentam propriedades semicondutoras – fotocondução, eletroluminescência, termocro-



Nanoestruturas de ZnO sintetizadas sob condições controladas por evaporação térmica a partir de pós

DIVULGAÇÃO

**Na indústria mecânica, novas cerâmicas têm sido aplicadas à fabricação de motores leves e resistentes, de alto desempenho e baixos índices de poluição**

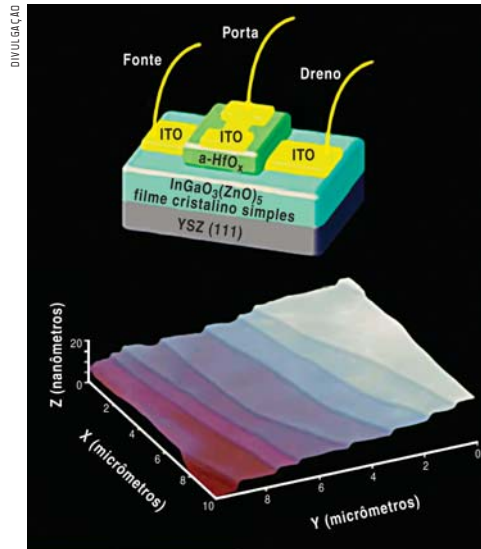


Ilustração de um dispositivo TTFT com o  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO}_5)$  de 120 nm como camada do canal e o  $\text{a-HfO}_x$  de 80 nm como porta isolante. A imagem de AFM mostra um filme de  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO}_5)$  com degraus de aproximadamente 1,9 nm cada

mismo etc. –, conjugam a transparência no visível com excelente condutividade elétrica e vêm abrindo perspectivas para se obter o fenômeno da supercondução em temperaturas elevadas (ver ‘Cerâmicas supercondutoras’).

Do ponto de vista de processamento, as cerâmicas são fabricadas por diversas técnicas e em formas variadas: de filmes finos, de fios e também em nanoestruturas – nanofitas –, nanoesferas, nanoespiras etc. (figura). Um bom exemplo é o óxido de zinco (ZnO), mas também há outros óxidos em franco desenvolvimento. O nitreto de gálio (GaN), o sulfeto de zinco (ZnS) e o CdSe (seleneto de cádmio) vêm ocupando lugar de destaque devido às suas propriedades ópticas e eletrônicas.

O ZnO, em particular, além de apresentar alta condutividade elétrica quando irradiado por luz

ultravioleta, é um material promissor à fabricação de transistores transparentes de filmes finos – TTFTs na sigla inglesa. Uma das aplicações para os TTFTs reside no controle de matrizes ativas usadas na fabricação de telas planas para computadores (*flat displays*). Óxidos de zinco podem ainda se compor com outros óxidos – como com o  $\text{InGaO}_3(\text{ZnO}_5)$  – e ser aplicados em dispositivos eletrônicos. Um dos exemplos é o TTFT com óxido de háfnio como porta isolante (figura). Outra cerâmica que deve ser citada, porque tem mostrado excelentes resultados como condutora e transparente, é o  $\text{SnO}_2$  (dióxido de estanho) dopado com antimônio (Sb).

Outras cerâmicas avançadas que contribuem – e possivelmente contribuirão – para o desenvolvimento da eletrônica e optoeletrônica dos próximos anos:

- i) o ITO (óxido de índio e estanho);
- ii) os óxidos  $\text{LaCuOS}$ ,  $\text{SnO}_2\text{-Sb}$ ,  $\text{SrCu}_2\text{O}_2$ , como excelentes óxidos condutores transparentes (TCO na sigla inglesa);
- iii) o  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  como elemento transparente ao ultravioleta profundo;
- iv) o  $\text{CuInO}_2$  como diodo pn (homojunção).

Além disso, diodos emissores de luz (LEDs) feitos de heterojunção entre ZnO tipo-n e  $\text{SrCu}_2\text{O}_2$  tipo-p já são uma realidade.

### 2.4.12. Cerâmicas supercondutoras

As cerâmicas supercondutoras foram descobertas em 1986, e, a partir de então, foi aberta uma excitante área de pesquisa: os supercondutores de temperatura de transição elevada – ou simplesmente supercondutores de alto  $T_c$ .

Um supercondutor pode transmitir uma corrente elétrica sem encontrar resistência ou sofrer perda de energia. Para muitos materiais, a resistência diminui gradualmente à medida que a temperatura decresce. Supercondutores, no entanto, são materiais que, em baixa temperatura, não apresentam resistência, mas, acima de uma temperatura de transição – denominada  $T_c$  –, sofrem um súbito aumento de resistividade e, a partir daí, se comportam como um sistema condutor normal.

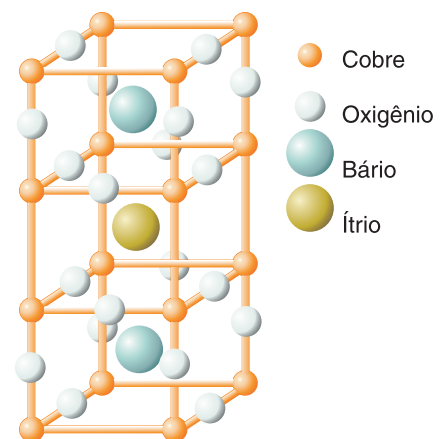
Metais e ligas metálicas foram os primeiros supercondutores a serem descobertos. Todos necessitavam de temperaturas mais baixas que 30 K para exibir a supercondutividade. Portanto, somente com o uso de hélio líquido se podia obter essa propriedade. As cerâmicas supercondutoras elevaram a temperatura de transição para acima de 93 K, permitindo o resfriamento com nitrogênio líquido, que é bem mais abundante e barato. A cerâmica  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  é o protótipo desses novos supercondutores, e sua estrutura é mostrada na figura.

Existem, hoje, famílias de compostos supercondutores de elevada  $T_c$ , destacando-se os que contêm mercúrio –  $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$ ,  $T_c = 138$  K, que é recorde até o momento –; os da família TlBa –  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , como exemplo –, os da BiSr –  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{Cu}_2\text{O}_8$  –, entre outros. Os nanotubos de carbono e de outros materiais, como de silício e de nitrato de boro, também podem exibir o fenômeno da supercondutividade.

As cerâmicas supercondutoras têm sido aplicadas tanto em sistemas geradores e armazenadores de energia quanto em *squids* (sigla inglesa para dispositivos supercondutores de interferência quântica) e têm ainda potencialidade para aplicações no campo da medici-

As cerâmicas supercondutoras elevaram a temperatura de transição para acima de 93 K, permitindo o resfriamento com nitrogênio líquido, que é bem mais abundante e barato

Celula unitária do supercondutor YBCO



A obtenção de materiais supercondutores em temperaturas próximas à do ambiente revolucionaria as áreas de energia, transporte, comunicações, por exemplo

na, sobretudo na área de imagens por ressonância magnética.

A expectativa da obtenção de materiais supercondutores em temperaturas próximas à do ambiente é enorme, pois isso revolucio-

onaria as áreas de energia, transporte, comunicações, por exemplo. Esse é um grande desafio tecnológico. Resta também o enorme desafio científico de se entender a supercondutividade dos materiais cerâmicos. A supercondutividade dos metais e metalóides é bem exposta pela teoria BCS (Bardeen, Cooper e Schrieffer), formulada em 1957, mas essa teoria não é capaz de explicar a supercondutividade das cerâmicas. Nestas, como também ocorre em alguns supercondutores metálicos, é possível alguma penetração de um campo magnético externo em sua superfície, o que dá oportunidade a estudo de novos fenômenos como os das fitas supercondutoras.

Segundo o relatório *RDHC-98 High Tech Ceramics Industry Review*, publicado pela empresa norte-americana Business Communications Company,

Em 2003, nos Estados Unidos, o mercado das cerâmicas avançadas atingiu US\$ 11 bilhões e deverá experimentar um crescimento em torno de 8% ao ano nos próximos cinco anos

o mercado das cerâmicas avançadas continuará crescendo neste século – em 2003, nos Estados Unidos, seu valor chegou a US\$ 11 bilhões –, experimentando um crescimento em torno de 8% ao ano, nos próximos cinco anos.

Os segmentos mais importantes continuam sendo o elétrico e o eletrônico, que detêm dois terços de todo o mercado das cerâmicas avançadas.



## 2.5. SISTEMAS COMPLEXOS

Sistemas complexos estão por toda parte. Eles caracterizam-se por serem compostos de vários subsistemas (ou partes), que interagem entre si de forma que o resultado para o sistema composto não pode ser inferido do comportamento das partes isoladas. Muitas vezes, cada uma dessas partes é, por si, só um sistema complexo. Seres vivos são exemplos típicos, pois neles diferentes órgãos e sistemas interagem entre si. Cada órgão, por sua vez, é composto por uma infinidade de células, que têm, elas próprias, uma rica estrutura interna.

Muitos sistemas complexos, porém, são formados por unidades simples, sem estrutura interna relevante. O surgimento de uma estrutura dinâmica complexa num sistema formado por muitas partes simples é conhecido como comportamento emergente. Esse fenômeno é muito comum na natureza e tem recebido atenção crescente. Esse conceito fundamental nos diz que o comportamento coletivo de um sistema pode ser extremamente rico, mesmo quando cada uma de suas partes parece ter um comportamento individual simples. As transições de fase sólido-líquido-vapor da água são exemplos de comportamentos emergentes.

### 2.5.1. Sobre a definição de complexidade

Não há ainda uma definição rigorosa, sem controvérsias, para decidir quando um sistema é complexo ou não. Alguns atributos, no entanto são geralmente aceitos como típicos de sistemas complexos e para uma discussão sobre o assunto é útil separar-se a definição de um sistema natural complexo da definição de um modelo matemático complexo. Pode-se dizer que um sistema natural é complexo se é descrito por um modelo matemático complicado. Conseqüentemente, dependendo daquilo que o observador requer do modelo matemático utilizado, o sistema natural pode ou não ser classificado como complexo. Um exemplo dessa situação é dado pelo norte-americano Murray Gell-Mann, prêmio Nobel de física de 1969, quando se quer decidir se, por exemplo, uma pedra é ou não um sistema complexo: para um geólogo, que a descreve pensando na sua história, ela é muito mais complexa que para um observador leigo.

Não há ainda uma definição rigorosa, sem controvérsias, para decidir quando um sistema é complexo ou não

Um modelo matemático complexo pode ser definido como um modelo no qual pequenas diferenças em seu estado ou sua configuração corrente podem fazer muita diferença em sua evolução ou classificação quanto a alguma quantidade observável ou parâmetro de ordem. Assim, para ser possível detectar pequenas diferenças entre estados ou configurações, muita informação é requerida ou, alternativamente, os estados ou as configurações do modelo requerem muitos bits de informação para serem adequadamente descritos. Observe que essa definição não é rigorosa, pois não foi precisamente definido o que significa diferenças pequenas entre estados ou



A complexidade de um sistema pode ser medida pela quantidade de informação necessária para descrevê-lo; assim, um pêndulo simples não é complexo, enquanto o cérebro humano não é um sistema simples

configurações – isto é, em relação a qual quantidade a diferença é pequena – nem o que significa ‘muita informação’ ou o que é ser ‘adequadamente descrito’.

Dessa falta de rigor na definição de complexidade, surgem as controvérsias entre diferentes autores. Além disso, essa definição não rigorosa é suficiente para classificarmos como sistemas complexos aqueles cujos modelos envolvem variáveis que requerem muitos bits de informação. De qualquer modo, a complexidade de um sistema pode ser medida pela quantidade de informação necessária para descrevê-lo. Assim, um oscilador harmônico ou um pêndulo simples não são sistemas complexos, enquanto o cérebro humano e a internet não são sistemas simples.

Exemplos de sistemas complexos podem ser encontrados em várias áreas da ciência. Na física, os sistemas de muitos corpos, os sistemas termodinâmicos fora do equilíbrio e os sistemas granulares são alguns exemplos; na química, temos sistemas de reação e difusão e colóides; na biologia, os organismos propriamente ditos, com seus diversos níveis de interação e seus subsistemas, como o neural e o circulatório; nas ciências sociais, temos governos, famílias e hospitais; nas áreas tecnológicas, os aviões, computadores e as redes de telefonia, entre outros exemplos.

## 2.5.2. Ordem e desordem

Uma das características fundamentais dos sistemas complexos é a sua capacidade de auto-organização, isto é, de criação espontânea de ordem a partir da desordem. Auto-organização é basicamente um processo de evolução no qual o desenvolvimento de estruturas novas e complexas acontece no sistema tanto por conta das interações entre suas partes quanto por

influência do ambiente onde ele se insere. De fato, em um universo fora do equilíbrio, o surgimento e o posterior crescimento de uma ordem local fazem parte natural da dinâmica do sistema. A construção de uma teoria estatística para sistemas longe do equilíbrio – capaz de lidar e classificar o surgimento da ordem a partir de estados estocásticos – é um dos grandes

Galileu Galilei  
e o pêndulo





desafios da ciência. As bases teóricas e as ferramentas para esse empreendimento estão sendo produzidas dentro do estudo de sistemas complexos.

Sistemas dinâmicos complexos têm outra propriedade única: são dotados de regimes transientes muito longos, podendo nunca atingir um estado estacionário. Seu estado atual não depende de um passado finito, mas de todos os estados passados desde o instante inicial. São as chamadas contingências. Isso faz novamente com que a abordagem analítica – como as equações diferenciais – seja praticamente inútil. Além disso, a abordagem experimental também fica reduzida a alguns *flashes* isolados do passado – como no caso dos fósseis, na paleontologia – numa seqüência extremamente fragmentada da evolução temporal. Como consequência, o único instrumento disponível, na prática, é a simulação computacional, com a qual se segue o sistema passo a passo, em tempo real. Dessa forma, as simulações adquiriram o mesmo status que os experimentos e as teorias, com eles formando um triângulo harmonioso.

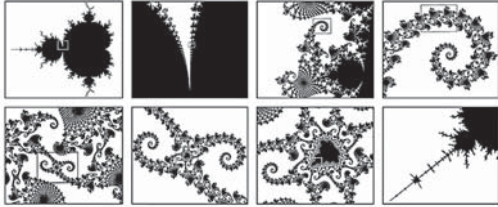
Assim, o estudo de sistemas complexos, devido ao seu caráter não linear, ao grande número de partes e ao transiente muito longo, raramente utiliza as metodologias teóricas tradicionais desenvolvidas pela física até a primeira metade do século passado. Essas são baseadas nos sistemas lineares ou em aproximações lineares – estas com a capacidade de fornecer informação relevante – de sistemas mais complicados. O requerimento de linearidade dos sistemas é imposto pela procura de soluções analíticas, aquelas que podem ser obtidas quando recursos computacionais não estão disponíveis. A necessidade de simplicidade para a obtenção de soluções analíticas torna essa abordagem matemática inadequada para o estudo dos sistemas complexos.

Uma das características fundamentais dos sistemas complexos é a sua capacidade de auto-organização, isto é, de criação espontânea de ordem a partir da desordem

O estado de um sistema complexo pode depender de toda a sua história e não apenas de seu passado imediato

### 2.5.3. Modelagem

Com a disponibilidade recente de recursos computacionais de grande porte, foi possível tratar, de forma muito precisa, sistemas não lineares, e novas soluções foram obtidas para problemas antigos. Além disso, teorias e técnicas



matemáticas foram desenvolvidas – como, por exemplo, a teoria do caos determinístico e a geometria fractal –, adequando-se às demandas apresentadas para a análise das soluções obtidas através das simulações computacionais. Com esses recursos, sejam teóricos, sejam de equipa-

mento, sistemas complexos podem ser abordados através da proposição de modelos matemáticos, técnica conhecida como modelagem.

Na realidade, essa metodologia tem incentivado a criação em todo o mundo de centros dedicados ao estudo de sistemas complexos voltados para a biologia, a economia, as ciências sociais etc. Os objetivos desses centros vão desde o estudo de problemas fundamentais – como o funcionamento do cérebro – até as possibilidades tecnológicas inerentes à construção de modelos quantitativos de sistemas específicos e sua interação com os setores produtivos fora das universidades.

Observe que a não-linearidade comumente presente em sistemas complexos indica que um sistema natural composto de muitas partes interagentes raramente reage a uma pequena perturbação de maneira previsível. A modelagem desses sistemas, sua eventual simulação computacional e a comparação dos resultados da simulação com experimentos tornam-se necessárias para a tomada de decisões por agentes externos. Como exemplos, citamos decisões que envolvem medidas relativas a ecossistemas,

transgênicos, alterações de trânsito de automóveis em grandes cidades, controle de epidemias etc.

Porém, além do desenvolvimento de novas técnicas e teorias para a modelagem de sistemas naturais em diferentes áreas, visando à aplicação tecnológica em

**Ou a flecha do tempo é uma propriedade inerente ao universo, ou consequência do grande número de elementos que compõem o sistema juntamente com condições iniciais bastante ordenadas e, por isso, pouco comuns**

diferentes áreas e níveis, a investigação em sistemas complexos tem suscitado a abordagem de problemas científicos fundamentais. Um exemplo trata da discussão sobre um fenômeno observado macroscopicamente, o qual podemos chamar de flecha do tempo, que se caracteriza pelo aumento espontâneo da desordem em sistemas compostos por muitos componentes. O paradoxo reside no fato de que as teorias fundamentais – como a mecânica quântica e a mecânica clássica, que se propõem descrever o comporta-

mento de cada elemento de um sistema composto – não contemplam uma direção preferencial para a evolução do sistema. Esse paradoxo sugere duas possíveis linhas de solução:

- i) a flecha do tempo é uma propriedade inerente do universo e algum ingrediente está faltando nas teorias fundamentais;
- ii) a flecha do tempo observada em fenômenos macroscópicos é consequência do grande número de elementos que compõem o sistema juntamente com condições iniciais bastante ordenadas e, por isso, pouco comuns.

Espera-se que a investigação da dinâmica de sistemas complexos possa trazer novos *insights* para a solução desse paradoxo fundamental.

**Sistemas mecânicos não lineares, como um pêndulo duplo ou um sistema planetário de três corpos, podem apresentar movimentos extremamente complicados e instáveis**

#### 2.5.4. Sistemas caóticos

Outra classe importante de sistemas relacionada com os sistemas complexos são os caóticos. Sistemas mecânicos não lineares, como um pêndulo duplo ou um sistema planetário de três corpos, podem apresentar

movimentos extremamente complicados e instáveis. Esse tipo de comportamento – vislumbrado pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) e estudado primeiramente pelo matemático francês Henri Poincaré (1854-1912) – pode ser tão instável que pequenas incertezas nas condições iniciais de uma trajetória acabam se propagando exponencialmente rápido, tornando praticamente impossível prever o estado do sistema depois de determinado tempo. Essas soluções são ditas caóticas, pois o sistema torna-se imprevisível como se sua dinâmica determinística fosse aleatória.

No caso de sistemas microscópicos – como partículas elementares, átomos e pequenas moléculas –, a mecânica clássica deve ser substituída pela teoria quântica. No entanto, como a dinâmica quântica é linear, não existe caos quântico no mesmo sentido de sua definição clássica, pois estados quânticos inicialmente próximos continuam próximos todo o tempo.

A teoria quântica aplica-se a um conjunto maior de fenômenos se comparada com a teoria clássica, que se aplica apenas aos sistemas macroscópicos.



Deve, então, existir uma classe de sistemas físicos intermediários entre o macro e o micro na qual essas duas formulações se sobreponham. Essa é a região dos sistemas mesoscópicos e do chamado limite semiclássico, no qual o clássico e o quântico se misturam. Nesse limite, informações clássicas podem ser usadas para a obtenção de resultados quânticos aproximados, e certos conceitos quânticos podem ser interpretados à luz da intuição clássica.

Sistemas mesoscópicos classicamente caóticos são particularmente interessantes, pois esse fenômeno não tem análogo quântico. Essa aparente incompatibilidade entre as duas teorias aparece, então, de forma intensa e tem sido objeto de estudo nos últimos 30 anos.

Esse estudo teórico ganhou ainda novas perspectivas com o avanço das técnicas de fabricação por litografia, que tornaram possível a produção e a investigação de novos sistemas mesoscópicos – por exemplo, um gás de elétrons confinado por potenciais regulares ou caóticos. Medidas de magnetização, susceptibilidade e condutância nesses sistemas mostraram que, de fato, essas grandezas são sensíveis ao caráter regular ou caótico da dinâmica subjacente, podendo ter consequências importantes na operação de circuitos em escala mesoscópica ou nanoscópica.

### 2.5.5. Desafios fundamentais

Outro desafio fundamental é a compreensão dos efeitos produzidos pelo acoplamento de um sistema de interesse a outro caótico. Essa situação é típica de sistemas microscópicos que queremos manter isolados, mas que interagem, ainda que fracamente, com outros elementos do ambiente. Em algumas circunstâncias, um ambiente caótico pode agir como um banho térmico, levando à perda da coerência quântica e das propriedades de

emaranhamento necessárias, por exemplo, na computação quântica.

Outro desafio fundamental é a compreensão dos efeitos produzidos pelo acoplamento de um sistema de interesse a outro caótico

Outro exemplo de problema científico fundamental – dessa vez, sugerido pelo desenvolvimento de técnicas visando à aplicação

em sistemas sociais – consiste em sistemas formados por muitos agentes conectados em uma topologia não trivial. Com isso, queremos descrever sistemas conhecidos como *small worlds* (pequenos mundos), onde, por exem-

plo,  $N$  agentes podem interagir com  $\ln(N)$  – logaritmo neperiano de  $N$  – outros agentes escolhidos aleatoriamente. Esse tipo de interação define vizinhanças que diferem em muito daquelas de espaços euclidianos planos. Nessas topologias, a dinâmica de difusão, relaxação até o equilíbrio – e mesmo os próprios estados de equilíbrio, quando existentes – apresentam características não usuais e ainda não completamente compreendidas. A aplicação dos resultados desses modelos se dá, por exemplo, para a descrição da difusão de informação em pequenas comunidades, em nações ou no âmbito mundial. Se, por um lado, a aplicação desses modelos serve a problemas canonicamente fora do âmbito da física, por outro, são teorias fundamentais tipicamente físicas.

A investigação de sistemas complexos contribui também para a própria discussão epistemológica sobre a possibilidade, em princípio, de uma modelagem matemática de todos os fenômenos naturais, incluindo fenômenos como vida, consciência ou relações sociais. Alguns argumentos de fundo filosófico contra a modelagem matemática desses fenômenos fundamentavam-se no fato de que detalhes e contingências aleatórias são determinantes na posterior evolução dos sistemas, o que, portanto, tornaria impossível a sua previsão. No entanto, teorias como a do caos determinístico mostram que existem modelos matemáticos que apresentam o que se poderia chamar de aleatoriedade efetiva, embora sejam intrinsecamente deterministas. Nesses sistemas, é possível estimar incertezas, classificar possíveis resultados e, eventualmente, propor meios de controle. Eles aparecem, assim, como fortes candidatos a modelos de sistemas complexos naturais. Reduzir um sistema natural a um modelo matemático deixou de ser sinônimo de reduzi-lo a um conjunto de elementos simples.

Conseqüentemente, a pesquisa científica em sistemas complexos passa, por um lado, pela proposição de modelos matemáticos que apresentem propriedades interessantes, numa generalização e extrapolação do estudo ocorrido no passado sobre as propriedades de equações diferenciais, com o intuito de formar uma ‘biblioteca’ de sistemas matemáticos formais a serem utilizados como ferramentas de modelagem de sistemas naturais. Por outro lado, existe também a preocupação de se construírem modelos específi-

A investigação de sistemas complexos contribui para a própria discussão epistemológica sobre a possibilidade, em princípio, de uma modelagem matemática de fenômenos naturais como vida, consciência ou relações sociais

cos para sistemas naturais particulares cujos resultados podem ser fundamentais, tanto do ponto de vista científico quanto para a geração de tecnologia.

Essas pesquisas requerem, assim, tanto o domínio de métodos matemáticos e computacionais quanto um conhecimento profundo das propriedades dos sistemas naturais específicos a serem modelados. Dada a extensão desses conhecimentos – bem como a estrutura das nossas universidades –, raramente um pesquisador domina todos os campos envolvidos na pesquisa. Torna-se, portanto, necessária a forte interação entre pesquisadores dedicados ao estudo dos sistemas naturais e aqueles que dominam a arte e as técnicas de modelagem de sistemas complexos.

### 2.5.6. Perfil da área no Brasil

O maior dos encontros nacionais de física promovidos pela SBF é o de matéria condensada. A vasta diversidade dos trabalhos apresentados deixa claro que alguns temas das pesquisas atuais são classificados como pertencentes a essa área apenas por razões históricas. Muitos desses trabalhos utilizam técnicas e ferramentas desenvolvidas para a investigação teórica de sistemas complexos e que, como dissemos aqui, podem ser aplicadas a uma gama extensa de sistemas. No Brasil, historicamente, os pesquisadores que realizam ou realizaram trabalhos em sistemas complexos são na sua maioria oriundos da tradicional área de mecânica estatística.

**A área de mecânica estatística tem tradição no Brasil e desfruta de reconhecimento internacional, contando com vários grupos produtivos espalhados tanto em universidades públicas quanto privadas**

A área de mecânica estatística tem tradição no Brasil e desfruta de reconhecimento internacional. Conta com vários grupos produtivos espalhados tanto em universidades públicas quanto privadas por todo o País. No entanto, esses grupos são, em sua maioria, teóricos, com interação ainda incipiente com experimentais. Mais ainda, são ainda mais raras as colaborações com o intuito explícito de produção de tecnologia e que requerem interação com setores produtivos fora do meio acadêmico. Do ponto de vista puramente teórico, no qual se desenvolvem ferramentas de análise, esse fato é preocupante: para uma escolha criteriosa das propriedades fun-

damentais a serem incorporadas nos modelos que serão extensivamente investigados, é recomendável que se tenha em mente os problemas encontrados nas tentativas de modelagem de alguns sistemas naturais.

Na área de sistemas complexos, a distância entre teóricos e experimentais pode ser muito maior que aquela comumente encontrada – e, por vezes, criticada – em áreas mais tradicionais da física. Isso se dá exatamente pela larga aplicabilidade das técnicas matemáticas e computacionais inerentes à área, o que faz com que os pesquisadores teóricos tenham uma excelente formação matemática, mas pouco conhecimento dos sistemas naturais a serem modelados. Por outro lado, pesquisadores experimentais têm a tendência de se dedicarem mais intensamente ao estudo dos sistemas naturais em si. Isso traz como consequência uma diferença na metodologia de pesquisa familiar a cada tipo de pesquisador e, o que é mais relevante, uma diferente linguagem. Assim, para diminuir a distância entre teóricos, computacionais e experimentais, é necessária a criação de uma linguagem comum, que seja acessível a todos.

Mais ainda: uma interação forte requer também proximidade física, isto é, a convivência num mesmo ambiente de trabalho por períodos suficientemente longos dos pesquisadores envolvidos na pesquisa. Tanto a formação da linguagem comum quanto a redução da distância física são favorecidas quando são criados centros multidisciplinares onde os focos principais de pesquisa estejam bem definidos e reflitam as necessidades do País, bem como a capacidade e a competência dos recursos humanos existentes.

Finalmente, centros multidisciplinares favorecem a formação de recursos humanos já voltados para a pesquisa multidisciplinar – nesta a aquisição da linguagem comum se dá desde a formação do pesquisador. Assim, esses centros podem suprir a deficiência das universidades brasileiras – seja na graduação, seja na pós-graduação – na formação de recursos humanos voltados para a pesquisa multidisciplinar. Por exemplo, centros de biocomplexidade poderiam formar físicos com conhecimentos em bioquímica e biologia, bem como biólogos com conhecimentos em métodos matemáticos e computacionais.

Na área de sistemas complexos, a distância entre teóricos e experimentais pode ser muito maior que aquela comumente encontrada – e, por vezes, criticada – em áreas mais tradicionais da física



## 3. DESAFIOS MULTIDISCIPLINARES E FÍSICA APLICADA A PROBLEMAS BRASILEIROS



Os tópicos abordados acima formam o núcleo da física; no entanto, não esgotam os temas de interesse dos físicos. Uma grande gama de problemas científicos requerem uma abordagem multidisciplinar em que competências se complementam.

Neste capítulo, ilustramos problemas em que os físicos têm dado uma contribuição significativa, mas que não são, *stricto sensu*, parte dessa disciplina. Muitos desses problemas têm uma relação bastante palpável com o cotidiano das pessoas.

### 3.1. ENERGIA

O consumo mensal de energia elétrica no Brasil atingiu um recorde em março de 2004: cerca de 33 bilhões de KWh, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico. Como esse é um dos principais indicadores do ritmo da economia, a notícia foi considerada como um alvissareiro presságio de uma possível recuperação econômica. No entanto, ela também reacende uma preocupação constante quanto ao desenvolvimento social e

O consumo de energia elétrica no Brasil atingiu um recorde em março de 2004: cerca de 33 bilhões de KWh

tecnológico do País nas próximas décadas, ou seja, se haverá disponibilidade suficiente de energia para garantir um desenvolvimento sustentável que permita maior igualdade social e elevação do padrão

de vida dos brasileiros ao nível dos países avançados, ainda neste século.

Esse problema tem sido investigado em diferentes níveis de profundidade por órgãos oficiais do Governo Federal, bem como por grupos universitários e de institutos de pesquisa. Dados sobre o consumo e a disponibilidade de energia são fornecidos principalmente pela Agência Internacional de Energia (AIE), quanto à situação mundial, e pelo Ministério de Minas e Energia (MME), em relação à situação brasileira. Um estudo bem completo sobre o cenário futuro para desenvolvimento das tecnologias mais promissoras para produção de energia no Brasil – *Estado da Arte e Tendências das Tecnologias para Energia* (CTEnerg/Secretaria Técnica do Fundo de Energia, janeiro 2003) – foi recentemente concluído pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

Considerando, portanto, que já existem organismos competentes encarregados de analisar e estabelecer políticas de gestão e de planejamento em pesquisa e desenvolvimento (P&D), a questão energética será analisada através de outro enfoque. Após uma breve introdução sobre a situação atual – tanto mundial como brasileira, pois elas estão necessariamente interconectadas –, o desenvolvimento de novas fontes de energia será discutido sob o ponto de vista de oportunidades abertas para a pesquisa e a aplicação da física em problemas relevantes para o progresso social e econômico do País. Dessa forma, em vez de uma exposição exaustiva sobre as diferentes tecnologias disponíveis e previstas para o desenvolvimento de fontes de energia neste século, serão discutidas apenas aquelas que aparentemente oferecem maior potencial de pesquisa em física ou sobre as quais análises e sugestões da Sociedade Brasileira de Física sejam particularmente relevantes.

### 3.1.1. Consumo e demanda mundial

Com o constante crescimento da população e melhoria do nível de vida – com base na utilização de equipamentos e processos que fazem uso intenso de energia –, o consumo energético mundial tem aumentado numa taxa muito superior àquela em que novas fontes se tornam disponíveis. Para simples sobrevivência vegetativa, um ser humano normal consome uma potência média da ordem de 100 watts. No entanto, o consumo médio por habitante é muito maior nas sociedades modernas, incluindo a energia gasta

nos processos industriais dos produtos por elas consumidos. Numa sociedade pouco industrializada, como a da Índia, por exemplo, o consumo médio por habitante é aproximadamente 420 watts; num país europeu típico, é dez vezes maior; nos Estados Unidos, o país que mais consome energia no mundo, é de 13 kilowatts.

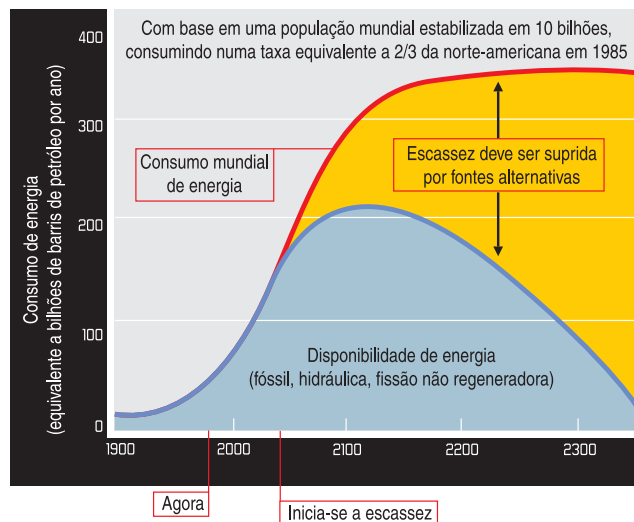
No Brasil, o consumo médio por habitante é cerca de 1,7 kilowatt. Portanto, as previsões sobre as necessidades futuras de energia não dependem

**No Brasil, consumo médio por habitante é aproximadamente 1,7 kilowatt; nos Estados Unidos, o país que mais consome energia no mundo, é de 13 kilowatts**

apenas do crescimento da população, mas também da fase de desenvolvimento esperado para as diversas regiões do mundo, que é um parâmetro difícil de quantificar, por depender fundamentalmente das políticas econômicas e sociais a serem seguidas por futuros governos. Mesmo assim, há vários estudos baseados em diferentes cenários que permitem claramente antever o início de uma séria crise no fornecimento de energia em meados deste século, mantidas as fontes atualmente utilizadas e considerando suas reservas disponíveis, conforme mostrado na figura abaixo.

Mesmo considerando que as hipóteses utilizadas para extrapolar as curvas mostradas na figura possam estar um pouco incorretas, não há dúvidas de que a diferença entre consumo e fornecimento de energia terá que ser suprida por novas fontes alternativas, incluindo biomassa, energia solar, energia eólica, reatores nucleares regeneradores (de fissão) e reatores de fusão nuclear controlada.

Considerando-se um consumo médio por habitante da ordem de 3 kW, a potência instalada terá que aumentar de cerca de  $13 \times 10^{12}$  W (ou 13 terawatts), em 2001, para 30 terawatts, por vol-



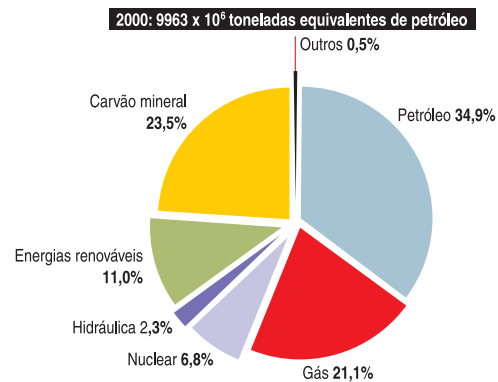
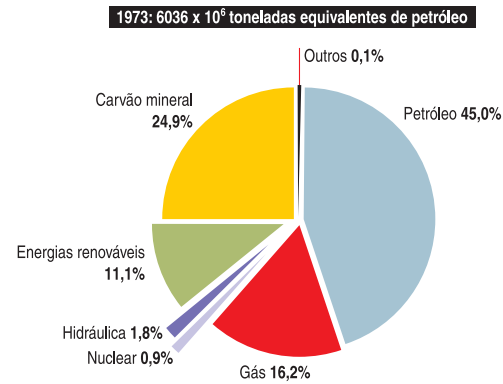
Evolução temporal do consumo e suprimento de energia, em nível mundial, supondo que a população se estabilize em 10 bilhões de habitantes e que o consumo médio se equipare ao dos Estados Unidos em 1985

ta de 2030, segundo a AIE. Por outro lado, há uma forte tendência em se priorizar o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para conferir maior sustentabilidade ambiental, bem como maior eficiência e segurança, no fornecimento de energia. Aliás, essa tendência, acrescida do aumento no preço do petróleo, já vem se manifestando há mais de três décadas, conforme indicado pela evolução mundial da distribuição de fontes primárias para produção de eletricidade, mostrada na figura. Além da diminuição na utilização de petróleo, nota-se forte aumento na utilização de gás natural e de energia nuclear, apesar de esta indústria praticamente não ter recebido encomenda de novos reatores na última década.

A demanda por fontes alternativas de energia – incluindo maior eficiência no uso de combustíveis fósseis – será ainda maior se os limites impostos pelo Protocolo de Kyoto para emissão de CO<sub>2</sub> – mantida a concentração de carbono na atmosfera em cerca de 550 partes por milhão (ppm) – forem efetivamente implementados. Resumindo: nos próximos 20 anos, as demandas globais de energia (total e elétrica) devem crescer 78% e 92%, respectivamente, exigindo um investimento global de mais de US\$ 600 bilhões por ano e grande esforço de pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas.

### 3.1.2. Situação brasileira

O consumo de energia no Brasil ainda é majoritariamente de derivados de petróleo. Felizmente, com o contínuo aumento da produção interna desse combustível, a dependência do fornecimento externo de energia tem decrescido substancialmente nos últimos anos. A partição entre as formas



Variação da distribuição de fontes primárias para produção de energia elétrica entre 1973 e 2000, em nível mundial

de energia mais utilizadas no Brasil e a dependência relativa do fornecimento externo é mostrada nos gráficos.

Na matriz energética brasileira, avaliada no final de 2001, as principais reservas energéticas são o petróleo, cerca de  $1,2 \times 10^6$  tep (toneladas equi-

**Das reservas brasileiras de petróleo, 88% estão no mar, o que implica alto custo de exploração**

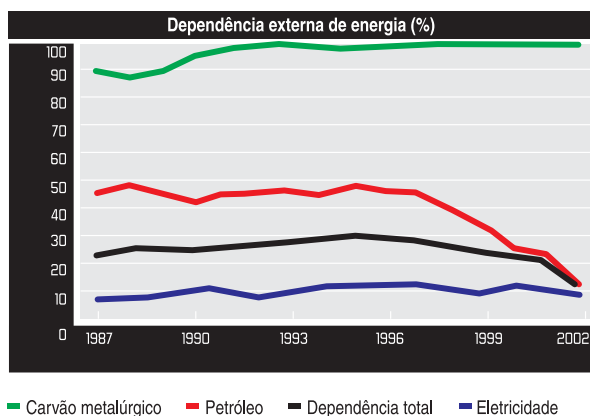
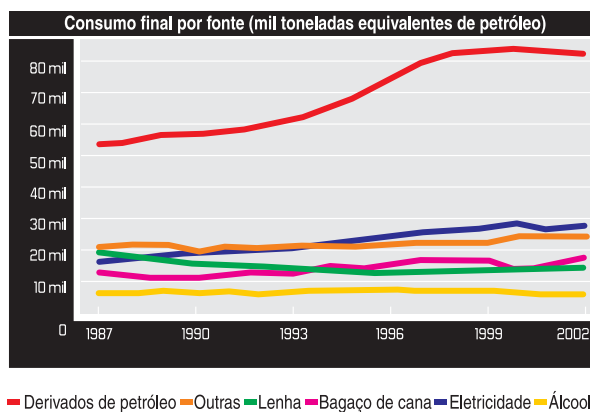
valentes de petróleo); carvão mineral,  $2,56 \times 10^6$  tep; hidráulica,  $0,24 \times 10^6$  tep/ano; nuclear (urânio),  $1,24 \times 10^6$  tep. Das reservas de petróleo, 88% estão no mar, o que implica alto custo de exploração. Embora o

carvão mineral seja o combustível mais abundante no País, ele apresenta sérias dificuldades para geração de eletricidade ou outras aplicações térmicas, devido à sua baixa qualidade. Isso explica a alta dependência externa no fornecimento de carvão metalúrgico.

Em agosto de 2002, foi concluído um estudo feito por um comitê do

Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) sobre a evolução da oferta e da demanda de energia para os próximos 20 anos, considerando cenários razoáveis sobre o crescimento da população e do PIB brasileiro. Os resultados estão resumidos na tabela a seguir. Segundo essa análise – embora a relação entre a oferta interna bruta de energia (OIB) e o PIB permaneça aproximadamente constante nesse período –, o consumo final de energia *per capita* dobra, aproximando-se do atual nos países menos industrializados da Comunidade Européia.

Apesar do aumento da OIB *per capita*, o cenário apresentado por esse estudo não deixa de ser preocupante. A dependência de energia importada será prati-



Evolução das diferentes formas de energia utilizadas no Brasil (acima) e da dependência relativa da importação

camente igual à atual e não será atingida a auto-suficiência na produção de petróleo. A capacidade instalada de produção centralizada de energia elétrica deverá atingir 190 GW, distribuída em 78% de origem hídrica, 15% de gás natural e 2% em cada uma das fontes auxiliares, diesel e óleo combustível, carvão, eólica e nuclear. Portanto, não há dúvida de que será necessário intensificar substancialmente a pesquisa sobre novas fontes de energia adequadas às condições nacionais.

Há poucos estudos no Brasil que possam servir de subsídio para o planejamento de P&D em fontes alternativas de energia para um horizonte mais distante, ou seja, pelo menos até meados deste século. Isso é preocupante porque o desenvolvimento de novas fontes é, em geral, um processo demorado que requer a firme manutenção de políticas gestoras e de financiamento de P&D e, em alguns casos, forte participação em colaborações internacionais para reduzir custos e riscos. Um dos poucos estudos disponíveis é o do CTEneg já mencionado, que será a principal fonte sobre o desenvolvimento de fontes alternativas de energia no Brasil, a ser discutido a seguir.

### 3.1.3. Fontes alternativas

No Brasil, assim como no cenário mundial, a futura demanda de energia só poderá ser suprida por um conjunto de tecnologias – fóssil, renovável e nuclear – muito diversificado. Considerando fontes alternativas, as mais relevantes para o cenário brasileiro são biomassa, eólica, solar e nuclear. Naturalmente, entre essas alternativas, a conversão fotovoltaica de energia solar e a geração nuclear são as que oferecem maiores perspectivas de pesquisa e aplicações de física. O uso de hidrogênio como vetor energético, que tem sido crescentemente estudado, também pode oferecer oportunidades interessantes de pesquisa.

ANO	2000	2020
População (numero habitantes $10^6$ )	170	210
Produto Interno Bruto (PIB $10^9$ US\$)	590	1.590
Oferta interna bruta de energia (OIB $10^6$ tep)	260	617
Participação relativa (%) das diversas fontes		
Petróleo	47	42
Eletricidade hidráulica	14	15
Gás natural	5	16
Cana/Derivados	12	8
Carvão mineral/Derivados	7	8
Uranio	1	1
Outras fontes primárias	2	3
Lenha/Carvão vegetal	11	7

Resumo da projeção da evolução da matriz energética brasileira para os próximos 20 anos

**BIOMASSA.** O Brasil tem atualmente a melhor tecnologia mundial para a implantação, o manejo e a exploração de florestas de eucalipto. Os custos nacionais são extremamente vantajosos, e o progresso obtido na tecnologia de papel e celulose permite planejar processos bastante competitivos para o uso energético de florestas plantadas. Além disso, o uso de etanol extraído da cana-de-açúcar é um claro exemplo de sucesso tecnológico nacional, e a indústria já tem o maior sistema de energia comercial de biomassa do mundo, através da produção de etanol e do uso quase total de bagaço de cana para produção de eletricidade. Portanto, o desenvolvimento da biomassa como fonte alternativa de energia está bem equacionado no Brasil, com forte envolvimento industrial e não oferece amplas oportunidades de pesquisa em física aplicada.



DIVULGAÇÃO

**EÓLICA.** A energia eólica também apresenta um panorama de maturidade tecnológica estabelecida em escala de produção industrial. Embora a capacidade instalada no Brasil ainda seja pequena (cerca de 22 MW), já existem vários grupos de pesquisa universitários estabelecidos, envolvendo, em alguns casos, colaborações com grupos estrangeiros, e as turbinas eólicas são

produzidas industrialmente no País. Segundo análise preliminar feita pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica (CNPE) em 1988, existe grande potencial eólico – principalmente no litoral nordestino –, de aproximadamente  $6 \times 10^9$  W (6 gigawatts), que estão disponíveis em curto prazo. O programa de P&D em energia eólica está principalmente dirigido ao desenvolvimento de geradores adequados aos regimes de vento específicos das diversas regiões do território nacional e consolidação de dados

do potencial eólico. Portanto, essa fonte alternativa também oferece claras possibilidades de pesquisas avançadas em física aplicada.

No Brasil, um grande potencial de energia eólica – principalmente no litoral nordestino – está disponível em curto prazo



**SOLAR.** As principais tecnologias empregadas na geração de energia solar são a conversão térmica e a fotovoltaica (transformação direta da luz solar em energia elétrica), com clara preferência pela segunda. Atualmente, a área efetiva de coletores solares térmicos instalados no País é cerca de  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^2$  com boas perspectivas de expansão se o contínuo desenvolvimento e a economia de mercado permitirem uma substancial redução dos custos iniciais de instalação, em relação ao custo de energia elétrica. O programa de P&D para o setor está concentrado em aspectos tecnológicos, como aumento da eficiência de conversão de películas e tintas.



Por outro lado, a conversão fotovoltaica – além de ter mostrado melhor desempenho e potencial que a via térmica para produção de eletricidade – oferece perspectivas bem atraentes para pesquisa em física. Há várias tecnologias básicas competindo na conversão fotovoltaica: silício – material predominantemente utilizado –, compostos de silício, bem como o arseneto de gálio.

Em 2000, foram comercializados cerca de 278 megawatts de produção fotovoltaica de energia, com silício monocristalino respondendo por metade da tecnologia empregada.

Embora o Brasil detenha 90% das reservas mundiais de silício, ainda não dominamos a tecnologia de sua produção em grau eletrônico. Atualmente, a indústria de dispositivos fotovoltaicos utiliza silício resultante do reprocessamento de rejeitos de silício de grau eletrônico. No entanto, o emprego em conversão fotovoltaica cresce numa taxa superior ao do emprego em dispositivos eletrônicos, de forma que é importante que o Brasil estabeleça um programa de desenvolvimento da tecnologia de produção de silício de grau fotovoltaico. De fato, a atual capacidade instalada em conversão fotovoltaica de energia é cerca de 400 megawatts elétricos, mas há previsões para um aumento substancial em três décadas que vai depender da redução do custo de geração para aproximadamente US\$1,00 por watt, sem utilização de concentradores da radiação solar.

É importante que o Brasil estabeleça um programa de desenvolvimento da tecnologia de produção de silício de grau fotovoltaico

A pesquisa em geração fotovoltaica de energia foi iniciada por alguns grupos universitários na década de 1970, a saber: Universidade Federal de Pernambuco, Universidade de Campinas (SP) e Instituto Militar de Engenharia (RJ). No entanto, houve um forte retrocesso na década seguinte. Somente por volta de 1992, houve um ressurgimento do interesse nessa área de pesquisa, com a formação de novos grupos. A produção industrial foi iniciada no princípio da década de 1980, quando a empresa Heliodinâmica, em São Paulo, começou a fabricar tarugos e lâminas de silício. Mas, com a queda das barreiras alfandegárias em 1992, o mercado passou principalmente a importar células, estagnando o desenvolvimento nacional.

Considerando as possibilidades atraentes da conversão fotovoltaica de energia e as reservas nacionais de silício, é urgente que se estabeleça no Brasil uma política de P&D de produção de silício de graus fotovoltaico e eletrônico. Tecnologias modernas já estão sendo investigadas por grupos, como a baseada em tochas de plasma para reprocessamento de silício de grau eletrônico e que está sendo desenvolvida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Universidade de São Paulo.

**NUCLEAR.** Apesar da oposição de grupos ambientalistas ao uso de energia nuclear – devido principalmente às questões associadas à segurança e ao manejo de rejeitos radioativos em reatores de fissão –, é inquestionável que somente essa fonte de energia – incluindo reatores de fissão avançados, numa primeira etapa, e, posteriormente, reatores de fusão – poderá suprir a maior parte da deficiência de energia prevista para a segunda metade deste século.

No Brasil, após a entrada em operação das duas primeiras usinas em Angra dos Reis (RJ), com cerca de 2 gigawatts de potência instalada, o programa nuclear brasileiro, concebido durante o regime militar, foi praticamente descontinuado. O término da construção de Angra III – que terá um custo adicional estimado em cerca de US\$ 2 bilhões – ainda não foi decidido pelo Governo Federal, apesar de os estudos de viabilidade econômica e de impacto ambiental terem sido concluídos há dois anos e

apresentados ao Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). Essa situação de indefinição da política nuclear brasileira é bastante preocupante e tem levado a uma forte redução das atividades de P&D na área nuclear. Além de abortar pesquisas que podem ser essenciais para o desenvolvimento tecnológico nacional neste século, essa indefinição desestimula a solução de problemas atuais, como o do manejo de rejeitos radioativos produzidos pelas usinas já instaladas.

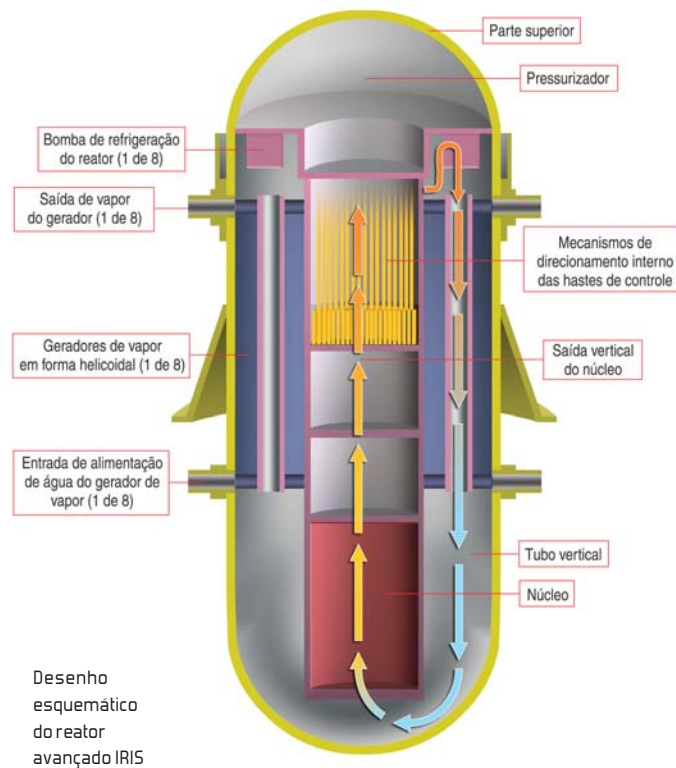
Nos últimos 20 anos, houve no Brasil um grande desenvolvimento das atividades de pesquisa em plasmas termonucleares, essenciais para a viabilização de reatores a fusão nuclear controlada

Mesmo nesse cenário um tanto pessimista, houve progressos notáveis, em particular o desenvolvimento de tecnologia nacional para enriquecimento de urânio, realizado pela Marinha do Brasil. Além disso, há grupos brasileiros participando de programas internacionais para o desenvolvimento de reatores avançados – como o IRIS (sigla inglesa para Reator Internacional Inovador e Seguro) – e, nos últimos 20 anos, houve um grande desenvolvimento das atividades de pesquisa em plasmas termonucleares, essenciais para a viabilização de reatores a fusão nuclear controlada.

Portanto, ainda existem todas as condições necessárias para que seja efetivamente estabelecida uma política de P&D nuclear que venha adequadamente garantir o fornecimento de energia em longo prazo no País. Naturalmente, essa política deve contemplar a utilização mais imediata de reatores avançados – com manejo apropriado de resíduos radioativos – e a utilização da energia de fusão a partir da segunda metade do século. Essas alternativas são discutidas a seguir.

**FISSÃO.** Estudo elaborado pelo CTEneg resume, de forma bem apropriada, o que seria um programa consistente de P&D em reatores de fissão, de médio e longo prazo:

- i) desenvolver, até 2010, os conceitos nucleoeletrônicos mais promissores;
- ii) mapear as tecnologias mais relevantes para o País;
- iii) iniciar um programa de P&D para viabilizar a utilização de uma dessas tecnologias até 2040;



iv) ampliar a participação brasileira em iniciativas internacionais de P&D para desenvolvimento de reatores avançados.

Um exemplo relevante dessas iniciativas é o projeto IRIS, do qual participam 16 instituições e empresas de oito países, lideradas pela empresa norte-americana Westinghouse. Um esquema do reator é mostrado na figura. Ele é baseado no conceito de sistema primário integrado, e suas principais características evolutivas e avançadas são: alto desempenho e segurança; custos reduzidos – custo de geração de US\$0,03 por kilowatt-hora (kWh)

e de investimento menor que US\$1.000,00 por kilowatt elétrico; e prazo de construção menor que três anos.

O projeto tem bastante afinidade com nossa base tecnológica e competência em pesquisas nucleares. De fato, o Brasil é responsável pelo projeto do pressurizador e será gradualmente envolvido em outras várias atividades de P&D.

**A questão do manejo de rejeitos radioativos não está sendo adequadamente tratada no Brasil; praticamente não há nenhum grupo brasileiro estudando possíveis soluções para o problema**

Naturalmente, somente com a manutenção e a expansão da participação brasileira em projetos internacionais desse tipo será possível adquirir o conhecimento tecnológico necessário para desenvolvimento dessas fontes de energia, minimizando custos e riscos e abrindo amplas oportunidades de pesquisa.

No entanto, a questão do manejo de rejeitos radioativos não está sendo adequadamente tratada no Brasil. Os resíduos produzidos pelas usinas Angra I e II ainda estão sendo armazenados em piscinas nas próprias usinas e praticamente não há nenhum grupo brasileiro estudando possíveis soluções para o problema. As atividades desenvolvidas na própria Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estão voltadas à procura de sítios para estoca-

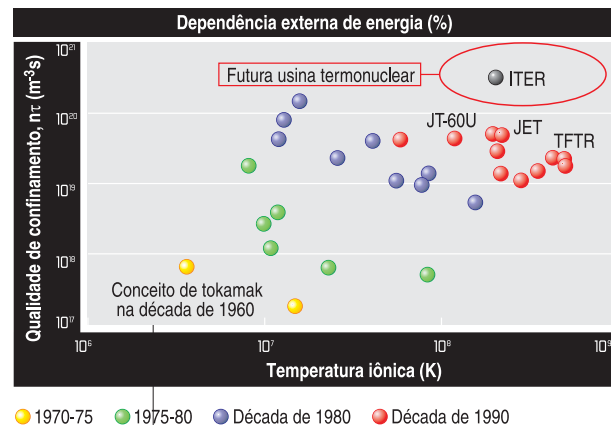
gem de resíduos de baixa e média atividade no território nacional. No entanto, nada está sendo feito com relação aos resíduos combustíveis de alta atividade.

Em nível mundial, a solução no momento considerada a mais adequada é o reprocessamento do combustível, para extração de produtos economicamente relevantes – como plutônio – e a estocagem dos resíduos, incorporados em matrizes vítreas ou metálicas, em minas profundas de sal ou granito. Nesse sentido, parece estar se formando um consenso que, no futuro, a reciclagem do combustível usado será feita dentro do conceito ‘combustível sujo e rejeito limpo’. Isso significa que os processos de separação e refabricação passarão a incorporar como combustível o plutônio, o urânio não queimado e os elementos transurânicos, segregando como rejeitos praticamente apenas os produtos de fissão, o que reduziria em algumas ordens de magnitude o tempo de armazenagem e, em parte, o volume dos rejeitos finais. Para a implantação de novas usinas nucleares, é essencial estabelecer um programa de P&D sobre manejo de resíduos radioativos, que também pode trazer oportunidades relevantes de pesquisa.

Para a implantação de novas usinas nucleares, é essencial estabelecer um programa de P&D sobre manejo de resíduos radioativos, que também pode trazer oportunidades relevantes de pesquisa

**FUSÃO.** A produção através da fusão nuclear controlada é considerada a solução quase definitiva para o fornecimento de energia a partir da segunda metade deste século. Os reatores a fusão são intrinsecamente seguros, a produção de rejeitos radioativos é muito inferior à dos reatores a fissão – não havendo produção de rejeitos de alta atividade que necessitem ser armazenados por mais de um século – e há disponibilidade praticamente ilimitada de combustível. Essas características promissoras têm motivado as atividades em P&D em nível mundial que têm se estendido por mais de quatro décadas, para confinar, aquecer e controlar plasmas termonucleares na temperatura de ignição, aproximadamente  $10^8$  K.

Evolução histórica do parâmetro que mede a qualidade de confinamento de plasmas termonucleares em função da temperatura do plasma para tokamaks



O ganho de energia em reatores a fusão é medido através do produto  $ntT$  – usualmente expresso em  $m^{-3} \cdot s \cdot eV$  – onde  $n$  é a densidade do plasma,  $t$  o tempo característico de confinamento de energia e  $T$  a temperatura do plasma. No gráfico (página anterior), é mostrada a evolução do produto  $nt$  em

No início da década de 1990, foi demonstrada a viabilidade científica da fusão nuclear controlada, ou seja, a produção de energia igual à utilizada para produzir e aquecer o plasma

função de  $T$ , obtido em tokamaks (equipamento para o confinamento de plasma). Este tipo de dispositivo para confinamento magnético de plasmas foi inventado por cientistas soviéticos na década de sessenta e atualmente

é considerado o mais promissor para viabilização de reatores a fusão.

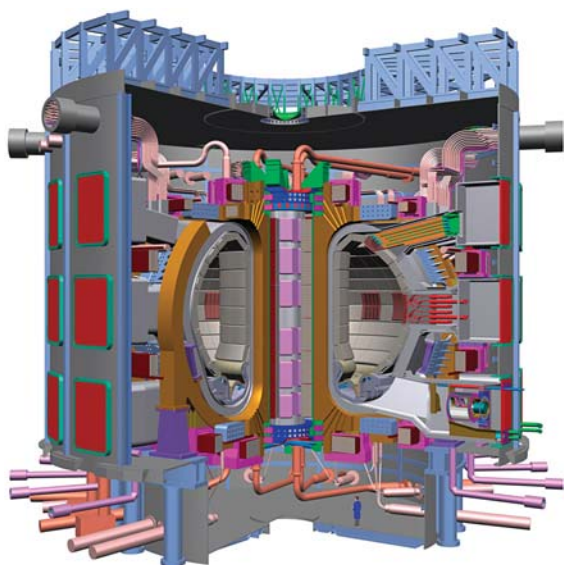
No início da década de 1990, foi demonstrada a viabilidade científica da fusão nuclear controlada – ou seja, a produção de energia igual à utilizada para produzir e aquecer o plasma – primeiramente no tokamak JET, da Comunidade Européia, e depois no TFTR, do Laboratório de Plasmas de Princeton (Estados Unidos). Esses resultados promissores levaram vários países a formar um consórcio internacional para um protótipo reator a fusão denominado ITER (sigla inglesa para Reator Termonuclear Internacional). Nesse tokamak, serão investigadas informações necessárias para o projeto definitivo de reatores a fusão:

- i) o comportamento de plasmas termonucleares totalmente aquecidos pela deposição de energia por partículas alfa produzidas por reações de fusão;
- ii) os danos de radiação nas paredes do reator.

O projeto foi concluído, e a construção do ITER já foi aprovada por todos os participantes do consórcio, que, atualmente, são os países da Comunidade Européia, Estados Unidos, Rússia, Japão, China, Coreia. Recentemente, a Índia foi aceita como participante minoritário, através de convênio estabelecido com o Reino Unido. Uma representação artística do reator é mostrada na figura.

O projeto total custará cerca de 6 bilhões de euros, distribuídos em dez anos. A divisão de atividades entre os vários participantes já

Representação artística do protótipo de reator de fusão termonuclear, ITER, a ser construído por um consórcio de países





está praticamente concluída, faltando apenas uma decisão entre as duas propostas de sítio para instalação do projeto, um na França e outro no Japão. Como se estima que o desenvolvimento do projeto gerará cerca de 100 mil empregos locais, diretos e indiretos, essa escolha está sendo fortemente disputada entre os proponentes, e a decisão final certamente dependerá de acertos políticos.

No Brasil, não há um programa oficial de P&D em fusão nuclear controlada. Mesmo assim, a partir de meados da década de 1970 se desenvolveram grupos de pesquisa em plasmas termonucleares, abrindo uma nova área de pesquisa em física que leva a um progresso expressivo das atividades nessa área. Atualmente, o Brasil tem uma posição de liderança na América Latina em física de plasmas. Há dois tokamaks em operação, um no Instituto de Física da Universidade de São Paulo e outro no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em São José dos Campos (SP). Portanto, existem todas as condições básicas para que seja estabelecido um programa oficial de P&D em fusão nuclear controlada, voltado principalmente à participação em colaborações internacionais, como o ITER, de forma semelhante ao proposto para reatores de fissão avançados.

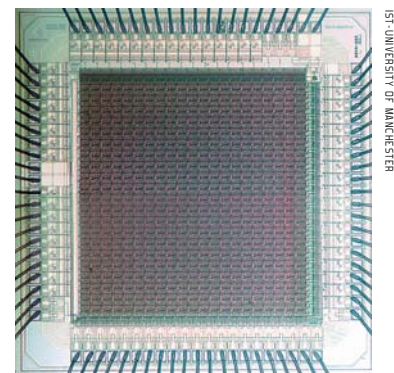
O Brasil já foi convidado para participar do Projeto ITER, seja através de uma colaboração direta com a Euratom, seja através de Portugal. Esse programa também teria amplas perspectivas de pesquisa em física, não somente em plasmas, mas principalmente em materiais e técnicas nucleares.

**Estima-se que o desenvolvimento do projeto do tokamak ITER gerará cerca de 100 mil empregos locais, diretos e indiretos**

### 3.2. ELETRÔNICA

A indústria de semicondutores representa o exemplo típico de sucesso citado quando se deseja descrever como transformar pesquisa e desenvolvimento (P&D) em produtividade. É, sem dúvida, surpreendente que um **circuito integrado** (CI), produzido usando as mais modernas tecnologias de processamento de silício, em fábricas que custam bilhões de dólares, possa chegar ao consumidor por apenas alguns dólares.

A chamada lei de Moore – proposta, em 1965, por Gordon Moore, um dos





fundadores da empresa norte-americana de microprocessadores Intel – prevê que o número de transistores num CI dobra a cada 18 meses, e essa tendência vem sendo aproximadamente seguida nos últimos 40 anos. Disso resultou que a microeletrônica revolucionasse a vida dos seres humanos

**Em poucos anos, as partes de um circuito integrado terão só um ou alguns átomos de largura ou espessura; nessa escala, novos fenômenos quânticos dominarão os processos físicos**

em aspectos como trabalho, saúde, comunicação, entre outros campos, através dos computadores e dos meios de telecomunicação.

Do ponto de vista da física, os CI estão baseados em conceitos clássicos de componentes eletrônicos – fios condutores, capacitores, resistores etc. –, e o conceito de semicondutor é o único de origem quântica. A lei de Moore implica uma constante redução no tamanho dos componentes do circuito integrado. Mas, em poucos anos, essa tendência à miniaturização encontrará barreiras físicas e não poderá ser mantida, pois as partes do CI terão somente um ou alguns átomos de largura ou espessura. Nessa escala de tamanho, o comportamento se torna completamente diferente, pois novos fenômenos quânticos dominarão os processos físicos.

Esse novo regime de operação da microeletrônica, o regime quântico, pode ser pensado como uma dificuldade ou de forma otimista como uma grande oportunidade de gerar circuitos baseados em novos conceitos ou novas arquiteturas. Mas inúmeras perguntas técnicas e científicas permanecem sem repostas, o que abre uma área estratégica para a pesquisa fundamental e aplicada em física, ciência de materiais, processamento de sinais etc.

**Uma das primeiras barreiras a serem transpostas é a escolha de uma nova técnica para gerar componentes cada vez menores**

Uma das primeiras barreiras a serem transpostas é a escolha de uma nova técnica para gerar componentes cada vez menores. Na atualidade, a litografia com escrita óptica é extensamente utilizada para gerar os padrões que definem os componentes em superfícies de silício. A litografia escrita por feixes eletrônicos está bastante desenvolvida em nível de laboratório e avança também no estágio industrial. Os métodos litográficos são chamados *top-down* (de cima para abaixo), pois, num sistema extenso (substrato de até 30 cm de diâmetro), são escritos ou gravados os componentes do CI.

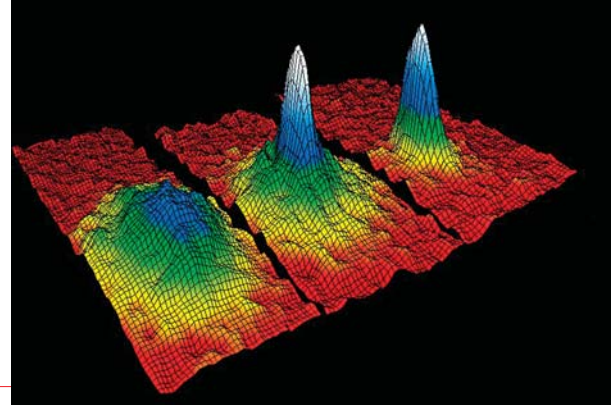
Novas propostas são regularmente apresentadas para substituir os métodos litográficos convencionais, como, por exemplo, o uso de pontas de microscópios de força atômica (AFM), seja para desenhar o circuito, seja para escrever como uma caneta de dimensões nanométricas (*dip pen-litography*). Até o uso de átomos frios gerados através da condensado de Bose-Einstein (ver 'Manipulação

quântica de átomos, moléculas e fótons) é sugerido como uma técnica alternativa de processamento.

Um enfoque inteiramente oposto está baseado no conceito *botton-up* (de baixo para cima), no qual primeiramente são sintetizados tijolos básicos (macromoléculas, pequenas partículas, fios submicrométricos etc.), que, depois, são estruturados para gerar o CI. Hoje, a constante evolução das técnicas de síntese possibilita um alto grau de controle na forma, na composição, no tamanho etc. de alguns dos tijolos necessários para esse processo de fabricação. Porém, uma das maiores dificuldades reside no processo de posicionar os tijolos ou partículas no lugar preciso para a construção do dispositivo, pois não existem nem métodos, nem ferramentas para realizar tarefas de manipulação rápida e barata no regime submicrométrico. Por exemplo, a força de van der Waals é considerada tradicionalmente muito fraca em sistemas macroscópicos, mas pode se tornar tão importante como as ligações internas em sistemas submicrométricos.

A natureza e os organismos vivos constroem sistemas pelo arranjo de moléculas por processos de auto-organização (*self-assembly*) utilizando siste-

mas de reconhecimento molecular disponíveis em proteínas, em anticorpos e no próprio DNA. Um grande esforço vem sendo realizado para poder utilizar a auto-organização como ferramenta de montagem de dispositivos, e somente os primeiros passos têm sido realizados. Apesar das dificuldades, o trabalho do grupo de Charles Lieber, da Universidade de Harvard (Estados Uni-



UNIVERSITY OF CHICAGO

Um grande esforço vem sendo realizado para poder utilizar a auto-organização como ferramenta de montagem de dispositivos; no entanto, somente os primeiros passos foram dados

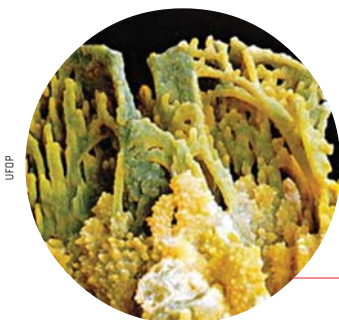
dos), ter demonstrado a viabilidade da construção *botton-up* de diferentes dispositivos – diodos luminescentes (ou LEDs), transistores e mesmo portas lógicas – utilizando cilindros semicondutores – de 50 a 100 nanômetros de diâmetro e micrômetros de comprimento – de diferentes materiais (silício, germânio, índio-fósforo, entre outros). Esse trabalho pioneiro tem estimulado uma enorme atividade na comunidade internacional.

A miniaturização dos dispositivos eletrônicos impõe enormes exigências para os materiais utilizados, sejam eles condutores (metais) ou isolantes (normalmente óxido de silício ou nitretos metálicos), sejam eles semicondutores. Por exemplo, o elemento mais simples de um CI são os

É necessário um bom isolamento elétrico para colocar vários condutores muito próximos, e a atual miniaturização dos circuitos integrados reduz essas distâncias a dimensões quase atômicas

condutores elétricos que conectam os diversos dispositivos. Eles são elementos passivos e raramente mencionados quando se fala de microeletrônica. Porém, a redução de tamanho induz um aumento da

resistência e, conseqüentemente, o transporte de eletricidade pode produzir um importante aquecimento e levar à fusão do fio – a temperatura de fusão diminui com o tamanho. Além disso, o diâmetro do fio é agora da ordem do livre percurso médio dos elétrons e, por isso, o mecanismo de condução elétrica se torna puramente quântico, o que gera efeitos ainda não compreendidos no funcionamento do circuito.



Por outro lado, é necessário um bom isolamento elétrico para colocar vários condutores muito próximos, e a atual miniaturização de CI reduz essas distâncias a dimensões quase atômicas. Já foi demonstrado experimentalmente que são necessárias, no mínimo, cinco camadas atômicas de óxido de silício para evitar correntes parasitas ou a ruptura elétrica desse material isolante. Isso tem um claro e direto efeito na tecnologia, pois impõe, já hoje, um limite definido para a miniaturização, se o óxido de silício continuar sendo usado.

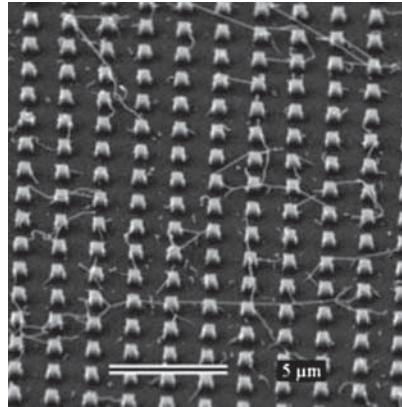
Um gigantesco esforço está sendo realizado para utilizar outros óxidos ou nitretos metálicos compatíveis com a tecnologia de processamento existente para evitar que a espessura do óxido em transistores surja como a primeira barreira que freie o progresso da miniaturização. As propriedades elétricas dos materiais semicondutores podem ser modificadas de forma

controlada por intermédio da dopagem, ou seja, da introdução de átomos de outro elemento químico de valência diferente. A concentração de impurezas é feita em doses minúsculas e, portanto, a posição dos átomos é ignorada nos dispositivos atuais.

Se a dimensão do sistema é de apenas alguns átomos, a localização de átomos de impureza no centro ou nos extremos de uma estrutura pode modificar substancialmente a resposta elétrica do dispositivo. Tudo isso demonstra que a continuidade do processo de miniaturização na eletrônica requer avanço em vários campos, incluindo desenvolvimento de diferentes tipos de materiais, pesquisa em transporte elétrico na escala dominada por efeitos quânticos e até mesmo mudanças de paradigmas.

A descoberta dos nanotubos de carbono em 1991 pelo físico japonês Sumio Iijima originou uma das mais recentes mudanças de paradigma. Um nanotubo de carbono é um cilindro cujas paredes são átomos de carbono em arranjo hexagonal, como ocorre na grafite. Os nanotubos têm diâmetro de um a dez nanômetros e comprimento de alguns micrômetros. As propriedades elétricas – condutoras, semicondutoras ou isolantes – podem ser variadas apenas em função de parâmetros geométricos – isto é, com o diâmetro ou a forma helicoidal com que as lâminas de grafite são enroladas.

Vários grupos de diferentes países já fabricam componentes eletrônicos – transistores, diodos, portas lógicas – utilizando nanotubos como elemento ativo. A dificuldade presente reside no desenvolvimento de métodos de síntese controlada de estruturas gráficas, um problema que ainda resiste aos gigantescos esforços da comunidade. Na atualidade, a pesquisa em nanotubos de carbono representa uma das principais áreas estratégicas dos esforços para o desenvolvimento dos futuros dispositivos eletrônicos, recebendo recursos prioritários em vários países. No Brasil, nanotubos de carbono estão sendo produzidos e investigados no Departa-



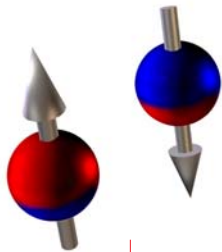
Nanotubos de carbono suspensos em nanopilares de óxido de silício. Estruturas desse tipo podem vir a compor nanocircuitos eletrônicos do futuro

**No Brasil, nanotubos de carbono estão sendo produzidos e investigados no Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais**

mento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais, e esforços estão sendo iniciados para a produção de dispositivos eletrônicos – principalmente transistores de efeito de campo – baseados nesses sistemas.

A miniaturização extrema seria a utilização de pequenas ou grandes moléculas como elementos ativos para manipular sinais elétricos ou armazenar informação. Esse caminho tem sido explorado por diferentes grupos, alguns utilizando moléculas simples, como um anel benzênico conectado a dois eletrodos de ouro por dois átomos de enxofre. Outros tentam usar macromoléculas sintéticas ou naturais que mudam de configuração quando transportam corrente elétrica. Muitas perguntas restam em aberto, pois é difícil construir – e, principalmente, integrar – dispositivos utilizando sistemas tão pequenos. Outra questão ainda sem resposta é como se faz um contato elétrico com um sistema através de um só átomo. Essa pergunta se refere tanto a aspectos práticos quanto a conhecimentos de física básica.

### 3.2.1. Spintrônica



Em breve, a diminuição de tamanho dos componentes nos CI atingirá o limite em que as dimensões dos sistemas serão comparáveis ao comprimento de onda dos elétrons que constituem a corrente elétrica. Nessa situação, os fenômenos quânticos serão dominantes, e os dispositivos se comportarão de forma muito diferente dos atuais. Em particular, uma descrição puramente quântica do dispositivo será imprescindível. Entrar no regime chamado quântico permite a exploração de novas formas de transferir e processar correntes elétricas ou informação.

Na atualidade, a eletrônica explora somente a carga do elétron, mas essa partícula também possui *spin* – um atributo intrínseco do elétron análogo ao movimento de rotação. O *spin* pode tomar dois valores diferentes: *up* e *down*. Se os dispositivos pudessem também gerar, manipular e medir a condição de *spin*, teríamos mais graus de liberdade para transferir informação utilizando elétrons.

Em breve, os componentes num circuito integrado terão dimensões comparáveis ao comprimento de onda dos elétrons que constituem a corrente elétrica

Essa linha de pesquisa é denominada de spintrônica e concentra um grande esforço pois requer a associação de efeitos magnéticos e de física de semicondutores. Ainda mais

otimista é o uso dos estados eletrônicos emaranhados, nos quais seria possível processar sinais em forma inteiramente nova e com eficientes algoritmos de origem diferente dos sistemas atuais. A exploração desses estados emaranhados é a base da computação quântica (ver ‘Manipulação quântica de átomos, moléculas e fótons’).

### 3.2.2. Sistemas orgânicos e supramoleculares

Nos últimos anos, componentes eletrônicos e optoeletrônicos feitos de materiais sintéticos orgânicos e sistemas híbridos têm mostrado

Muitos desafios relacionados à engenharia molecular de sistemas orgânicos e supramoleculares têm que ser superados e otimizados

um enorme potencial não só como substitutos aos semicondutores clássicos em certas aplicações, mas também como novas aplicações, sobretudo nas áreas de sensores e médica. Entre as aplicações em que esses novos sistemas podem competir, estão transistores, *chips*, telas de alta resolução, dispositivos fotovoltaicos e similares, memórias Worm (*write once-read many times*), dispositivos foto e eletrocromicos, dispositivos eletroluminescentes e lasers etc.

Para o sucesso dessas aplicações, muitos desafios relacionados à engenharia molecular desses sistemas têm que ser superados e otimizados. Uma das principais dificuldades está no controle dos processos de injeção e de transporte de portadores nesses sistemas. Para isso, fenômenos de interface precisam ser precisamente compreendidos e suas dificuldades superadas. Nos sistemas moleculares orgânicos – não só de pequenas moléculas, mas também de polímeros –, a compatibilidade entre a estrutura de bandas dos contatos elétricos, metais ou óxidos e a estrutura homo-lumo (energia necessária para excitar essas moléculas) é de fundamental importância para mecanismos de injeção de portadores positivos (buracos) e negativos (elétrons). Ao mesmo tempo, é necessário evitar degradações nessas interfaces devido a inúmeros efeitos, entre os quais os mais deletérios são os provocados por microrreações eletroquímicas e por difusão de elementos químicos que compõem os eletrodos (impurezas).

Os mecanismos de transporte (mobilidade e recombinação) são igualmente importantes para o desempenho e tempo de vida dos dispositivos. A proteção (encapsulação) também é fundamental, sobretudo para evitar de-





gradação do composto orgânico devido ao fenômeno de fotooxidação. As propriedades semicondutoras dos sistemas orgânicos são oriundas de efeitos e fenômenos semelhantes aos observados em inorgânicos cristalinos.

**A área de dispositivos supramoleculares orgânicos é estratégica para o Brasil, porque há possibilidades de nichos de mercado para pequenas e médias empresas**

Essa facilidade em modificar as estruturas orgânicas, com reflexo nas propriedades eletrônicas e ópticas, confere versatilidade aos sistemas orgânicos, sobretudo aos poliméricos, porque correlacionam arranjos na configuração e na conformação com estruturas eletrônicas de cadeias, propriedades não existentes em outros sistemas. Essa facilidade de engenharia molecular multiplica as possibilidades de aplicações tecnológicas dos polímeros e dos sistemas supramoleculares deles derivados.

A área de dispositivos supramoleculares orgânicos é estratégica para o Brasil. Em primeiro lugar, porque os custos envolvidos na fase de pesquisa – tanto fundamental quanto tecnológica – são adequados à nossa situação econômica, permitindo, assim, uma competição com os países mais adiantados na área. Em segundo lugar, porque há possibilidades de inúmeras aplicações e, conseqüentemente, muitos nichos de mercado para a atuação de pequenas e médias empresas.

### 3.2.3. Dispositivos optoeletrônicos

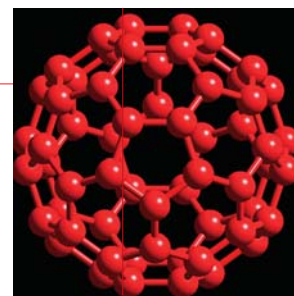
As propriedades semicondutoras exibidas por sistemas orgânicos resultam em elevada eficiência de geração de fótons em experimentos de fotoluminescência, bem como de eletroluminescência. A partir disso, suas aplicações em dispositivos eletroluminescentes é um passo. Os polímeros – devido à

**Outra vantagem dos polímeros reside na flexibilidade dos filmes, que permite confeccionar painéis de tela plana flexíveis**

facilidade de processamento de filmes finos e ao baixo custo de sua produção, aliados a modificações estruturais que resultam em variações das cores emitidas – são também fortes candidatos a essa aplicação. Vale destacar que esses sistemas ‘acendem’ sob tensões de alguns volts, e varrem o espectro desde vermelho até o violeta. Outra vantagem dos polímeros reside na flexibilidade dos filmes, que permite confeccionar painéis (*displays*) de tela plana flexíveis.



Se o efeito de dissociação de pares prevalece sobre a recombinação, essa classe de polímeros tem mostrado potencial como elemento ativo em dispositivos fotovoltaicos. A competição entre os mecanismos de recombinação e a dissociação se dá pelos tempos envolvidos em cada um deles. Nos polímeros citados anteriormente, a recombinação leva vantagem por ser um fenômeno ultra-rápido – abaixo dos trilionésimos ( $10^{-12}$ ) de segundo. Entretanto, se adicionarmos à cadeia polimérica grupos que interagem com o éxciton (o elétron aprisionado em torno de sua própria lacuna) e que estimulam sua dissociação, esse fenômeno passa a dominar, abrindo espaço para a aplicação fotovoltaica. Dispositivos fotovoltaicos de PPV com grupos laterais de moléculas  $C_{60}$  mostraram eficiência de conversão superior a 3%. Trabalhos recentes mostraram estruturas multicamadas de excelente qualidade a partir de emulsão de nanoesferas de polímeros. Esses sistemas supramoleculares podem ser aplicados na confecção de células solares e outros dispositivos optoeletrônicos.



Em paralelo ao sucesso observado em pesquisas de diodos luminescentes (LEDs) orgânicos, têm surgido inúmeras experiências de sucesso com emissão estimulada nesses sistemas orgânicos. Cavidades dielétricas em que o elemento ativo são os orgânicos têm mostrado espectro de emissão laser de boa eficiência e vida relativamente longa.

Para otimizar e expandir as propriedades optoeletrônicas desses sistemas, alterações em sua estrutura química e sua superestrutura morfológica têm sido realizadas com enorme sucesso. Técnicas de deposição permitem uma engenharia molecular que alterna coerentemente sistemas com pequenas variações de *gaps* eletrônicos, interferindo no processo de transporte ou de transferência de carga, bem como nas probabilidades de recombinação e/ou dissociação, conforme as aplicações requeridas.

Sucessos também têm sido verificados na emissão de luz gerada por sistemas de nanopartículas poliméricas

Sucessos também têm sido verificados na emissão de luz gerada por sistemas de nanopartículas poliméricas, cristalinas ou não, dispersas em matriz de polímero transparente, permitindo o aumento de eficiência e eliminando efeitos deletérios de interfaces entre o polímero e os eletrodos. Esses dispositivos levam o nome de SPN-OLEDs (sigla inglesa para nanoesferas de polímero semicondutor para diodos orgânicos emissores de luz).

### 3.2.4. Transistores de filmes finos orgânicos

Os primeiros protótipos de transistores de filmes finos orgânicos foram apresentados no final da década de 1990. Entretanto, o grande entrave para o uso dos orgânicos, principalmente os polímeros, foi sua baixa mobilidade

A técnica por meio de impressora jato-de-tinta imprime sobre um substrato flexível o desenho do circuito com a solução orgânica ativa

eletrônica, que raramente ultrapassava  $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ . Nos últimos anos, sistemas orgânicos têm atingido mobilidades próximas de  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , como o pentaceno cristalino crescido sobre sub-

strato polimérico. Entretanto, essa modalidade ainda é mil vezes menor que a verificada no silício. Muito avanço tem sido obtido na otimização da mobilidade dos poli(3-alkil tiofenos), que foram um dos primeiros polímeros usados na confecção de transistores por efeito de campo (FET).

Devido à facilidade de processamento dos polímeros, muitas técnicas de produção de transistores orgânicos têm sido desenvolvidas e, pelo seu sucesso e baixo custo, são muito promissoras. É o caso da técnica de impressão por meio de impressora jato-de-tinta (*inkjet printing*) de transistores de filmes finos orgânicos (OTFTs). Essa técnica, simples em sua concepção, imprime sobre um substrato flexível o desenho do circuito com a solução orgânica ativa e pode ser usada não só para polímeros semicondutores, mas também para isolantes e condutores, bem como sistemas de nanopartículas. A resolução dessa técnica tem aumentado muito, levando sua aplicação à confecção de circuitos mais complexos baseados em dispositivos orgânicos.

### 3.2.5. Circuitos integrados

A impressão direta de materiais orgânicos em solução na fabricação de dispositivos eletrônicos pode baratear enormemente os custos de produção. O avanço observado na resolução dessa tecnologia mostra a possibilidade de uma nova rota para a fabricação de circuitos integrados de baixo custo.

Já se preparam, com relativo sucesso, as chamadas telas de papel eletrônico, cujo suporte é uma grande área de folha polimérica

Circuitos plásticos flexíveis de alta resolução compõem uma tecnologia emergente que usa um polímero isolante como substrato. Os contatos elé-

tricos são feitos de óxidos – por exemplo, óxido de índio e estanho – e/ou metais evaporados. Na seqüência dessa tecnologia, preparam-se, com relativo sucesso, as telas de papel eletrônico, cujo suporte é uma grande área de folha polimérica sobre a qual é envolvida uma soma de tecnologia de LEDs orgânicos sobre uma matriz ativa controlada por FETs (transistores de efeito de campo) poliméricos.

A engenharia molecular aplicada a dispositivos parece não ter fim, principalmente quando se analisam as inúmeras possibilidades existentes na fabricação de copolímeros, sejam eles aleatórios ou de blocos. Essa atividade requer um entrosamento entre pesquisadores de diferentes formações, ou seja, entre físicos, químicos e engenheiros eletrônicos.

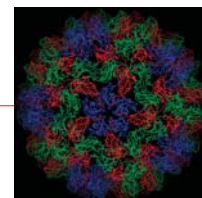
### 3.3. NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA

Nos últimos dez anos, intensificou-se uma revolução científica e tecnológica de enorme abrangência e impacto, a nanociência e nanotecnologia (N&N). Esses neologismos referem-se ao estudo de novas propriedades e ao desenvolvimento de aplicações tecnológicas de objetos e dispositivos que tenham ao menos uma de suas dimensões físicas menor que – ou da ordem de – algumas dezenas de nanômetros.

Nano – anão, em grego – é um prefixo usado para designar um bilionésimo e, assim, um nanômetro (1 nm) corresponde a um bilionésimo do metro. Para efeitos de comparação: o diâmetro médio de um átomo corresponde a cerca de 0,2 nm, o de um fio de cabelo humano a cerca de 50 mil nm, e um **vírus** tem entre 30 a 100 nm de comprimento.

Objetos de dimensões nanométricas são muito comuns na natureza, como, por exemplo, partículas de argila ou os blocos básicos que constituem os seres vivos. Além disso, há muito tempo o homem conseguiu produzir e fazer uso de objetos nessa escala, embora sem reconhecer a natureza submicroscópica de sua estrutura. A tinta nanquim, produzida pelos chineses há mais de 2 mil anos, é constituída de partículas nanométricas de

**Nos últimos dez anos, intensificou-se uma revolução científica e tecnológica de enorme abrangência e impacto: a nanociência e nanotecnologia**



CCAV PICTURE GALLERY

**Objetos de dimensões nanométricas são muito comuns na natureza, como partículas de argila ou os blocos básicos que constituem os seres vivos**

grafite suspensas em água. Os chineses descobriram empiricamente que a adição da goma arábica na emulsão impede que as partículas de grafite se agreguem e precipitem. Como entendido hoje, as moléculas da goma recobrem as partículas de grafite, dessa forma impedindo sua agregação.

Encontramos outro exemplo notável nos vitrais das igrejas da Idade Média. Os artesãos da época descobriram que a dissolução de partículas de ouro preparadas de maneiras diversas dava aos vidros cores variáveis e brilhantes. Como hoje se sabe, é pelo efeito de confinamento quântico que as dimensões das partículas de ouro se tornam determinantes das frequências da luz que podem ser absorvidas ou emitidas por elas. O tamanho também determina o espalhamento de luz realizado pelas partículas, o chamado

espalhamento Mie. Assim, a cor do vitral é determinada pelo tamanho dominante das partículas nele imersas.

Para citarmos exemplos mais recentes, os catalisadores sólidos, que há décadas são intensamente usados pela indústria química, têm sua eficácia comercial associada ao tamanho das partículas dispersas no meio de reação. Grãos de pequenas dimensões têm mais superfície exposta à interação com os reagentes químicos e, portanto, maior eficiência na intermediação das

suas reações. Assim, a busca de redução do tamanho das partículas levou ao natural desenvolvimento de grãos com escala nanométrica.

A N&N é um empreendimento interdisciplinar envolvendo a física, a química, a ciência dos materiais e a biologia. De fato, em dimensões nanométricas, as técnicas e ferramentas de cada uma dessas disciplinas começam a se tornar indistinguíveis, e a sinergia da interação entre elas se torna mais evidente. Assim, por exemplo, o poder crescente dos computadores torna possível explicar, através dos métodos da química quântica, as propriedades de aglomerados atômicos cada vez mais complexos na escala nanométrica e até mesmo antever precisamente as propriedades de objetos ainda não produzidos com essas dimensões. Nessa escala, os fenômenos de natureza inerentemente quântica se manifestam de forma muito rica e, por vezes, surpreendente.

Assim, apresenta-se à nossa investigação uma fenomenologia extremamente diversificada, importante não apenas por suas próprias características, mas também por conter um

**A manipulação da matéria na escala atômica representa uma grande revolução tecnológica, talvez a maior de todas até hoje**



PAMPLIHOS/AMARENS NIO SAPPD PT

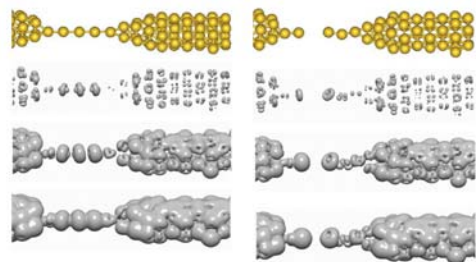
potencial quase ilimitado de aplicações científicas e tecnológicas. Como essa é também a escala em que se manifestam os fenômenos básicos da biologia, temos pela primeira vez a capacidade de manipular os componentes básicos dos seres vivos, desvendar suas propriedades e, enfim, encarar o maior de todos os desafios científicos: a compreensão do que, em última análise, separa a vida dos sistemas físicos não auto-replicantes.

A manipulação da matéria na escala atômica representa uma grande revolução tecnológica, talvez a maior de todas até hoje. Prevê-se que seu impacto possa superar o conjunto daqueles associados ao aparecimento da microeletrônica, das telecomunicações, dos plásticos e das vacinas. A nanotecnologia deve alterar profundamente a forma como produzimos uma grande variedade de coisas, de pneus a computadores, de tecidos a fármacos. O que já se conhece poderá ser produzido de modo mais barato e com melhor qualidade e novas propriedades, e coisas jamais sonhadas poderão ser inventadas e produzidas em escala comercial.

Entre as vantagens decorrentes da disseminação da nanotecnologia, destacam-se a economia de energia – pela produção mais eficiente e mais bem controlada –; benefícios ambientais – os novos artefatos deverão ter maior grau de reciclagem e de durabilidade –; e benefícios para o consumidor – os novos produtos deverão ser mais duráveis e de maior confiabilidade. Até 2015, os bens e serviços de base nanotecnológica deverão ultrapassar US\$ 1 trilhão anuais.

Até 2015, os bens e serviços de base nanotecnológica deverão ultrapassar US\$ 1 trilhão anuais.

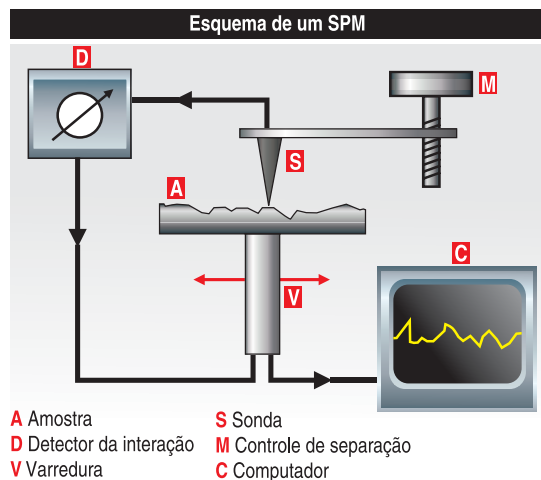
Simulação computacional da quebra de um fio de ouro reproduzindo experimento feito no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP)



A. FAZZIO ET AL. PRP, VOL. 50, 036101 (2003)

### 3.3.1. Principal suporte da N&N

O que gerou a atual emergência do estudo e utilização tecnológica de objetos nanométricos foi a invenção de uma família de instrumentos de visualização e manipulação da matéria: os microscópios de varredura por sonda – conhecidos pela sigla inglesa SPM, de *scanning probe microscope* –; e de equipamentos e técnicas capazes de produzir filmes sólidos, cristalinos ou amorfos, com controle de espessura que também pode atingir a escala do átomo. Os SPMs decorrem todos de variações do microscópio eletrônico de tunelamento – ou ETM, de *electron tunneling microscope* –, inventado em



Microscópio  
de tunelamento

1981 pelo alemão Gerd Binnig e o suíço Heinrich Rohrer, premiados, cinco anos depois, com o Nobel de física pela invenção. A figura mostra o esquema geral de um SPM.

Detalharemos aqui o funcionamento para o caso específico do STM. Uma agulha muito fina, a sonda S, tateia uma amostra A, que pode ser deslocada em um plano horizontal por um mecanismo de varredura V. Um mecanismo M controla o afastamento entre a agulha e a amostra, que corresponde geralmente a uma fração de nanômetro. Todo o sistema é imerso em ambiente de alto vácuo.

Pelo efeito de tunelamento quântico de elétrons, aparece uma corrente elétrica entre a sonda e a amostra que é medida pelo detector D. Um mapa da corrente de tunelamento em função da posição horizontal da sonda sobre a amostra é registrado no computador C, que, a partir daí, constrói uma imagem da superfície da amostra com resolução em escala atômica.

Em um outro tipo de SPM, o microscópio de força atômica – ou AFM, de *atomic force microscope* –, o que se mede a cada ponto é a força entre a sonda e a amostra. O AFM revelou ser um instrumento capaz de manipular a matéria na escala atômica, ou seja, pelo seu uso um átomo ou molécula pode ser retirado de uma superfície ou ali ser colocado, em um local pré-estabelecido. Um exemplo desse controle é mostrado na figura a seguir, que também ilustra a capacidade de visualização individual dos

**Um único átomo já pode ser retirado de uma superfície e recolocado no mesmo local**

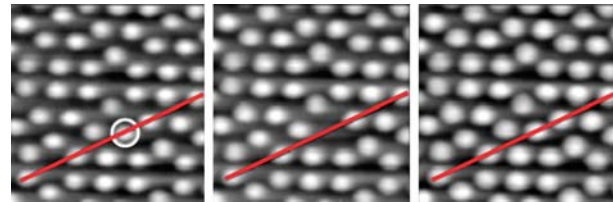
átomos. Um único átomo é retirado da superfície de um monocristal de silício e recolocado no mesmo local.

Entre as técnicas modernas de produção de filmes finos, destaca-se a epitaxia por feixe molecular – MBE, de *molecular beam epitaxy*. Sob condições de ultra-alto vácuo ( $10^{-11}$  torr), feixes moleculares são lançados sobre um substrato monocristalino aquecido a algumas centenas de graus celsius, do que resultam filmes monocristalinos de alta qualidade. A técnica de MBE tem sido mais intensamente utilizada para a produção de heteroestruturas de camadas alternadas de semicondutores distintos. O efeito Hall quântico fracionário – FQHE, na sigla inglesa – foi descoberto



em 1982 pelo sino-americano Daniel Tsui e o alemão Horst Störmer em uma heteroestrutura de camadas alternadas de GaAs e AlGaAs produzidas por MBE. A descoberta rendeu a eles o Nobel de física de 1998.

O FQHE é hoje ainda um dos mais misteriosos fenômenos da natureza. Ele se manifesta quando elétrons, atuando conjuntamente em um campo magnético intenso, podem formar novos tipos de ‘partículas’, com cargas efetivas que são frações da carga do elétron.



Um átomo é retirado e, depois, recolocado sobre uma superfície de silício

### 3.3.2. Dois métodos de nanofabricação

Há duas formas de se produzir sistemas de escala nanométrica. A primeira, denominada de cima para baixo (*top-down*), é uma evolução natural dos processos de fabricação da microeletrônica. Por métodos litográficos, dispositivos nanométricos são produzidos sobre uma pastilha de dimensões macroscópicas. Muito se tem avançado nesse campo, principalmente por litografia usando feixes de elétrons altamente focalizados.

Há, entretanto, uma visão equivocada sobre esse tipo de tecnologia, a de que nanorrobôs auto-replicantes poderiam produzir em quantidades industriais máquinas e artefatos nanométricos. Essa abordagem – difundida principalmente pelo engenheiro norte-americano Eric Drexler e seu Foresight Institute –, imagina a construção de máquinas que seriam capazes de reproduzir em escala

**Há uma visão equivocada sobre a nanotecnologia: a de que nanorrobôs auto-replicantes poderiam fabricar, em escala industrial, artefatos nanométricos**

de nanômetros o funcionamento do mundo macroscópico. Assim, por exemplo, a desobstrução de artérias poderia vir a ser feita por nanorretroescavadeiras que retirariam o acúmulo das indesejáveis placas de gordura, enquanto nanorrobôs-dentistas se encarregariam do tratamento e reparação de cáries dentárias.

Por outro lado, uma escola diferente de pensamento considera que efeitos de viscosidade e a densidade relativa dos sistemas aquosos passariam a



ser dominantes no limite nanoscópico, impedindo que a operação mecânica de máquinas e dispositivos ocorresse à semelhança do observado no mundo macroscópico. Assim, exemplos concretos de sistemas nanométricos funcionais deveriam ser buscados na química e na biologia, nas quais de fato já existem: os sistemas biológicos processam, armazenam e controlam o fluxo de informações através de moléculas, naturalmente formando estruturas mais complexas a partir de blocos mais simples.

Nessa visão, defendida pelos químicos norte-americanos Richard Smalley e George Whitesides, entre outros, objetos e dispositivos nanométricos

Uma deficiência de difícil superação na manipulação da matéria usando microscópios de varredura por sonda é sua lentidão inerente

deveriam ser construídos de baixo para cima (*bottom-up*), respeitando as interações moleculares e a química de sistemas aquosos. Sistemas poliméricos auto-organizados – tam-

bém ditos automontados – de crescente complexidade podem ser hoje obtidos em laboratório, e aplicações tecnológicas já começam a ser introduzidas com base em suas propriedades especiais.

Outra forma de se construir sistemas nanométricos de baixo para cima apela para a manipulação da matéria na escala atômica usando SPM. Uma deficiência de difícil superação neste último método é sua lentidão inerente. Os nanodispositivos têm de ser fabricados um a um em processos demorados.

### 3.3.3. Auto-organização na escala nanométrica

A auto-organização de sistemas que se desenvolveram ou existem fora do equilíbrio termodinâmico é um fenômeno de surpreendente ubiquidade na natureza, e seu entendimento e sua exploração tecnológica têm capturado o interesse da comunidade científica. Na escala nanométrica, a auto-organização se exhibe de forma especialmente diversificada. Os cientistas têm buscado, com grande sucesso, identificar as condições físicas e químicas em que ocorre a auto-organização.

Os cientistas têm buscado, com grande sucesso, identificar as condições físicas e químicas em que ocorre a auto-organização

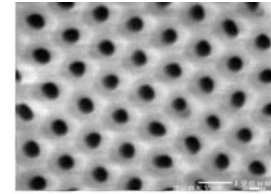
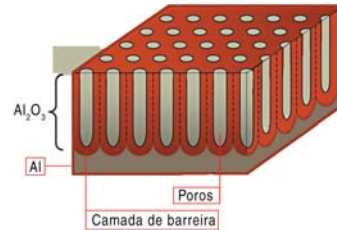
Muitos sistemas auto-organizados compõem o universo da N&N. Em especial, os métodos de síntese química passaram a incorporar o

controle das condições em que materiais nanoestruturados por auto-organização podem ser gerados. A química e a física combinaram seus métodos para desenvolver novos processos de síntese sob alto-vácuo e sob outras condições altamente elaboradas e avançadas. A figura acima ilustra um desses novos processos de auto-organização.

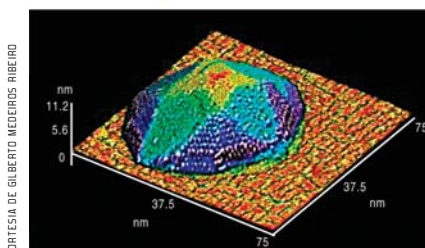
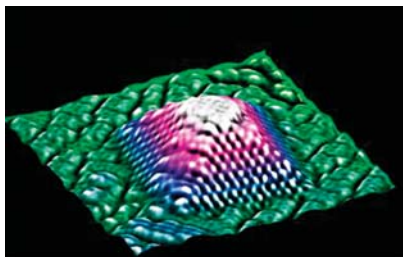
Ao se passar uma corrente elétrica por uma heteroestrutura de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sobre alumínio – imersa em solução de óxido de cromo em ácido fosfórico – a primeira é corroída gerando nanoporos cilíndricos de diâmetro uniforme e arranjados em uma perfeita rede hexagonal. Essa nanoestrutura está sendo utilizada como molde para a produção de nanotubos de carbono – que serão descritos mais adiante – de diâmetros uniformes, importantes para várias aplicações.

Outro exemplo importante de auto-organização são as caixas quânticas – partículas monocristalinas de poucos nanômetros em cada dimensão – produzidas quando a técnica de MBE é usada para se depositar uma camada finíssima de germânio sobre um cristal de silício, como mostra a figura abaixo.

Tanto essas caixas quânticas quanto outras similares envolvendo semicondutores compostos têm sido objeto de várias aplicações avançadas, e já são usadas, por exemplo, na construção de lasers para telecomunicações ópticas. Caixas quânticas são também consideradas como sistemas promissores para permitir o controle do estado de *spin* de um único elétron no tempo suficiente para apli-



Nanoporos auto-organizados por anodização de alumina em solução de óxido de cromo em ácido fosfórico. À direita, vê-se uma imagem por MET da alumina porosa. Os poros são uniformes e arranjados em uma rede hexagonal



CORTESIA DE GILBERTO MEDEIROS RIBEIRO

Por crescimento, usando a técnica de MBE, átomos de germânio sobre um substrato de silício podem se auto-organizar formando caixas quânticas que são pirâmides (acima) ou domos de dimensões nanométricas. Essas caixas têm sido aplicadas em comunicações ópticas e investigadas visando a aplicações em computação quântica

cações em computação quântica, o que é objeto de intensa investigação.

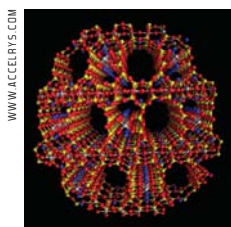
Materiais nanoestruturados por auto-organização estão sendo utilizados como catalisadores de alto desempenho. Entre eles, se destacam as zeólitas, compostos complexos contendo silício, alumínio, oxigênio e uma variedade de outros elementos.

Hoje, mais de 18 milhões de barris de petróleo são refinados diariamente por catálise via zeólitas, com grande economia de custos e de energia, bem como melhoria na qualidade dos produtos finais

Embora existam naturalmente, como parte de diferentes minérios, as zeólitas podem ser também sintetizadas sob condições de altas pressões e a temperaturas de algu-

mas centenas de graus celsius. As zeólitas apresentam poros com dimensão de fração de nanômetro. Recentemente, foram sintetizadas zeólitas com composição e dimensão de poros que as tornam altamente seletivas em suas funções catalisadoras.

Até o momento, o uso economicamente mais significativo das zeólitas se dá no refino do petróleo e na síntese de combustíveis líquidos. Hoje, mais de 18 milhões de barris de petróleo são refinados diariamente por catálise via zeólitas, com grande economia de custos e de energia, bem como melhoria na qualidade dos produtos finais. A Nova Zelândia, que é rica em gás natural e pobre em petróleo, produz, hoje, uma parte substancial dos seus combustíveis líquidos a partir do gás natural pela ação catalisadora de zeólitas.



WWW.ACCELRY5.COM

### 3.3.4. Nanotubos de carbono

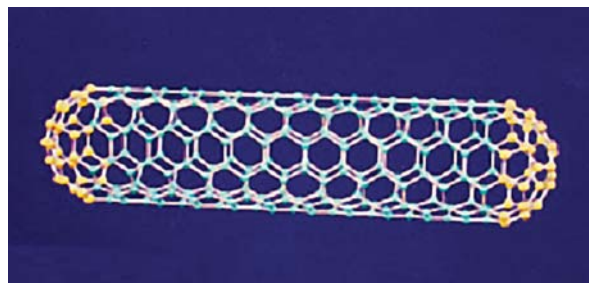
Novas formas de composição do carbono em objetos nanométricos têm sido objeto de grande interesse. Uma delas são os fullerenos – principalmente a molécula  $C_{60}$ , descobertos em 1985 pelos norte-americanos Richard Curl Jr. e Richard Smalley, bem como pelo britânico Harold Kroto, o que lhes rendeu o Nobel de química de 1996. Os mais importantes desses objetos são os

nanotubos de carbono, descobertos em 1991 pelo físico japonês Sumio Iijima.

A mais importante nova forma de carbono são os nanotubos, folhas de grafite que se enrolam para formar um fino tubo, à semelhança de um espaguete

Os nanotubos de carbono (NC) são folhas de grafite que se enrolam para formar um fino tubo – à semelhança de um espaguete – com

diâmetro tipicamente de dois a três nm e comprimentos que superam a escala de microns. No caso dos nanotubos de uma única parede – que são os mais interessantes –, o espaguete é formado por uma única folha de grafite, como ilustra a figura.



Nanotubo de carbono de uma única parede

Esses nanotubos são caracterizados por dois parâmetros, o diâmetro do tubo e sua helicidade, ou seja, o ângulo de orientação dos hexágonos de carbono em relação ao eixo do tubo. Para as aplicações mais avançadas, desejam-se nanotubos com diâmetro e helicidade uniformes, e grandes esforços estão sendo dirigidos visando ao controle desses dois parâmetros no processo de síntese.

Os NC têm propriedades bastante especiais, a começar por suas características mecânicas. Com eles, podem ser fabricados sólidos quatro vezes mais leves e pelo menos cinco vezes mecanicamente mais resistentes – em termos do módulo de Young – que o aço, o que poderá ter aplicações importantes na indústria como um todo.

Dependendo do diâmetro e da helicidade, os NC podem ser semicondutores ou metálicos, o que representa uma flexibilidade adicional

**Com nanotubos, podem-se fabricar sólidos quatro vezes mais leves e pelo menos cinco vezes mais resistentes que o aço**

útil para aplicações em dispositivos nanoeletrônicos. Com NC metálicos, também se produzem emissores termiônicos de desempenho superior e sondas para SPM que permitem imagens mais precisas.

Embora já tenham sido também produzidos diodos e transistores baseados em um único NC, aplicações de NC na nanoeletrônica apresentam uma dificuldade intrínseca que só recentemente vem sendo ultrapassada: apenas os NC semicondutores se prestam a esse uso, mas, em todos os processos de síntese de NC já desenvolvidos, as variedades semicondutoras e metálicas são produzidas aleatoriamente, sem um maior grau de controle sobre sua distribuição. Recentemente, no entanto, técnicas vêm sendo desenvolvidas seja para a destruição seletiva dos NC metálicos, seja para identificar automaticamente os nanotubos semicondutores.

Em janeiro de 2004, pesquisadores da Universidade da Califórnia, em Berkeley,

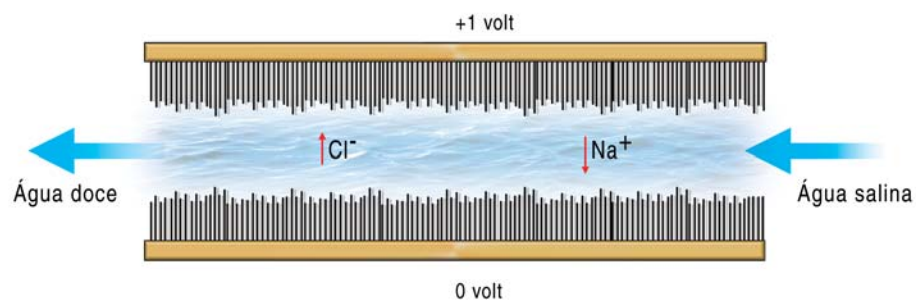
anunciaram o desenvolvimento do primeiro circuito integrado híbrido em um *chip* de silício contendo transistores de efeito de campo em que o canal de condução é um NC semiconductor. Para chegar a esse dispositivo, os cientistas dominaram uma técnica de sintetizar NC diretamente sobre a pastilha de silício.

Com nanotubos de carbono, já são fabricados dessalinizadores de água que podem vir a ter enorme importância econômica para países como o Brasil

Com NC, já são fabricados dessalinizadores de água que podem vir a ter enorme importância econômica para países como o Brasil. O esquema desses dessalinizadores é

mostrado na figura abaixo.

Dessalinizadores de água baseados em nanotubos de carbono



NC são colados às placas metálicas de um capacitor – como se fossem pêlos em uma escova –, e uma tensão elétrica da ordem de 1 volt é aplicada ao capacitor. Quando a água salgada circula no interior do dispositivo, os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  são atraídos para placas distintas e adsorvidos pelos NC, que têm enorme área específica – da ordem de  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  – e, portanto, grande capacidade de adsorção. Dessa forma, a água que é coletada do outro lado é ‘doce’, isto é, de boa potabilidade, podendo ser usada para consumo humano ou industrial. Quando a capacidade de adsorção dos NC é eventualmente saturada, basta reverter a polaridade da tensão nas placas para retirar os íons adsorvidos e regenerar o sistema à sua capacidade inicial. Nesse processo de limpeza dos nanotubos, a água que sai é ainda mais salgada que a que entra, e deve portanto ser devolvida ao mar.

O custo energético estimado para dessalinizar com nanotubos de carbono é de apenas 0,5 kWh por  $\text{m}^3$ , valor muito menor que o de qualquer outra técnica alternativa

O custo energético estimado para esse processo de dessalinização é de apenas 0,5 kWh por  $\text{m}^3$ , valor muito menor que o de qualquer

outra técnica alternativa. Uma vez que processos mais baratos de produção em grande escala de NC venham a ser desenvolvidos, o custo associado ao uso dessa técnica de dessalinização da água do mar poderá vir a ser tão pequeno que torne esse método competitivo para o fornecimento de água aos consumidores de uma grande cidade brasileira litorânea

### 3.3.5. Nanoestruturas com magneto-resistência gigante

O fenômeno da magneto-resistência – ou seja, do aumento da resistividade elétrica de um material sujeito a um campo magnético – é conhecido desde o século 19. Em 1988, Mário Baibich, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e colaboradores descobriram que o efeito de magneto-resistência pode ser enormemente amplificado em heteroestruturas de materiais ferromagnéticos formadas por multicamadas com espessuras de poucos átomos, em um fenômeno que veio a ser denominado de magneto-resistência gigante – ou GMR, na sigla inglesa.

Os atuais discos rígidos de computadores, capazes de armazenar centenas de gigabytes, são baseados em fenômeno descoberto por um físico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Em poucos anos, a GMR passou a ser utilizada para a construção de sistemas muito densos de memória, e os atuais discos rígidos de computadores, capazes de armazenar centenas de gigabytes, são baseados na GMR.

### 3.3.6. N&N no diagnóstico e tratamento médicos

A área de produção de fármacos também está sendo revolucionada pela nanotecnologia. Algumas das inovações nessa área estão simplesmente ligadas ao fato de que cerca da metade dos compostos com ação farmacológica não é solúvel em água. Portanto, quando esses fármacos são preparados na forma convencional, não são absorvidos pelo organismo. No entanto, se esses compostos são obtidos de maneira nanogranulada, sua ação fica multiplicada, seja porque sua solubilidade fica altamente amplificada, seja porque, mesmo no estado sólido, eles podem ser diretamente absorvidos pelos tecidos doentes. Em realidade, algumas drogas mais eficientes estão



Dizer que a nanotecnologia está dando origem a uma geração de drogas 'inteligentes' passa a ser bem mais do que simples metáfora

sendo desenvolvidas especificamente para circular no sangue como partículas nanométricas sólidas capazes de serem seletivamente absorvidas por determina-

dos tecidos, como o de células cancerosas, por exemplo.

O pequeno tamanho dessas partículas farmacologicamente ativas significa também que a barreira sangue-cérebro pode ser atravessada por elas, permitindo pela primeira vez o tratamento sistêmico direto de tumores cerebrais. A especificidade da interação das nanopartículas com as células malignas reduz drasticamente possíveis efeitos colaterais deletérios. Nesse quadro, dizer

que a nanotecnologia está dando origem a uma geração de drogas 'inteligentes' passa a ser bem mais do que simples metáfora.

Conectando-se nanopartículas magnéticas a células cancerosas, seria possível aplicar um campo magnético para movimentar essas partículas e aquecê-las o suficiente para matar a célula a que estão ligadas

A perspectiva de utilização de nanopartículas magnéticas biocompatíveis para diagnóstico e tratamento de doenças tem crescido nos últimos anos. Esses materiais poderiam

atuar como marcadores específicos, agentes de transmissão de drogas para regiões específicas do organismo e mesmo como elementos ativos de tratamento. Por exemplo, conectando-se nanopartículas magnéticas a células cancerosas, seria possível aplicar um campo magnético alternado suficientemente forte para movimentar essas partículas e aquecê-las o suficiente para matar a célula a que elas estão ligadas. Além disso, o desenvolvimento de novos sensores magnéticos em breve permitirá novas formas de diagnóstico, como a magnetoencefalografia, hoje proibitiva por causa de seu custo.

### 3.3.7. Partículas magnéticas porosas

EXXON VALDEZ OIL SPILL TRUSTEE COUNCIL



O uso de partículas magnéticas altamente porosas para a remoção de petróleo de águas contaminadas por acidentes de vazamento também está sendo desenvolvido. As partículas, mais leves que água, são espalhadas sobre a área contaminada e seus poros absorvem o óleo. As partículas são depois removidas, usando-se imãs possantes, por atração magnetostática.



A técnica já está dominada, e espera-se que, em breve, se torne economicamente viável na limpeza de grandes áreas de água contaminada. No Brasil, essa técnica está sendo desenvolvida no Instituto de Física da Universidade de Brasília.

### 3.4. METROLOGIA CIENTÍFICA

A metrologia é a ciência das medições e da avaliação de suas incertezas. O cerne da metrologia está na validação dos resultados e no registro da precisão e das limitações de uma medida. Para isso, é necessário estabelecer convenções sobre como definir unidades e sobre os mecanismos práticos para a realização dessas unidades.

O Brasil participa da Conferência Geral de Pesos e Medidas e segue suas recomendações. Entre elas, a que estabelece que são sete as grandezas de base definidas no Sistema Internacional de Unidades: o metro (unidade de comprimento), o quilograma (massa), o segundo (tempo), o kelvin (temperatura), o ampère (corrente elétrica), o mol (quantidade de matéria) e a candela (radiação).

Todas as unidades, com exceção do quilograma, são hoje realizadas experimentalmente em laboratórios de referência primária, a partir de fenômenos físicos bem conhecidos. A tendência moderna da metrologia física busca vincular seus padrões a constantes físicas fundamentais e realizá-los através de experimentos que envolvam fenômenos físicos.



INFO UFRN AC AT

**Um sistema metroológico de alta qualificação e credibilidade é instrumento essencial para facilitar o acesso e a aceitação de produtos brasileiros no exterior**

#### 3.4.1. Linguagem comum e padronizada

A área metroológica tem enorme importância na sociedade moderna ao estabelecer uma linguagem comum e padronizada, bem como procedimentos que assegurem a confiança nos resultados de medições. O registro das características físicas de produtos, o controle dinâmico de processos, a proteção da saúde e do meio ambiente, a confiabilidade dos resultados da

experimentação científica e a confiabilidade nas transações comerciais dependem de uma metrologia bem estabelecida. Dela, portanto, depende a sociedade para sua segurança e bem-estar.

Nas relações internacionais, um sistema metrológico de alta qualificação e credibilidade é instrumento essencial para facilitar o acesso e a aceitação de produtos brasileiros no exterior, bem como impedir a entrada de produtos importados que não atendam às exigências de qualidade do mercado brasileiro. O reconhecimento internacional da infra-estrutura de medições de um país dá-se em função da rastreabilidade das medidas, que permite estabelecer a cadeia de comparações que levou à sua obtenção. Graças a isso, é possível, em última análise, relacionar qualquer medida com os padrões primários aceitos internacionalmente. A credibilidade do sistema

depende primordialmente da competência científica envolvida.

**O estabelecimento de uma sólida estrutura metrológica é fundamental para qualquer Estado moderno**

O estabelecimento de uma sólida estrutura metrológica é, portanto, fundamental para qualquer Estado moderno. Essa estrutura deve ser

construída a partir de uma instituição nacional de referência, o Instituto Nacional de Metrologia (Inmetro), no caso brasileiro, e deve procurar cobrir todo o espectro de atividades ligadas à metrologia, desde a ciência básica – que estabelece padrões metrológicos e cria novos paradigmas ao desbravar áreas na fronteira do conhecimento –, passando pela tecnologia de ponta – que exige novas capacitações industriais –, até as atividades aplicadas –, como os serviços de calibração e ensaios.

### 3.4.2. Necessidades e propostas

A maior necessidade brasileira na área de metrologia é a de atrair pessoal de alta qualificação científica e tecnológica. Isso é essencial para transformá-la em área de ponta que atenda às exigências de uma sociedade que pretende se tornar plenamente industrializada. É preciso povoar a metrologia com

**A maior necessidade brasileira na área de metrologia é a de atrair pessoal de alta qualificação científica e tecnológica**

juvêns doutores egressos de nossas melhores universidades, para que eles possam exercer seus talentos em atividades ligadas à ciência, à tecnologia e à inovação. E para que o façam

mais perto do setor industrial, que, com esse aporte de qualidade em área tão próxima como a metrologia, será estimulado a incluir pesquisa e desenvolvimento em sua agenda, gerando empregos e ampliando mercados.

Recomenda-se um programa de fomento na área da metrologia para induzir um salto qualitativo na capacidade de conceber e realizar experimentos, bem como ações científicas e tecnológicas na fronteira do conhecimento que incorporem a linguagem e as práticas metrológicas internacionalmente aceitas.

Programas de intercâmbio científico são essenciais para o aprimoramento de qualidade em metrologia. Esses intercâmbios deverão envolver universidades, centros de pesquisa, institutos metrológicos e institutos tecnológicos, permitindo um fluxo constante de visitantes do mais alto nível de qualificação e estimulando a formulação de projetos conjuntos com enfoque metrológico.

### 3.5. INSTRUMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Os avanços científicos estão sempre associados à invenção de novos instrumentos ou ao uso inovador e à extensão de sensibilidade de instrumentos já existentes. Por outro lado, os instrumentos concebidos para um determinado uso científico, com frequência, acabam tendo aplicações práticas que não haviam sido sequer percebidas por seus inventores. Os exemplos são muitos e, para citar só alguns, pode-se listar a invenção do laser, produto do estudo de propriedades inusitadas da interação entre matéria e luz que hoje encontra aplicações numa gama extensa das atividades do cotidiano. Detectores de partículas e de radiação encontram hoje extensivas aplicações em equipamentos de diagnóstico médico.

Quando se pensa em equipamento científico, um equipamento físico vem à mente. No entanto, atualmente, o *software* é parte integrante do equipamento. O melhor exemplo que pode ser citado é o do *World Wide Web*, um modo de intercomunicação entre computadores de diferentes modelos e sistemas operacionais. Foi inventado no CERN, laboratório europeu de física das partículas, para dar apoio às equipes que estudavam a estrutura micros-

**Instrumentos concebidos para um determinado uso científico podem acabar tendo aplicações que não haviam sido sequer percebidas pelos seus inventores**

Hoje, detectores e aceleradores de partículas são usados, respectivamente, no diagnóstico médico e na esterilização de alimentos, por exemplo

cópica da matéria. Sistemas de aquisição, integração e visualização de dados são componentes essenciais de equipamentos científicos complexos.

Uma característica marcante do desenvolvimento de instrumentação científica é a imprevisibilidade das aplicações posteriores de equipamentos desenvolvidos para um determinado experimento científico. Detectores de partículas são usados, hoje, extensivamente em sistemas de diagnóstico médico, como a tomografia por raios X. Aceleradores de partículas são usados na esterilização de alimentos.

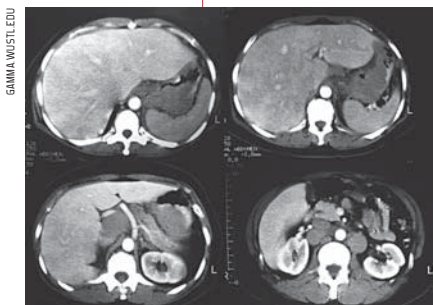
Projetos científicos, quando exploram os limites do conhecimento, levam, com frequência, ao desenvolvimento de novas formas de medida, que, por sua vez, impulsionam novos tipos de instrumentação. O desenvolvimento da instrumentação exige a cooperação entre físicos e profissionais de outras áreas, com competências distintas, como biólogos, engenheiros, pesquisadores da área de informática, por exemplo.

Neste início de século, nos países mais avançados cientificamente, o *know-how* de concepção e realização de instrumentos avançados não está concentrado em grupos ou instituições, ele está disperso pelas universidades, centros de pesquisas e, o que talvez seja mais relevante, fragmentado entre diferentes disciplinas. O desafio com que geralmente se defrontam cientistas com projetos na fronteira do conhecimento é a administração dessa diversidade.

Em processos industriais, o tema instrumentação tem uma linha contínua que vai dos princípios físicos subjacentes à operação de um instrumento à sua produção em série. Num extremo, estão os instrumentos que têm impacto no cotidiano, como um aparelho de tomografia, um monitor de qualidade de produtos numa indústria e um sensor de concentração de

oxigênio numa lagoa exaurida pela poluição. No outro, o detector de partículas microscópicas produzidas em aceleradores, o nanorrolamento construído com nanotubos de carbono ou um sensor do balanço de gás carbônico produzido numa floresta.

De um lado dessa linha contínua, há o processo de inovação durante a constante melhora da qualidade de um instrumento, com sua evolução gradativa, bem como



a produção de patentes, sendo o lócus desse processo caracteristicamente o setor privado. Os investimentos para isso vêm substancialmente do setor privado, eventualmente com algum mecanismo de estímulo pelo estado. Quando essas duas fontes de recursos estão integradas, os montantes são bem significativos, embora dispersos pelo setor produtivo. Ao longo desse processo, há um número significativo de pessoas envolvidas, como engenheiros, técnicos, operadores de equipamentos, pessoal administrativo e um pequeno número de pessoas com formação científica.

Do outro lado da linha contínua, estão a invenção, os saltos qualitativos estimulados pelas exigências do avanço científico, a combinação inusitada de equipamentos convencionais. A fonte primordial de financiamento desse lado é o estado, através de suas agências de fomento científico. O volume de recursos é muito menor se comparado ao outro lado da linha, porém mais concentrado em projetos bem definidos. Aqui, a pirâmide de pessoal é invertida, um grande número de doutores e estudantes, além de um número menor de pessoal com qualificação técnica.

Na área de instrumentação, os saltos qualitativos são estimulados pelas exigências do avanço científico, a combinação inusitada de equipamentos convencionais

### 3.5.1. Ações afirmativas

Há várias áreas envolvidas na instrumentação, para a qual uma ação afirmativa por parte dos órgãos de C&T pode ter um efeito multiplicativo, beneficiando toda a sociedade. Mencionamos, aqui, alguns exemplos, sem ter a pretensão de exauri-los:

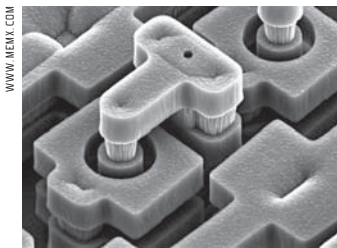
- i) sistemas de análises clínicas – uma das áreas em que instrumentos concebidos para outros fins encontram enorme aplicação são os sistemas de diagnóstico médicos. Os exemplos mais flagrantes são encontrados em sistemas de imagem internas, como a tomografia, a ressonância nuclear magnética, a tomografia por emissão de pósitrons. O Brasil tem bastante experiência nessas técnicas, mas o investimento para levá-las a novos patamares de eficiência e custo é plenamente justificável. Novas ferramentas de integração



WWW.CANCEROCI.ORG

e processamento de imagens são áreas que envolvem muitas disciplinas diferentes e têm um retorno bastante visível para o bem-estar da população. O desenvolvimento de novas técnicas de imagens – por exemplo, espectroscopia de ressonância magnética, técnicas para a exploração do funcionamento do cérebro e telemetria do funcionamento fisiológico – oferece a oportunidade de avanços científicos, bem como impactos para a saúde. Ferramentas para análise e acompanhamento de dados epidemiológicos têm também um impacto imediato na saúde do cidadão;

- ii) datação arqueológica e paleontológica – a datação precisa da ocupação humana no Brasil no período pré-colombiano – em particular, na região do Amazonas – tem grande importância para o entendimento do padrão de dispersão de seres humanos pelo planeta. Os sítios arqueológicos de Monte Alegre (Pará), da serra da Capivara (Piauí) e da chapada do Araripe (Ceará), assim como os sambaquis espalhados ao longo da costa brasileira, oferecem aos cientistas brasileiros uma riquíssima coleção de fósseis. Sua exploração plena exige técnicas apuradas de datação e de análise físico-química de materiais;



- iii) sistemas microeletromecânicos – os chamados MEMs estão penetrando intensivamente várias áreas industriais. Esses processos usam como base os materiais e os processos de microeletrônica e trazem as vantagens da miniaturização e do uso de múltiplos componentes, do desenho à construção de microestruturas e sistemas eletromecânicos. A estimativa é que a indústria associada aos MEMs

**A estimativa é que a indústria associada aos MEMs tenha movimentado de US\$ 2 bilhões a US\$ 5 bilhões em 2001, com a previsão de ter atingido de US\$ 8 bilhões a US\$ 16 bilhões em 2004**

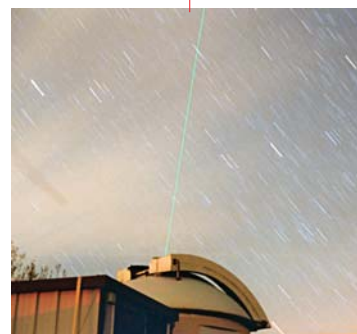
tenha movimentado de US\$ 2 bilhões a US\$ 5 bilhões em 2001, com a previsão de ter atingido de US\$ 8 bilhões a US\$ 16 bilhões em 2004. O desenvolvimento de instrumentação baseada em MEMs

tem um grande potencial de aplicações, juntando o processamento da microeletrônica com sistemas eletromecânicos, em microssoensores e microatuadores inteligentes;

- iv) sensoriamento remoto – área que envolve um grande número de aplicações, indo da previsão meteorológica ao mapeamento

da produção agrícola e à identificação de danos causados por várias formas de poluição. As ferramentas para essas atividades vão dos radares e lidars – radares que operam na faixa do ultravioleta, do visível e do infravermelho – aos sistemas GPS. Radares para aplicações na previsão do tempo – como o radar Doppler –, apesar de já serem tecnologia consolidada, ainda podem ter aplicações especiais. Instrumentação para monitoramento da radiação eletromagnética – em particular na região de dezenas de gigahertz (GHz) – são ferramentas necessárias para a segurança do País. Lidars são ferramentas mais recentes de ampla utilização em inúmeras aplicações. Equipamentos de baixo custo, baseados em lidars de estado sólido, podem ser usados no monitoramento de áreas extensas a baixo custo. Aplicações no monitoramento de degradação ambiental causada por agentes poluentes, no monitoramento de colheitas, no sensoriamento da qualidade de mananciais aquíferos, na leitura das condições atmosféricas para a previsão meteorológica local mais precisa são algumas das possibilidades dos lidars, que ganham uma nova janela de aplicações com o advento de lasers de estado sólido azuis. Programas como o monitoramento da dinâmica dos gases atmosféricos na Amazônia é um foco do desenvolvimento de sensores desta categoria;

- v) agroindústria – a agregação do uso de sensores e a tecnologia de microssistemas são ferramentas que podem aumentar substancialmente a eficiência da produção agropecuária. Avanços científicos no campo da biotecnologia – em particular na genômica, na análise de patologia molecular de vegetais e na bioinformática –, bem como a agregação de sistemas de controle dinâmico de processos complexos que integram um fluxo intenso de dados, demandam um acervo de instrumentos com intenso conteúdo científico. A dimensão da agropecuária brasileira justifica um esforço para consolidar a liderança científica mundial nessa área, lastreada no desenvolvimento de ferramentas instrumentais para a implantação dos avanços científicos e tecnológicos no campo;
- vi) telecomunicações – essa área é parte da infra-estrutura de muitos



RICHARD BRITTO-CELESTE COLLABORATION



dos sistemas descritos neste subcapítulo e oferece aplicações que transcendem aquelas comerciais de interesse *stricto sensu*. Todos os sistemas de telemetria de aquisição de dados distribuídos são assunto das telecomunicações. O apoio ao desenvolvimento de sistemas avançados de telecomunicações em experimentos científicos que envolvam uma dispersão das fontes de aquisição de dados envolve pesquisas e desenvolvimento com grande potencial para aplicações posteriores. Alguns exemplos de temas em que poderá haver interesse no desenvolvimento de instrumentação específica: redes de telecomunicações de fibras óticas; redes de telecomunicações em ondas milimétricas, ou seja, aquelas com comprimento de onda na faixa de milímetros; redes de telecomunicações com satélites; codificação e compressão de dados; arquitetura de sistemas informáticos distribuídos para o tratamento e a gestão de informação multimídia;

- vii) biotecnologia – o Brasil tem realizado notáveis progressos na área da biotecnologia e é considerado hoje um dos líderes mundiais nessa área. A consolidação dessa liderança, bem como a transformação dos avanços científicos em aplicações práticas para o cotidiano dos cidadãos, implicam também a competência na construção de instrumentação específica para os problemas da área. A gestão

**O Brasil tem realizado notáveis progressos em biotecnologia e é considerado, hoje, um dos líderes mundiais nessa área**

dessa competência tem como potencial consequência a implantação de uma indústria associada. A gama de problemas em que a instrumentação comercial não está ainda disponível

é bastante ampla e difícil de singularizar. Essa é uma área em que a associação de biólogos, físicos, químicos, engenheiros e cientistas da informação é essencial;

- viii) sistemas de aquisição de dados e controle remoto – a integração de um grande número de sensores – cobrindo regiões geográficas extensas ou uma variedade grande de dados – tem seu gargalo no sistema de comunicações e na gestão de modelos coerentes dos fenômenos medidos;
- ix) sensores químicos e biológicos – o desenvolvimento de sensores químicos e biológicos tem uma repercussão clara para a segurança

da população. No entanto, suas aplicações estão associadas a muitos dos outros temas mencionados neste subcapítulo. O desenvolvimento de microssensores, de analisadores químicos, de espectrômetros e de analisadores de materiais biológicos tem ação que transcende as aplicações para as quais foram concebidos. Suas aplicações industriais são claras e têm um escopo bem amplo de utilidade. A consolidação de *expertise* na concepção e implementação desse tipo de instrumento tem um papel estrutural nos programas de inovação do País;

- x) Processamento de alimentos – o processamento de alimentos envolve hoje tecnologia avançada para assegurar a conservação e as boas condições sanitárias dos alimentos consumidos pela população. Uma das tecnologias que envolvem um conhecimento científico avançado é a preservação de alimentos pela irradiação, tipicamente usando fontes radioativas – como cobalto 60 ou césio 137 – ou irradiação por feixe de elétrons produzidos por aceleradores até  $10^6$  elétrons-volt (1 MeV). Essas tecnologias, inventadas há muito tempo, sofrem constantes aperfeiçoamentos, superando as limitações de sua aplicação. A tecnologia mais recente nesse setor é a irradiação por raios X. A existência de uma moderna indústria de processamento de alimentos no País justifica um investimento em tecnologias avançadas, desenvolvidas a partir de avanços científicos de natureza básica. A gama de tecnologias úteis nessa área se sobrepõe a outros temas desta lista;
- A gestão de águas é um problema que tem uma prioridade premente em todas as sociedades modernas, mesmo naquelas com uma abundância de oferta, como no caso do Brasil
- xi) qualidade da água – a gestão de águas é um problema que tem uma prioridade premente em todas as sociedades modernas, mesmo naquelas com uma abundância de oferta, como no caso do Brasil. O monitoramento das águas, tanto para o consumo humano quanto para usos agrícolas ou industriais, é um instrumento essencial nessa gestão. O uso de sensoriamento remoto, de sensores químicos e biológicos, de sistemas de aquisição de dados complexos de controle remoto é uma ferramenta de suporte a essa atividade;

### 3.5.2. Recomendações para o Brasil

Finalizaremos, com algumas recomendações. A primeira delas é que os órgãos de fomento científico estabeleçam programas que possam induzir um salto qualitativo na capacidade de conceber e realizar instrumentos através da realização de experimentos ou de ações científicas e tecnológicas, na fronteira

**O desenvolvimento de equipamentos com objetivos científicos mal definidos é um sorvedouro de recursos e tem pouca ou nenhuma consequência prática**

do conhecimento. É um pressuposto básico de um programa dessa natureza o reconhecimento dos projetos que apresentem potencialidade para contribuir para o avanço do conhecimento científico ou tecnoló-

gico e cujos resultados possam ser publicados em periódicos internacionais.

Na instrumentação, o apoio a um tipo de inovação cujo objetivo científico esteja bem delineado deveria ser o foco de programas nessa área, pois o desenvolvimento de equipamentos com objetivos científicos mal definidos é um sorvedouro de recursos e tem pouca ou nenhuma consequência prática.

Há hoje no mercado muitos sensores com custo individual baixo que possibilitam medidas com grandes detalhes, eventualmente cobrindo áreas extensas ou com grande densidade de medidas, quando usados em redes. O desafio, nesses casos, é a administração do sistema, a comunicação entre partes, bem como a aquisição e integração dos dados de forma coerente. Um experimento dentro dessa definição genérica expressa o espírito desse programa.

A instrumentação científica não é propriamente uma disciplina. A formação mais apropriada de um especialista nessa área provavelmente envolve um curso de física, com uma mistura de cadeiras que normalmente são

**A cultura da invenção e da experimentação deve ser estimulada desde cedo na formação dos estudantes**

ministradas nas engenharias. No caso de materialização de cursos tipo engenharia física, certamente essa seria uma ênfase.

Programas de pesquisa de grande envergadura necessitam de uma infra-estrutura técnica adequada, em particular em temas de instrumentação. A montagem e a operação dessa infra-estrutura podem servir para o treinamento de técnicos egressos de escolas como os Cefet, os Senac etc. Os bolsistas ganham experiência em

temas científicos, contribuem para o sucesso das equipes e contribuem também para a disseminação da cultura científica pelo setor produtivo.

A cultura da invenção e da experimentação deve ser estimulada desde cedo na formação dos estudantes. A reimplantação de laboratórios científicos no ensino fundamental é um instrumento relevante na indução dessa cultura. Um programa de estímulo ao desenvolvimento de instrumentação para medições científicas pelos estudantes, através de prêmios e bolsas, poderia ter um efeito muito positivo.

A colaboração científica com grupos internacionais em experimentos de grande envergadura é essencial para o aprimoramento da qualidade da instrumentação. Quando a contribuição de equipes brasileiras nesses grupos é bem caracterizada e significativa, ela permite o acesso a tecnologias que, muitas vezes, não chegam ao País. Projetos apoiados pelo programa de fomento acima e que envolvam cooperações internacionais poderiam envolver também um apoio ao intercâmbio com instituições e parceiros científicos qualificados.

**A colaboração científica com grupos internacionais em experimentos de grande envergadura é essencial para o aprimoramento da qualidade da instrumentação**

### 3.6. FÍSICA MOLECULAR

Sistemas moleculares são objeto de estudos em física, química e biologia. Na primeira dessas disciplinas, moléculas orgânicas têm sido contempladas em aplicações para dispositivos como retificadores e sensores, além de possíveis aplicações em fotônica, óptica não linear etc. Inclui-se aí uma parte considerável da física de polímeros. Em química, sistemas moleculares são objeto central de pesquisas, e um enorme esforço está concentrado na compreensão de reações químicas e seus estudos incluem caracterização, propriedades estruturais e espectroscópicas, processos catalíticos, desenvolvimento de fármacos etc. Já na biologia, os processos bioquímicos são responsáveis pela manutenção e criação dos processos biológicos, incluindo aqueles relacionados com a vida. Sistemas organometálicos têm mostrado atividades promissoras no tratamento do câncer. Corantes moleculares participam de processos relacionados com terapia fotodinâmica para essa doença.

### 3.6.1. Breve histórico

A área de física molecular teve um desenvolvimento acentuado a partir da física atômica, com o desenvolvimento da mecânica quântica e a formulação da equação de Schrödinger em 1926 – homenagem ao físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), que a idealizou. Três anos depois, o norueguês Egil Hylleraas resolveu numericamente essa equação para o estado fundamental do átomo de hélio. Considerando que o mesmo havia sido feito

Com a revolução computacional, tanto em *hardware* quanto em *software*, ocorrida a partir da segunda metade do século passado, a física molecular sofreu um extraordinário avanço

anteriormente para o átomo de hidrogênio – porém, com métodos semiclássicos e, portanto, incompletamente, pelo físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) –, podemos, então, considerar essa a primeira

evidência numérica da credibilidade da equação.

A metodologia empregada por Hylleraas foi usada posteriormente pelos norte-americanos Hubert James (1908-1986) e Albert Coolidge (1894-1977), em 1933, para estudar a molécula de hidrogênio. A extraordinária precisão numérica contestou resultados experimentais, posteriormente corrigidos. A existência de uma equação-mestra permitiu um extraordinário avanço, mas isso ocorreu em aliança com a revolução computacional, tanto em *hardware* quanto em *software*, ocorrida a partir da segunda metade do século passado. Devido à semelhança de metodologias empregadas, por muitos anos esta área foi conhecida como física atômica e molecular.

### 3.6.2. Proximidade de áreas

Atualmente, com a crescente proximidade com a biologia e a química, a física molecular se renova e emerge como uma ampla área com forte caráter multidisciplinar. Conhecimentos adquiridos através da física são usados em áreas anteriormente separadas, embora reconhecidas como correlatas. As leis fundamentais da mecânica quântica, da mecânica estatística e mesmo da mecânica clássica são aplicadas para a compreensão de fenômenos moleculares que variam da interação intermolecular no sítio ativo de uma enzima até as propriedades de um gás no meio ambiente, contribuindo

assim tanto para o avanço do conhecimento na biologia molecular como para o necessário equilíbrio ecológico.

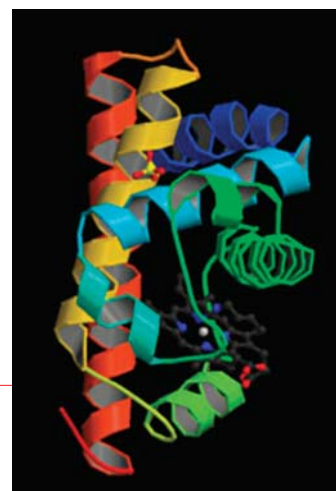
O extraordinário progresso recente não pôs a biologia em discordância com as leis fundamentais da física, mas revelou vários problemas que podem, hoje, ser considerados grandes desafios para a área ampla de ciências moleculares. Simultaneamente, o desenvolvimento industrial e a demanda crescente por novas tecnologias – em escalas micro ou nanométrica – têm aberto uma grande variedade de problemas envolvendo sistemas moleculares. A facilidade de síntese orgânica é uma das razões que colocam sistemas moleculares como excelentes candidatos a compor novos materiais funcionais.

Acredita-se na possibilidade de uma arquitetura ou engenharia molecular, nas quais sistemas específicos, para funções pré-determinadas, podem ser criados, sob encomenda, graças ao progresso obtido nas técnicas de síntese orgânica. De fato, isto já vem ocorrendo numa atividade bastante efervescente conhecida como química supramolecular, originalmente desenvolvida pelo prêmio Nobel em química, o francês Jean-Marie Lehn. Nessa área, a atividade está concentrada no uso seletivo e funcional de moléculas com interações e estruturas específicas.

O desenvolvimento industrial e a demanda crescente por novas tecnologias têm aberto uma grande variedade de problemas envolvendo sistemas moleculares

### 3.6.3. Simulações computacionais

Para o progresso da área molecular, simulações computacionais têm desempenhado um papel importante. Modelagem molecular tem sido reconhecida como essencial para a compreensão e racionalização de fenômenos em escala microscópica, e sua presença é marcante em grupos teóricos e em laboratórios experimentais (ver ‘Simulação e modelagem’). Em particular, considerando-se que em todos os fenômenos bioquímicos a presença de um meio aquoso é fundamental, o estudo de simulação de biomoléculas em meio líquido é essencial. Note-se que a maioria das informações sobre estruturas de proteínas é obtida por técnicas de difração por raios X, usando-se sistemas cristalinos que não evidenciam o papel da água líquida.



R. O. SMITH ET AL.

Admite-se que entender o papel desempenhado pelo solvente aquoso é tão importante quanto o sistema biomolecular envolvido.

A abrangência proporcionada pelos sistemas moleculares é quase ilimitada. Na crescente busca por novos materiais e por tecnologias nano-

**Entender o papel desempenhado pelo solvente aquoso é tão importante quanto o sistema biomolecular envolvido**

métricas, sistemas moleculares têm também um papel importante e central. Motores moleculares, que transportam elementos através do meio biológico por um processo não

difusivo, têm despertado atenção. Igualmente, os complexos de inclusão e os transportadores de drogas e fármacos – ambos voltados para a atuação focalizada no alvo biológico – são uma promissora nanobiotecnologia para a diminuição de efeitos colaterais por diminuição de dosagem.



MATSUSHITA'S CENTRAL RESEARCH LABS

#### 3.6.4. Destaques da atuação

A contribuição da física nessas áreas de atuação

é crescente e algumas podem ser destacadas. Assim, a física permitiu:

- i) o conhecimento dos estados quânticos da molécula. Ao contrário dos átomos, sistemas moleculares exibem espectroscopia vibracional e, diferentemente dos sólidos, exibe espectroscopia rotacional. Portanto, sistemas moleculares têm níveis quantizados de energia numa ampla região de comprimentos de onda: da região de radiofrequência, microondas, infravermelho, visível até o ultravioleta. Essa característica facilita a aplicação de sistemas moleculares em dispositivos, sensores, na tecnologia fotônica etc. O estudo de novos sistemas moleculares, incluindo moléculas não convencionais, é uma atividade crescente;
- ii) a compreensão detalhada da interação intermolecular, incluindo as interações eletrostáticas, as induzidas – como as do tipo van der Waals – e as ligações de hidrogênio. Por serem sistemas envolvendo, em quase sua totalidade, átomos relativamente leves, efeitos relativísticos não têm sido importantes. Entretanto, sistemas metálicos participam de atividades de porfirinas (grupos vermelho-escuros que compõem os pigmentos respiratórios



- de animais e plantas). O átomo de ferro está envolvido no transporte do oxigênio no sangue. Sistemas equivalentes fazem parte do processo de fotossíntese. As interações intermoleculares – como as ligações de hidrogênio – estão envolvidas em todas as anomalias termodinâmicas da água e são cruciais nos processos biológicos. Problemas de adsorção em superfície requerem compreensão detalhada das interações de dispersão, que é ubíqua na força de van der Waals.
- iii) o entendimento do efeito hidrofóbico e das propriedades da água. O efeito hidrofóbico é a razão por que moléculas apolares não são miscíveis em água. Do ponto de vista termodinâmico, é sabido que existe um aumento da ordem local (diminuição da entropia) na mistura de sistemas apolares em água. Do ponto de vista da mecânica quântica, a explicação microscópica ainda é incompleta, mas sabe-se que a inter-relação entre interações intermoleculares é necessária para explicar a ordem local e a agregação dos componentes moleculares. O efeito hidrofóbico tem importância também na compreensão da estrutura de cristais líquidos e filmes. O efeito hidrofóbico é importante na concepção de novos fármacos – incluindo os compostos de inclusão – e, de forma mais geral, na compreensão de vários fenômenos biológicos. Entre esses fenômenos biológicos, pode ser citada a formação de micelas e membranas. De modo ainda mais geral, o papel da água nos processos biológicos e sua extraordinária diversidade de anomalias termodinâmicas precisam ser compreendidos. A água participa em todos os processos bioquímicos relacionados com a vida;
- iv) o desenvolvimento de métodos, técnicas e novos algoritmos. O uso de simulação computacional tem sido crescente para se estudar sistemas moleculares tanto isolados quanto aqueles interagindo com um meio. Novos métodos e técnicas computacionais – a partir de primeiros princípios ou fenomenológicas – são necessários para se entender sistemas moleculares de tamanho cada vez maiores. Em particular, sistemas moleculares em fase líquida e problemas de
- O papel da água nos processos biológicos e sua extraordinária diversidade de anomalias termodinâmicas precisam ainda ser compreendidos**
- Novos métodos e técnicas computacionais são necessários para se entender sistemas moleculares de tamanho cada vez maiores**

configuração de biomoléculas têm sido objetos de um número crescente de estudos com simulações computacionais, seja pela técnica dinâmica molecular clássica, seja pelo método Monte Carlo. Essa área tem se expandido de modo acelerado, mas novas técnicas ainda são necessárias para estudar sistemas e problemas cada vez mais complexos.

### 3.7. FÍSICA MÉDICA

A parceria entre a física e a medicina remonta aos tempos antigos. Entre os registros existentes, podem-se encontrar prescrições de procedimentos oftalmológicos, incluindo descrições de seus aspectos físicos, em papiros egípcios, além das ‘teorias’ gregas sobre a visão, nas quais conceitos sobre os diferentes aspectos da luz foram elaborados. Leonardo da Vinci (1452-1518) usou a ‘ciência mecânica’ para descrever os movimentos de corpos animados, enquanto Galileo Galilei (1564-1642), Sanctorius (1551-1636), William Harvey (1578-1657), Luigi Galvani (1737-1789), Alessandro Volta (1745-1827), Thomas Young (1773-1829), Jean-Leonard Poiseuille (1770-1869), Adolf Fick (1829-1901), Hermann von Helmholtz (1821-1894), entre

A física médica teve seu início com a descoberta dos raios X pelo alemão Wilhelm Röntgen, em 1895

outros, descobriram e explicaram diversos fenômenos fisiológicos aplicando conhecimentos de mecânica, eletricidade e óptica, assim como desenvolveram métodos para medir ou estimar inúmeras grandezas fisiológicas.

Apesar de as muitas contribuições da física para a fisiologia e a medicina terem sido realizadas até o final do século 19, a física médica, como a concebemos hoje, realmente teve seu início com a descoberta dos raios X pelo alemão Wilhelm Röntgen (1845-1923), em 1895, na Universidade de Würzburg (Alemanha). Esse fato também foi o marco da medicina moderna, pois, graças a essa radiação, foi possível visualizar o interior do corpo sem as intervenções invasivas. Röntgen mostrou o potencial médico dos raios X ao exibir a primeira radiografia de uma mão humana, em 1895. Pouco depois, essa radiação foi ampla e intensamente utilizada tanto para fins diagnósticos quanto em tentativas terapêuticas. Por essa descoberta, Röntgen recebeu o primeiro prêmio Nobel de física, em 1901.



WILHELM RÖNTGEN

Pelos 40 anos seguintes, muitos avanços foram obtidos na medicina com outras descobertas e desenvolvimentos da física:

- i) a radioatividade natural pelo francês Henri Becquerel (1858-1902), em 1896, e de elementos radioativos naturais pelo casal Marie (1867-1934) e Pierre Curie (1859-1906), em 1898, que deram aos três o Nobel de física de 1903;
- ii) a descoberta e a produção de elementos radioativos através do bombardeamento por partículas carregadas por Irène Curie (1897-1956) e Frédéric Joliot (1900-1958), ambos agraciados com o Nobel de química em 1935;
- iii) a possibilidade de se produzir elementos radioativos pela irradiação por nêutrons pelo italiano e Nobel de física de 1938 Enrico Fermi (1901-1954);
- iv) o projeto e a construção do primeiro ciclotron pelo norte-americano Ernest Lawrence (1901-1954) – Nobel de física em 1939 –, que levaram à produção de radionuclídeos artificiais, ampliando as aplicações diagnósticas e terapêuticas das radiações ionizantes.

Ainda nos primeiros vinte anos do século passado, químico húngaro George de Hevesy (1885-1966), estabeleceu o princípio do traçador – uso de núcleos radioativos para acompanhar o fluxo do sangue e de outras substâncias no organismo –, fundamento básico sobre o qual se desenvolveu a medicina nuclear. Por esse trabalho, ele recebeu o prêmio Nobel de química de 1943. Avanço significativo na quantificação de substâncias, como hormônios no sangue e em tecidos, foi conseguido com a técnica de ensaios radioimunológicos – RIA, na sigla inglesa –, desenvolvida pela norte-americana Rosalyn Yalow, física nuclear que migrou para a área médica. Por esse desenvolvimento, ela recebeu o primeiro dos prêmios Nobel de medicina e fisiologia dados para físicos.

Devido ao uso intenso e imediato das radiações ionizantes, a física médica é comumente associada à aplicação dessas radiações em medicina. Entretanto, são participantes importantes da física nas terapias e nos diagnósticos médicos atualmente técnicas e métodos físicos que utilizam outras formas de energia – como as ondas eletromagnéticas não ionizantes e as ultra-sônicas – ou que levam a mensurações de sinais fisiológicos elétricos e magnéticos, bem como as que possibilitam as identificações e as quantificações de constituintes fisiológicos e metabólicos.



LAWRENCE NATIONAL LABORATORY

A aplicação dos métodos físicos só é possível pela pesquisa e desenvolvimento de equipamentos, de procedimentos e de ferramentas matemáticas e computacionais dirigidos especificamente ao ser humano, dentro das condições da realidade médico-hospitalar, visando a diagnósticos mais objetivos e

**Os físicos têm papel importante na formação de recursos humanos nas diferentes áreas da saúde, dada a quantidade de conhecimento em física existente na tecnologia médica atual**

precisos que possam levar a procedimentos terapêuticos mais eficientes e duradouros.

A história das radiações ionizantes mostrou que seu uso também produz efeitos danosos nas pessoas e no meio ambiente, o mesmo podendo ocorrer com o uso de outras formas de energia. Portanto, é necessário que sejam estabelecidas regras de utilização e proteção, assim como os limites para as aplicações. Essas ações só se tornam efetivas se houver métodos e instrumentos precisos e confiáveis de medição e monitoração, o que leva aos estudos das interações das várias formas de energia com o corpo humano e ao desenvolvimento de detectores dessas energias. Isso é particularmente relevante na área de radiações eletromagnéticas não ionizantes, pois elas estão em todos os locais, desde as linhas de transmissão até os telefones celulares e aparelhos domésticos.

As atividades da física médica são bastante diversas, indo desde a atuação direta no ambiente médico-hospitalar até a pesquisa acadêmica, o desenvolvimento em indústrias de equipamentos, passando por estabelecimentos de regulamentação e fiscalização. Os físicos têm papel importante na formação de recursos humanos nas diferentes áreas da saúde, dada a quantidade de conhecimento em física existente na tecnologia médica atual.

A seguir, serão apresentadas algumas das especialidades da medicina em que a física está mais atuante; em especial, a desenvolvida pela comunidade de física médica brasileira, assim como vários desafios que se colocam.

### 3.7.1. Diagnóstico por imagem

O diagnóstico por imagens tem produzido impactos significativos na medicina, devido às importantes contribuições que permitiram uma visualização tanto anatômica quanto metabólica/funcional do corpo humano, através de técnicas não invasivas ou com um mínimo de intervenção. Essas características, aliadas aos conceitos de medicina preventiva, têm servido

de inspiração para que pesquisadores das áreas de física médica, engenharia biomédica e ciências da computação investissem seus esforços no desenvolvimento de métodos e técnicas de prospecção do corpo humano que levassem a respostas mais precisas na detecção e identificação dos mais diferentes tipos de patologias.

A importância dessa busca é demonstrada pelos prêmios Nobel de medicina e fisiologia outorgados ao físico inglês Geoffrey Hounsfield e ao engenheiro sul-africano Allan Cromack pelo desenvolvimento e a construção, em 1977, do sistema tomográfico por transmissão de raios X, e ao químico norte-americano Paul Lauterbur e ao físico inglês Peter Mansfield, pelo desenvolvimento do tomógrafo por ressonância magnética nuclear, em 2003. Não menos importante foi a contribuição do físico norte-americano Michael Phelps ao desenvolvimento da tomografia por emissão de pósitrons.

A área de diagnóstico por imagens é conhecida, tradicionalmente, como composta por radiologia, medicina nuclear, ultra-sonografia e imageamento por ressonância magnética nuclear. Entretanto, existem outras modalidades, como a termografia, a diafanografia, a endoscopia, a pleuroscopia, a imagem da impedância elétrica tecidual, as diferentes técnicas microscópicas etc., que também têm contribuído significativamente na detecção e na identificação de moléstias e patologias.

Vários físicos receberam o prêmio Nobel de medicina e fisiologia por sua contribuição para a área de diagnóstico por imagem

A radiografia é a modalidade mais antiga das imagens médicas e faz uso de raios X, que atravessam o corpo e incidem sobre uma chapa radiológica, que revela as estruturas internas para análise. Essa imagem analógica é um dos grandes aliados dos médicos no diagnóstico de anormalidades essencialmente anatômicas.

Com a difusão do uso dos computadores foram desenvolvidas as imagens radiográficas digitais. Essas imagens podem ser processadas após a realização dos exames, permitindo a correção de pequenos erros que, eventualmente, possam ter ocorrido durante o procedimento radiográfico. Além disso, algoritmos de processamento podem ser aplicados às imagens, permitindo aos radiologistas obter informações adicionais para auxílio no diagnóstico, como a identificação de padrões, a presença de objetos etc. Existem diversos grupos de pesquisa nas universidades brasileiras trabalhando no desenvolvimento de algoritmos para essas finalidades, em especial em mamografia digital.

Em 1999, segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear, havia 105 mil aparelhos de raios X odontológicos, 26 mil equipamentos médicos e mais de 2 mil mamógrafos em operação no País, a grande maioria ainda baseada em filmes. Nesse panorama, a atuação de profissionais de física médica nas áreas da radiologia convencional – médica e/ou odontológica – e da mamografia se destaca, por esses terem formação adequada para o desenvolvimento e a implementação de programas de controle e garantia da

Em 1999, havia 105 mil aparelhos de raios X odontológicos, 26 mil equipamentos médicos e mais de 2 mil mamógrafos em operação no País, a grande maioria ainda baseada em filmes

qualidade de imagens e em segurança radiológica dos pacientes, do corpo profissional e do ambiente em torno dos centros radiológicos.

Outra técnica que tem se apresentado como um forte foco de concentração de pesquisas é a tomografia computadorizada. As finas secções transversais do corpo humano obtidas por esse equipamento permitem diferenciar materiais biológicos que têm pequenas diferenças em seus coeficientes de atenuação para a radiação X, com alta precisão geométrica.



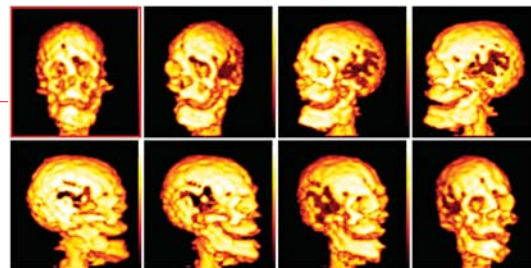
Desde a década de 1990, estão sendo desenvolvidos equipamentos que permitem a produção de séries de imagens tomográficas simultâneas de diferentes regiões do corpo, conhecidos como tomógrafos multicortes (ou MSCT, *multi-slice computed tomography*). No Brasil, tem-se visto uma tendência acentuada na migração dos equipamentos tomográficos convencionais (helicoidais) para os sistemas multicortes. Essa mudança de metodologia requer uma atenção maior no controle e no manuseio dos equipamentos, principalmente com relação aos parâmetros de funcionamento e às exposições aos pacientes e ao pessoal técnico, aspectos contemplados na prática dos físicos que atuam na área.

Na medicina nuclear, os diagnósticos são feitos a partir da administração, ao paciente, de um radiofármaco, composto marcado com algum radionuclídeo. O radiofármaco, em níveis milimolares ou picomolares, segue um caminho funcional ou metabólico específico no organismo do paciente, e as imagens, obtidas a partir da detecção da radiação emitida, fornecem informações sobre o funcionamento do sistema ou tecido examinado. O caminho específico do radiofármaco e a baixa concentração administrada conferem aos estudos desta modalidade uma alta sensibilidade, bem como as características funcionais e/ou metabólicas essenciais para a detecção

precoce de muitas doenças, pois as alterações anatômicas, muitas vezes, não se manifestam senão em estádios relativamente avançados, como ocorre com diversos tipos de câncer.

Parte dos procedimentos em medicina nuclear utiliza as projeções planas das distribuições volumétricas contendo o radiofármaco para extrair informações biológicas, tanto qualitativas quanto quantitativas. A outra parte faz uso das imagens tomográficas por emissão – reconstruídas a partir das projeções – para apresentar os conteúdos e as funções em cortes ou de forma volumétrica, possibilitando tanto análise qualitativa quanto quantitativa.

Desde sua introdução em aplicações clínicas, na década de 1970, dois tipos de tomografias, tanto a por emissão de fótons únicos – Spect, na sigla inglesa – quanto a de pósitrons – PET, na sigla inglesa –, vêm suprimindo a comunidade médica com informações biológicas distribuídas no espaço e tempo. Entretanto, devido à meia-vida física ex-



tremamente curta dos emissores de pósitron viáveis e ao alto custo do equipamento, a tecnologia PET só se fixou, na rotina de grande parte das clínicas nucleares dos países desenvolvidos no final década de 1990, com o uso da  $^{18}\text{F}$  (flúor-desoxi-glicose), traçador metabólico aplicável em oncologia, neurologia e cardiologia. A Spect, por outro lado, foi absorvida de imediato e muitos radiofármacos e procedimentos foram e continuam sendo desenvolvidos para um número grande de estudos. Devido ao seu relativo baixo custo e versatilidade, essa modalidade é a mais adequada para a rotina clínica de países como o Brasil.

A construção de tomógrafos por emissão para animais, os microtomógrafos, está proporcionando um novo instrumento de pesquisa em medicina nuclear, pois eles permitem estudos altamente precisos com pequenos animais, etapa essencial no processo de desenvolvimento de novos fármacos, tanto para diagnóstico quanto para terapia – em especial, a terapia gênica.

Segundo dados da Sociedade Brasileira de Biologia e Medicina Nuclear, existem, no Brasil, mais de 250 clínicas de medicina nuclear, cerca de 75% nas regiões Sudeste e Sul, e um número similar de câmaras Spect, porém apenas um tomógrafo

Há, no Brasil, mais de 250 clínicas de medicina nuclear, mas apenas cerca de 30 físicos com titulação e experiência nessa área



PET e três sistemas compostos PET-CT, estes últimos quatro na cidade de São Paulo, pois a produção de  $^{18}\text{F}$  (flúor 18) é feita somente pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, naquela cidade. Entretanto, há no país, menos de 30 físicos com titulação e experiência nessa área.

**Grupos no Brasil estão desenvolvendo pesquisas em processamento de imagens e em reconstrução tomográfica, com a inclusão de fatores instrumentais e físicos que não são considerados em sistemas comerciais**

A comunidade de físicos brasileiros que trabalham em medicina nuclear tem contribuído principalmente na elaboração e execução de programas de controle e garantia de qualidade e de proteção radiológica. Grupos em universidades estão também desenvolvendo pesquisas em processamento de imagens – para fins de diagnósticos mais precisos – e em reconstrução tomográfica, com a inclusão de fatores instrumentais e físicos que não são considerados em sistemas comerciais.

Outra modalidade de diagnóstico por imagem – talvez, de maior participação clínica e que tem tido pesquisas associadas há várias décadas – é a ultra-sonografia. Essa modalidade diagnóstica permite a produção de imagens a partir da interação de ondas mecânicas com as estruturas internas do corpo, associando sinais de eco detectados por um transdutor piezoeletrico à impedância acústica destas estruturas.

A ultra-sonografia é intensamente utilizada na obstetrícia, em que o acompanhamento gestacional pode ser realizado sem a utilização de radiações ionizantes. Outras aplicações são encontradas em procedimentos de investigação ou acompanhamento de moléstias cardíacas e vasculares, com ênfase na monitorização do fluxo sanguíneo – através do efeito Doppler – em detecção e identificação de estruturas anatômicas anormais, como cálculos renais ou vesiculares, bem como tumores e na caracterização e diferenciação de tecidos

**Nos últimos anos, tem-se visto a evolução de técnicas para produção de imagens tridimensionais, tanto estáticas quanto dinâmicas, utilizando sistemas de ultra-sonografia**

etc. Nos últimos anos, tem-se visto a evolução de técnicas para produção de imagens tridimensionais, tanto estáticas quanto dinâmicas, utilizando sistemas de ultra-sonografia.

Como os equipamentos clínicos de ultra-sonografia são relativamente simples –porém, bastante fechados pelos fabricantes – quase não se encontram físicos atuando na rotina clínica aqui no Brasil. Existem grupos no País, principalmente em universidades, reali-

zando pesquisas em desenvolvimento de transdutores e métodos para caracterização de tecidos. Há a perspectiva de que o aumento na adoção de procedimentos quantitativos pelos médicos especialistas possa levar a uma procura maior de físicos nessa área.

As imagens obtidas por ressonância magnética nuclear – MRI, na sigla inglesa – fornecem informações anatômicas de alta precisão sem o uso de radiação ionizante. Elas permitem a diferenciação de tecidos que têm coeficientes de atenuação a raios X muito semelhantes, como, por exemplo, o sangue e os músculos ou as matérias branca e cinzenta do cérebro. As imagens resultantes permitem uma visualização detalhada e diferenciada de estruturas. As contribuições clínicas das imagens por ressonância magnética podem ser encontradas em quase todas as áreas da medicina, com grande ênfase em neurologia, traumatologia, oncologia e cardiologia.

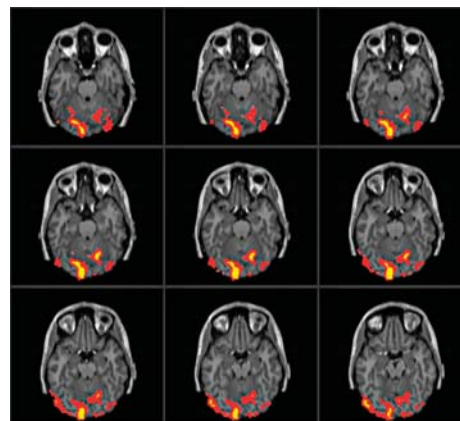
Como atividades celulares implicam maior consumo de oxigênio, imagens de tecidos em atividade podem ser obtidas através do mapeamento das variações magnéticas causadas por esse aumento, técnica conhecida como **imageamento funcional por ressonância magnética – fMRI**, na sigla inglesa. As imagens por fMRI fornecem informações especialmente importantes em neurologia e em distúrbios psíquicos de diferentes origens.

Vale ressaltar, nesse ponto, que os grupos de ressonância magnética nuclear do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (*campus* São Carlos) e da Universidade Federal de Pernambuco foram pioneiros nas aplicações médicas, ao construírem seus próprios tomógrafos. Com isso, eles mostraram que é possível desenvolver tecnologia própria nessa área em que dominam os fabricantes multinacionais.

Atualmente, eles e outros grupos associados têm se dedicado à melhoria dos tomógrafos e à construção de bobinas específicas, assim como a se-

qüências de pulsos para extração de informações que não são fornecidas pelos sistemas comerciais, dentro de ambiente mais acadêmico que clínico.

Diagnóstico por imagens também se faz em nível celular com o uso de diferentes tipos de microscópios. Em especial, os ópticos – amplamente



S. SMITH - WWW.FMRIB.OX.AC.UK

**Grupos de pesquisa no Brasil mostraram que é possível desenvolver tecnologia própria numa área em que dominam os fabricantes multinacionais**

adotados em análises anatomopatológicas – são a única maneira de se obter uma resposta definitiva sobre a presença ou não de células cancerosas em tecidos suspeitos. Existem, hoje, muitos tipos de microscópios ópticos usados em investigações clínicas: os convencionais, os de fluorescência, os de contraste, os de interferência, os de espalhamento e os confocais – estes últimos utilizam feixe de laser.

Outros microscópios que também contribuem substancialmente para os diagnósticos na medicina moderna são os eletrônicos de transmissão e varredura. Mais recentemente, os microscópios acústicos têm mostrado que é possível obter informações sobre características mecânicas de tecidos biológicos – que não são obtíveis com outras técnicas de microscopia – e, em algumas situações, dados são obtidos diretamente de pacientes, sem a necessidade de se retirar amostras.

Dado o estado da arte das diferentes modalidades de imagens médicas, o futuro de diagnóstico por imagens passa, necessariamente, pela fusão das informações, tanto através de sistemas combinados e de tomógrafos PET-CT quanto com o uso de software adequado, sobrepondo imagens obtidas em condições diversas, por exemplo, PET-MR, PET-Spect, Spect-CT. Uma área que será amplamente favorecida pela integração da informação anatômica com a fisiológica é a oncologia, principalmente no planejamento terapêutico e acompanhamento desses procedimentos.

Além da fusão entre imagens de diferentes modalidades, uma abordagem bastante promissora é a junção da informação espacial, proveniente da imagem por ressonância magnética funcional, com a temporal, fornecida pelos estudos de atividade elétrica com os eletroencefalogramas (EEG). Esse tipo de análise conjugada possibilitará uma melhor compreensão da gênese e da evolução de moléstias neurológicas como as epilepsias, assim como o próprio

processamento neural pelas diferentes áreas do córtex cerebral.

Os físicos médicos que atuam em diagnóstico por imagem têm dedicado bastante esforço em implementar programas de controle e garantia de qualidade, desenvolvimento e implementação de algoritmos de reconstrução, processamento, manipulação e apresentação das imagens, elaboração de protocolos de aquisição de dados, assim como em educar os profissionais



em saúde dessa necessidade para assegurar o melhor uso das tecnologias disponíveis.

A pesquisa em processamento de imagens é realizada por grupos de físicos, engenheiros e matemáticos em inúmeras universidades e centros de pesquisa brasileiros. Os resultados, no entanto, são pouco aproveitados na rotina, principalmente pela dificuldade de implementação dos códigos nos equipamentos comerciais, assim como pela pouca aplicabilidade de muitos deles à realidade clínica.

A pesquisa em processamento de imagens é realizada por grupos de físicos, engenheiros e matemáticos em inúmeras universidades e centros de pesquisa brasileiros

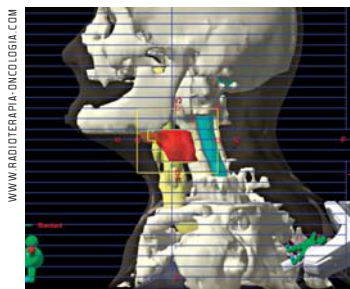
### 3.7.2. Radioterapia

Radioterapia é a especialidade médica que utiliza a radiação ionizante para tratamento e tem como objetivo aplicar uma dose de radiação a um volume-alvo, minimizando danos nos tecidos sadios circunvizinhos. Já a braquiterapia é o tratamento que utiliza pequena distância da fonte ao tumor e foi predominante até a década de 1950. Porém, na segunda metade daquela década, quando as máquinas como bétatrons e os aceleradores lineares tornaram-se disponíveis, teve início a teleterapia, na qual essa distância é maior.

No início, a radioterapia era bastante empírica, mas foi perdendo essa característica, tornando-se mais científica. Aos poucos, foram agregadas a informática e outras tecnologias, visto que os avanços na computação possibilitaram a precisão e a rapidez, não somente no cálculo de doses como também na disponibilidade de ferramentas de visualização, de comparação e de avaliação quantitativa dos esquemas de tratamento, utilizados nos sistemas de planejamento em três dimensões.

Até o advento de métodos de imagens como a CT e a MRI, eram de difícil visualização a forma e a dimensão das lesões profundas, obrigando os campos de tratamento a incluírem margens para garantir a cobertura completa do tumor. Dessa forma, as estruturas críticas eram freqüentemente incluídas no tratamento, limitando a possibilidade de incremento de dose no tumor e, mesmo assim, excedendo as tolerâncias dos tecidos normais.

A disponibilidade dos métodos de imagem – que possibilitaram a visua-



lização aprimorada do tumor e áreas adjacentes – juntamente com o desenvolvimento dos sistemas de planejamento computadorizado tridimensionais tornaram possível a radioterapia conformada tridimensional – 3DCRT, na sigla inglesa –, na qual o tratamento está altamente conformado ao volume-alvo, a partir das informações anatômicas – tomografia computadorizada e imagem por ressonância magnética – e funcionais – Spect e tomografia pósitron-elétron.

Novas tecnologias se desenvolveram. Com os colimadores de multilâminas – MLC, na sigla inglesa –, os aceleradores controlados por computador, bem como o importante desenvolvimento dos algoritmos de planejamento inverso com otimização, foi possível se chegar à mais nova técnica de tratamento: radioterapia com intensidade modulada do feixe – IMRT, na

sigla inglesa –, que, em muitas situações, tem a habilidade de liberar doses ainda mais conformadas ao volume-alvo que a 3DCRT.

Para a implementação segura desses avanços no tratamento clínico de pacien-

tes, é necessária uma metodologia eficiente e inovadora de controle de qualidade (CQ). Hoje, existem evidências de que o CQ pode realmente aumentar o ganho do paciente no tratamento radioterápico, uma tendência que, certamente, se tornará mais evidente na radioterapia baseada em tecnologia avançada.

No Brasil, em 2003, segundo o Instituto Nacional do Câncer (Inca), houve cerca de 400 mil casos novos de câncer. Em torno de 60% deles precisarão de tratamento radioterápico. Pelas recomendações internacionais, é necessário um físico para cada 500 casos novos por ano. Existem hoje aproximadamente 180 serviços de radioterapia, e o número de físicos em atividade nessa área está em torno de 200, o que mostra a carência nessa especialidade.

Recentemente, o Ministério da Saúde estabeleceu o programa de reequipagem dos serviços de radioterapia. Máquinas de última geração es-

tão sendo colocadas em funcionamento em diversos hospitais, o que faz necessário não só a atualização de físicos na área, como também o aumento do número de profissionais bem treinados.

**No Brasil, em 2003, houve cerca de 400 mil casos novos de câncer; cerca de 60% deles precisarão de tratamento radioterápico**

**É necessário um físico para cada 500 casos novos por ano; o número de físicos em atividade nessa área no Brasil, em torno de 200, deveria ser quatro vezes maior**

O físico na área de radioterapia no Brasil não tem a posição de pesquisador, pois a pesquisa continua basicamente atrelada a empresas estrangeiras. Porém, dentro de um serviço de radioterapia, sua tarefa tem hoje fundamental importância. Dentre suas obrigações, está a garantia da qualidade em cada fase do processo radioterápico. Para isso, além do comissionamento, da calibração e da dosimetria dos equipamentos de tratamento, bem como a supervisão de proteção radiológica, sua atuação com os sistemas de planejamento é de grande responsabilidade, incluindo a implementação dos dados das máquinas de tratamento, a verificação dos algoritmos para uso clínico, o uso de imagens e os planejamentos de tratamento. Com as novas técnicas, como IMRT, o controle de qualidade deve ser muito rígido, e a verificação da entrega da dose tem papel de destaque.

A tendência mundial tem sido a de acompanhar a sofisticação do tratamento com o uso de técnicas dosimétricas mais precisas, simulações computacionais de feixe e de paciente, desenvolvimento de algoritmos de cálculo mais fiéis à anatomia do paciente e a verificação individual de doses em alguns pontos do paciente.

No Brasil, na rotina das radioterapias, realiza-se somente a dosimetria do feixe no ar e em simuladores homogêneos. Há situações, ainda raras, em que a parceria

No Brasil, há situações, ainda raras, em que a parceria de clínicas com grupos de pesquisa resulta em desenvolvimento de novas técnicas radioterápicas ou dosimétricas

de clínicas de radioterapia com universidades e institutos de pesquisa resulta em desenvolvimento de novas técnicas radioterápicas ou dosimétricas, por iniciativa individual de algum médico ou físico médico que deseja avaliar um novo tratamento ou equipamento.

### 3.7.3. Proteção radiológica e vigilância sanitária

A proteção radiológica se preocupou, em seu início, com o uso responsável de fontes de radiação em geral pelos trabalhadores, procurando tornar sua atividade mais segura. Com a disseminação do uso da radiação ionizante, a proteção da população próxima às instalações foi incorporada e, nos últimos anos, a tendência é, cada vez mais, estender o conceito de proteção radiológica à população como um todo e aos pacientes de radiodiagnóstico em particular.

Com o crescimento da radiologia digital, é necessário desenvolver técnicas experimentais que facilitem a dosimetria *in vivo* de pacientes

Com o crescimento da radiologia digital, é necessário desenvolver técnicas experimentais que facilitem a dosimetria *in vivo* de pacientes, assim como cabe aos físicos médicos auxiliarem o corpo clínico no uso cauteloso da tomografia computadorizada e na escolha de parâmetros para as técnicas digitais, para obter imagens de qualidade sem o aumento de doses aos pacientes.

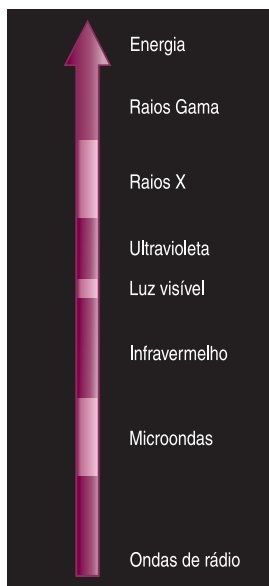
Avaliações de dose tanto em procedimentos diagnósticos quanto aquela devida a radionuclídeos no ambiente em geral vêm sendo efetuadas por vários grupos, utilizando diversas técnicas instrumentais e ferramentas de cálculo. No que concerne à dosimetria ambiental, a determinação de concentrações de radônio e descendentes radioativos alfa emissores em residências e locais de trabalho é um dos aspectos relevantes dessa abordagem. O que se pretende é, além de conhecer as doses, contribuir para estudos de longo prazo que possibilitem entender melhor os efeitos

biológicos de baixas doses e baixas taxas de dose da radiação em seres humanos.

Há um número crescente de físicos incorporados aos serviços de vigilância sanitária municipais, estaduais e federais, atuando para garantir o bom uso da radiação ionizante e a proteção da população

A grande polêmica é verificar como os efeitos já comprovados de altas e médias doses e taxas podem ser extrapolados para doses ambientais e diagnósticas.

Há um número crescente de físicos incorporados aos serviços de vigilância sanitária municipais, estaduais e federais, atuando para garantir o bom uso da radiação ionizante e a proteção da população.



### 3.7.4. Radiações não ionizantes

São consideradas radiações não ionizantes ondas eletromagnéticas com energia de fóton menor do que 12 elétrons-volt (12 eV). A separação do espectro eletromagnético não ionizante em faixas, nem sempre muito bem definidas, envolve também o tipo de interação com o corpo humano.

O corpo humano absorve radiação eletromagnética de todo espectro, mas em forma e grau distintos. As diferentes células do



corpo respondem de forma diversa à radiação eletromagnética de uma determinada faixa do espectro. Quanto maior a probabilidade de interação menor a profundidade de penetração da onda.

Há uma grande polêmica quanto aos possíveis efeitos carcinogênicos dos campos eletromagnéticos, principalmente nas faixas de 60 hertz e das microondas usadas na telefonia celu-

lar, enquanto pouco se comenta a respeito da radiação ultravioleta que efetivamente causa câncer de pele. Não existe ainda uma teoria plausível que explique como as radiações não ionizantes – menos as ultravioletas – poderiam causar câncer ou mesmo estimular o crescimento de um câncer já existente.

Estamos em nosso dia-a-dia envoltos em microondas com intensidades crescentes por causa de suas inúmeras aplicações. Dessa forma, devem ser realizadas medidas de intensidade dos campos eletromagnéticos de radiações não ionizantes no meio ambiente e estudos epidemiológicos de acompanhamento. Muita pesquisa extremamente cuidadosa deve ser realizada para verificar a existência de uma correlação entre as radiações não ionizantes e os efeitos carcinogênicos. No caso da radiação ultravioleta, é preciso estabelecer meios de esclarecimento do público para evitar exposições excessivas ou mesmo artificiais com propósito de bronzamento.

No Brasil, existem pesquisadores estudando os efeitos das radiações não ionizantes e diversos grupos se dedicando no desenvolvimento de equipamentos para a aplicação de laser em odontologia, oftalmologia e dermatologia e em terapia fotodinâmica.

Muita pesquisa deve ser realizada para verificar a existência de uma correlação entre as radiações não ionizantes e os efeitos carcinogênicos



### 3.7.5. Outras áreas

Os físicos estão atuando também em outras como informática médica, telemedicina, biomecânica e biomateriais, obtenção e análise de sinais fisiológicos, análise epidemiológica de moléstias, assim como participando em comitês para normatizar e regulamentar usos de radiações ionizantes e não ionizantes como assessores e consultores.

Existem, ainda em número reduzido, físicos contratados por fabricantes de equipamentos e acessórios em setores de assistência, treinamento e vendas.

Existem, ainda em número reduzido, físicos contratados por fabricantes de equipamentos e acessórios em setores de assistência, treinamento e vendas. Grupos de físicos também formaram empresas de consultoria em informática médica, proteção radiológica, bem como controle de qualidade em diversas áreas, e realizam atendimentos nas mais variadas regiões do País.

É importante lembrar que as pesquisas realizadas por alguns grupos de biofísica – em especial, a biofísica molecular e a neurofisiologia – trazem resultados que auxiliam a compreensão de mecanismos celulares e processos neurológicos, entre outros. Esses conhecimentos podem contribuir para o desenvolvimento de novas abordagens e metodologias em diagnóstico e terapia. Por outro lado, os físicos médicos podem fornecer informações de caráter clínico que venham indicar futuras patologias causadas por anormalidades em nível molecular. Assim, a colaboração entre biofísicos e físicos médicos pode ser bastante enriquecedora para ambos.

### 3.7.6. Principais desafios

Há uma falta crônica de profissionais bem treinados para trabalhar em nas diversas especialidades da física médica em todas as regiões do Brasil

Como foi mencionado anteriormente, há uma falta crônica de profissionais bem treinados para trabalharem nas diversas especialidades da física médica em todas as regiões do território brasileiro. Mesmo em radioterapia, área que, devido à obrigatoriedade formal, tem um maior número de físicos atuantes e na qual existem cursos de especialização ou treinamentos regulares instalados, podem ser encontradas clínicas que nunca tiveram a presença de físicos para a verificação dos planejamentos terapêuticos e controle dos equipamentos.

Por outro lado, a regulamentação nacional para a proteção radiológica e segurança tornará obrigatória a função do profissional que tenha formação em proteção radiológica em radiodiagnóstico e medicina nuclear, seguindo os mesmos moldes da radioterapia, para desempenhar tarefas que assegurem a qualidade dos procedimentos e a proteção de técnicos e pacientes. A

maioria desses profissionais é de físicos e há ainda postos de trabalho disponíveis para profissionais qualificados.

Como a física médica é uma área multi e interdisciplinar, é essencial que os físicos que nela atuam tenham uma formação voltada para essas características. Entretanto, existem poucos cursos de física com currículos enfocados às necessidades dessa especialidade e, para dificultar, um número relativamente elevado de físicos médicos em preparação trabalha rotineiramente em clínicas diversas, sem que obedeçam a um programa de estágio ou de aperfeiçoamento estabelecido.

Esse panorama identifica o primeiro desafio geral a ser vencido: a formação de físicos qualificados para atuarem nas diferentes áreas e funções. Os cursos com essa finalidade devem ter, além de uma base forte em física, um enfoque dirigido às práticas e aos objetivos da área desde o início, para que os egressos possam ingressar no mercado de trabalho já atuando sob a supervisão de profissionais mais experientes. Será também importante o estabelecimento de centros de referência e programas de intercâmbio para o treinamento de profissionais provenientes de regiões em que as diferentes tecnologias não tenham sido implementadas. Não se pode esquecer da formação de físicos egressos de cursos tradicionais que queiram entrar na área. Isso pode ser feito com programas de especialização e treinamento sistematizados em centros clínicos bem aparelhados e com equipes com profissionais qualificados de várias áreas.

**Um segundo desafio para os físicos médicos é a educação dos diferentes profissionais de saúde sobre os riscos e benefícios das radiações ionizantes e não ionizantes**

Um segundo desafio para os físicos médicos: a educação, principalmente dos diferentes profissionais de saúde – técnicos de radiologia, tecnólogos de imagens, biomédicos, pessoal da enfermagem, médicos, engenheiros clínicos e biomédicos – sobre os riscos e benefícios das radiações ionizantes e não ionizantes. Apesar do esforço dos físicos, as dúvidas e os vícios de procedimento, assim como os mitos e os medos, sempre voltam, e há a necessidade de uma contínua atenção na educação daqueles profissionais, para que o atendimento aos pacientes não seja prejudicado.

Também se faz necessária a divulgação à sociedade dos riscos e benefícios das radiações ionizantes e não ionizantes, em especial o esclarecimento com a apresentação de estudos epidemiológicos para combater o preconceito decorrente de mitos e medos.

Quando se consideram os resultados de grupos de pesquisa e as aplicações clínicas, surge um terceiro desafio no âmbito geral da física médica: como melhorar e implementar novas parcerias entre hospitais e universidades e centros de pesquisa, para que se gere mais conhecimento na área e se complemente a formação dos físicos médicos? Como mencionado, essa parceria tem duas vias, e ambas devem ser aproveitadas completamente. Em

Como melhorar e implementar novas parcerias entre hospitais e universidades e centros de pesquisa para que se gere mais conhecimento na área e se complemente a formação dos físicos médicos?

geral, a interação se dá no âmbito individual e pontualmente, de pesquisador com pesquisador e num aspecto particular de comum interesse. Muitas vezes, uma divulgação com conseqüente discussão

mais ampla pode resultar num melhor aproveitamento do tópico ou da metodologia em pauta.

O quarto desafio é como implementar parcerias entre grupos de pesquisa e fabricantes de equipamentos e/ou empresas de software, para que resultados importantes não sejam deixados em prateleiras dos centros de pesquisa e encontrem uso através da incorporação nos produtos comerciais, que são dominados por multinacionais? O outro lado dessa questão não é discutido, pois, em geral, esses fabricantes já financiam projetos de seu interesse em centros de pesquisa ou universidades em seus países de origem ou, então, simplesmente implementam algoritmos publicados em revistas científicas em seus sistemas. Uma possível solução – principal-

Como implementar parcerias entre pesquisadores e fabricantes para que resultados científicos importantes não sejam deixados em prateleiras?

mente, nas áreas de imagens, proteção radiológica e projeto e implementação de programas de qualidade – é a instalação de microempresas de software e de

prestação de serviços ou, ainda, fabricantes de equipamentos mais baratos, como os medidores de sinais elétricos e fisiológicos. Essa alternativa exige outras habilidades que fogem do escopo da formação de físicos e que necessita de parcerias com outros profissionais como engenheiros e administradores.

A lista de desafios não se limita a esses quatro, que são os mais presentes e que requerem reflexões por parte dos físicos, principalmente sobre os dois primeiros.

### 3.8. SIMULAÇÃO E MODELAGEM

Sistemas reais, não idealizados, são, em sua maioria, complexos. As idealizações – que permitem uma simplificação suficiente para uma modelagem com solução, sem o recurso de simulação numérica – acabam, em geral, por torná-los de pouca utilidade em processos com objetivo tecnológico. Assim, as técnicas de modelagem e simulação desenvolvidas para se compreender cientificamente sistemas complexos (ver ‘Sistemas complexos’) são diretamente aplicáveis à resolução de problemas com *bias* tecnológico.

Modelar e simular um sistema real, tanto com objetivo tecnológico quanto científico, consiste em caracterizá-lo por um conjunto de entidades abstratas, definindo suas inter-relações e um mapeamento único, que associe as entidades abstratas a observáveis do mundo real. Nesse sentido, a modelagem é um processo de produção de conhecimento, e a simulação uma técnica de solução que permite previsão, comparação dos resultados e a conseqüente validação dos limites do modelo.

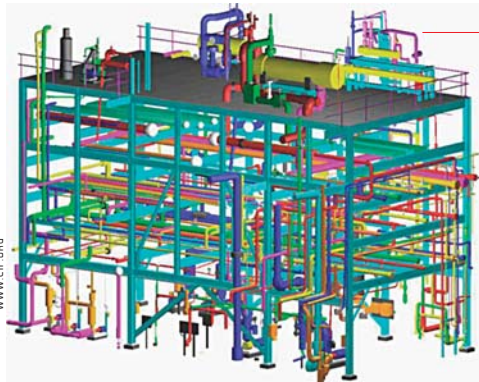
As técnicas de modelagem e simulação desenvolvidas para se compreender cientificamente sistemas complexos são diretamente aplicáveis à resolução de problemas com *bias* tecnológico

Técnicas de modelagem e simulação vêm sendo aplicadas em setores produtivos fora das universidades com freqüência crescente, tendo mudado de maneira decisiva o rumo de alguns desses setores. Todas as inovações recentes envolvem tecnologia de informação e modelagem matemática. Competência em modelagem matemática de sistemas reais, aliada àquela em engenharia, abre novas fronteiras tecnológicas e é essencial para um aumento considerável em produtividade e riqueza na sociedade.

Exemplos em que modelagem e simulação são essenciais podem ser encontrados em diferentes setores produtivos, como aqueles ligados à produção de petróleo e fontes de energia, análise e processamento de imagem aplicados à medicina, geofísica, monitoramento de grandes territórios – o a Amazônia –, produção de alimentos, transporte e armazenamento de grãos, problemas de otimização



WWW.EQUATORIAL.COM



aplicados ao planejamento de plantas industriais, logística e redes de telecomunicação

Devido ao desenvolvimento ocorrido nas últimas décadas, podemos também observar uma mudança de tendência na maneira de abordarmos o que é conhecimento, em nossa percepção de problemas e nas tentativas de soluções. Conhecimento é, agora, encarado não apenas com base em fatos ou verdades, mas também com base naquilo que pode ser conhecido e como se pode conhecer algum assunto.

Assim, dado um problema em que nem todas as premissas ou condições iniciais estão disponíveis, pode-se utilizar técnicas de simulação e modelagem para prever – dentro de limites de certeza e confiabilidade – quais os possíveis resultados. Essas técnicas auxiliam e guiam tomadas de decisão em situações realistas, o que é largamente aplicável em administração, tanto pública quanto privada.

O desafio multidisciplinar que se apresenta, então, é a facilitação da colaboração entre recursos humanos altamente treinados em modelagem e simulação numérica e profissionais ligados ao desenvolvimento de tecnologia nos diferentes setores produtivos, o que deve resultar em aumento da produtividade em médio prazo. Essa facilitação passa pela divulgação, nos meios produtivos, das potencialidades do desenvolvimento de modelos e simulações aplicados a problemas específicos e pela formação de físicos treinados em modelagem e simulação capazes de interagir com profissionais com outras formações.

**Há sistemas em que, devido à sua complexidade, a única forma de tratamento parece ser através da simulação numérica**

O potencial de aplicação da metodologia de simulação e modelagem parece hoje ser inesgotável. Há sistemas em que uma maior compreensão tem um valor tecnológico inestimável e para o qual, devido à sua complexidade, a única forma de tratamento parece ser através da simulação numérica. Em sistemas de grande porte, a limitação para uma abordagem adequada e que leve a resultados aplicáveis reside na dificuldade de obtenção de dados e medidas em quantidade suficientemente capaz de evitar uma explosão de parâmetros arbitrários no modelo ou nos recursos numéricos necessários para a solução. Abaixo, estão exemplos em áreas em que tem havido sucesso na aplicação.

### 3.8.1. Previsão do tempo e descrição climática

A relevância da previsão numérica do tempo e a descrição do clima para a economia de uma nação são indiscutíveis. Benefícios na produtividade da agricultura são, talvez, o ponto mais óbvio, mas a previsão de secas ou inundações influencia as tomadas de decisões na área de defesa civil, geração de energia elétrica e gerenciamento de recursos hídricos, além de contribuições nos campos dos transportes, abastecimento, turismo e lazer. O problema da previsão do tempo e da descrição climática é tanto teórico quanto de obtenção de dados suficientes e adequados.

A relevância da previsão numérica do tempo e a descrição do clima para a economia de uma nação são indiscutíveis

Do ponto de vista teórico, a ordem de um sistema pode reduzir drasticamente a quantidade de graus de liberdade de um sistema de forma a torná-lo analiticamente tratável. Exemplos típicos são os sólidos cristalinos e os corpos rígidos. Estes últimos, – embora formados por um número grande de moléculas ou íons – têm seu movimento descrito por apenas seis graus de liberdade. Isto acontece porque se considera que quaisquer dois pontos de um corpo rígido estão sempre à mesma distância. Assim, sabendo-se onde está um ponto qualquer e qual a orientação do corpo, tem-se informação para localizar qualquer outro ponto.

Fluidos são o caso oposto. Cada uma das partículas do fluido pode estar constantemente trocando sua posição em relação a qualquer outra. Assim, com exceção de um escoamento laminar, para o qual existem soluções analíticas, o tratamento da dinâmica de fluidos requer muitas variáveis, de maneira que a solução numérica é a única possível.

No caso específico da atmosfera, o problema atinge um grau de complexidade extremo:

- i) é um sistema aberto, que recebe energia do Sol em taxas variáveis e que dependem da composição local e instantânea do ar;
- ii) troca calor com uma infinidade de outras fontes naturais – oceanos, vulcões etc. – ou artificiais – indústrias, queima de petróleo;
- iii) interage com a superfície do planeta, que é altamente irregular;



CIEE



- iv) troca calor e massa com a biosfera;
- v) está localizado sobre uma topologia esférica e não plana;
- vi) sofre a ação do movimento de rotação da Terra e da atração da Lua e do Sol (marés), entre outros fatores.

Mais: a composição da atmosfera pode variar muito local e temporalmente, através da troca de partículas de poluentes, poeira, água etc., que mudam as propriedades da atmosfera quanto à absorção de energia eletromagnética e, portanto, calor. Numa situação dessa natureza, a regra geral é que os fluxos existentes sejam turbulentos.



Uma descrição adequada de fluxos turbulentos e capaz de produzir previsões confiáveis do comportamento do clima – tanto global quanto regional – é um dos grandes desafios científicos deste início de século. Uma descrição completa de um fluxo turbulento se daria pelo tratamento, de cada uma das partículas que o compõem, como os elementos do sistema, considerando suas propriedades como partículas, como absorvedores de energia

eletromagnética e como dissipadores de energia. Observe que a distribuição de tamanhos das partículas da atmosfera é bastante larga, indo desde daquele de poeira até de moléculas como oxigênio. Essa abordagem ‘microscópica’ é certamente impossível com os recursos numéricos disponíveis.

Uma segunda abordagem – agora, mais realista – se dá através da solução da equação de Navier-Stokes (uma equação que descreve o movimento de um fluido) e suas generalizações para contemplar fluidos compostos de diferentes gases e partículas. Essas equações tratam da evolução de concentrações locais dos vários componentes do fluido, considerando as diferentes interações entre eles e com o contorno do fluido. As soluções dessas equações são forçosamente numéricas, dado o número de diferentes concentrações, a complexidade do contorno e a não-linearidade das interações. A solução numérica requer discretização no tempo e no espaço, implicando um tamanho mínimo no qual as concentrações poderiam ser consideradas uniformes. No entanto, fluxos turbulentos são caóticos, com sensibilidade crítica nas condições iniciais, isto é, a incerteza a respeito da configuração do sistema aumenta exponencialmente a partir de uma incerteza inicial.

Há, portanto, no mínimo, duas fontes de incerteza sobre as condições da atmosfera, tomadas como iniciais para a previsão do tempo: uma delas

inerente ao modelo, em que a discretização do espaço e do tempo representa perda de informação; e uma segunda que se refere à quantidade de medidas disponíveis, como velocidade do vento, temperatura, pressão, umidade em diferentes pontos. A primeira fonte de incerteza é tratada pela proposição de modelos mais precisos para cada região, enquanto a outra se faz através da implementação de estações de medidas em número suficiente e em localizações adequadas, bem como da obtenção de dados de satélites.

No Brasil, a previsão numérica do tempo é realizada pelo Centro de Previsões Climáticas e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE). Com uma estrutura composta por supercomputadores, uma rede de colaborações com centros de pesquisa do País e do exterior e com acesso a dados de satélites, o CPTEC tanto fornece dados diários sobre a previsão do tempo na América do Sul como um todo quanto previsões regionais – Pantanal e Amazônia, por exemplo. Para isso, mantém projetos de pesquisa em andamento, visando ao aprimoramento da obtenção de dados, a atualização do contorno através do mapeamento de dados da biosfera em diferentes regiões, a adequação dos modelos para cada região e a interpretação de dados obtidos de satélites ou outras fontes.

Com um objetivo bem definido, o CPTEC é essencialmente um centro de pesquisa e desenvolvimento multidisciplinar em que a aplicação de física é difundida, e a presença de pesquisadores com uma formação nessa área é generalizada

No Brasil, a previsão numérica do tempo é realizada pelo Centro de Previsões Climáticas e Estudos Climáticos, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

### 3.8.2. Ecologia e meio ambiente

Ecologia é o ramo da biologia que trata da interação de organismos vivos com seu meio ambiente. Importante referência, nesse domínio, é o caráter multidisciplinar, necessário a uma compreensão mais abrangente dos sistemas naturais. Diversos aspectos da matemática, da física, da química, das ciências da Terra e, sobretudo, da biologia encontram-se presentes na investigação de sistemas naturais, mesmo os mais simples.

Um problema extremamente significativo para o Brasil é a questão da descrição de florestas, assim como sistemas do tipo cerrado e caatinga

Um problema extremamente significativo para o Brasil é a questão da descrição de florestas – tendo como exemplos de estudo a mata Atlântica e a floresta

Amazônica –, bem como de sistemas do tipo cerrado e caatinga, por exemplo. Estudos pertinentes à agricultura e à dinâmica de solos passam necessariamente por aspectos envolvendo a microbiologia, pois os solos estão longe de ser apenas sistemas físico-químicos controlados por uma dinâmica de fluidos. Para uma descrição completa, devem ser considerados vários aspectos de grande relevância biológica, como os nutrientes do solo, o tipo de fotossíntese, o comportamento acoplado da atmosfera com a vegetação, assim como a estabilidade ou não diante de perturbações antropogênicas.

Modelo matemático é um conjunto de suposições sobre um sistema ecológico, expresso em linguagem matemática. Grande parte da ecologia teórica é sustentada por modelos matemáticos, os quais são largamente utilizados em várias áreas de ecologia aplicada, gerenciamento de recursos renováveis e não renováveis, epidemiologia e proteção ambiental. Por se tratarem, em geral, de equações diferenciais não lineares, quase todo trabalho em dinâmica ecológica requer soluções numéricas de equações dinâmicas.

Dado que existe 1,5 milhão de espécies de plantas e animais, vários ‘meios ambientes’, bem como grande variedade de mudanças possíveis nesses meios, observações sistemáticas são factíveis apenas em uma pequena fração de sistemas ecológicos.

Um objetivo importante para os ecologistas é a construção de uma teoria geral que possa trazer ordem às observações de um mundo diverso

Um objetivo importante para os ecologistas é a busca de princípios que se apliquem a mais de uma situação, isto é, a construção de uma teoria geral que

possa trazer ordem às observações de um mundo diverso.

Enquanto os trabalhos pioneiros eram caracterizados principalmente pelos conceitos de balanço e equilíbrio, de homogeneidade e determinismo, idéias teóricas passaram a ser desenvolvidas enfocando sua dinâmica, isto é, a forma através da qual sistemas ecológicos evoluem no tempo. Outros trabalhos se seguiram, incluindo como propriedades essenciais de um ecossistema não apenas variabilidade temporal, mas também espacial. Outro conceito que se tem mostrado importante é o de escala: quanto mais refinada for a escala de observação, maior é o grau de variabilidade do siste-

ma no espaço e no tempo. Previsibilidade depende, portanto, da escala de investigação e não existe uma única escala natural e correta. Necessária na descrição desses sistemas, a inclusão adequada do largo espectro de escalas geométricas e temporais implica selecionar métodos de observação e de modelagem dos fenômenos.

Quando formulamos modelos, questões que se colocam em diferentes níveis de organização ecológica são classificadas segundo dois critérios principais: um é o tipo de hábitat, e o outro são os tipos de organismos. Entre as questões relevantes para uma grande variedade de organismos e/ou habitats, podemos citar:

i) questões relacionadas com indivíduos – o que determina quão rápido crescem, se desenvolvem e se reproduzem os organismos?

Quais são as causas de mortalidade?

ii) questões relacionadas com populações – o que determina se populações crescem ou declinam? Por que algumas populações são estáveis por várias gerações, enquanto outras mostram explosões e extinções? O que causa extinção? Uma população é constituída por todos os organismos de uma espécie específica em uma certa região;

iii) questões relacionadas com comunidades – o que determina se populações de diferentes espécies podem coexistir? Os detalhes de relações tróficas – ou seja, quem é predador de quem – interessam?

Uma comunidade é constituída por todas as populações em uma certa região;

iv) questões relacionadas com ecossistemas – como fluem a energia química armazenada e a matéria natural através de um ecossistema? O que controla esse fluxo? De que forma a dinâmica das populações constituintes é influenciada pelo fluxo de energia ou de nutrientes? Um **ecossistema** é uma comunidade relacionada com seu meio ambiente físico e químico;

Como operam os ecossistemas? A descrição do comportamento de qualquer sistema pode ser efetuada cegamente ou pode ser baseada em algum grau de compreensão dos mecanismos básicos essenciais à dinâmica do sistema. Na classificação das questões acima estabelecidas, um papel fundamental é exercido pelo organismo individual, o que é consistente com a



ECOSYSTEM ECOLOGY LABORATORY-NORTHERN ARIZONA UNIVERSITY

Procurar entender qualquer sistema complexo consiste na busca de um padrão, isto é, na redução de complexidade a poucas regras simples

teoria evolucionária, na qual, de fato, o indivíduo é o ator principal. Organismos individuais têm propriedades que mudam lentamente através da operação de evolução.

A visão neodarwiniana clássica é a de que a evolução é conduzida por duas forças, a criação de novo material genético (genótipos), através de mutação, e a perda de variação genética através de seleção natural e desvio genético – que discrimina genótipos com base em sua contribuição para gerações futuras. Dessas discussões sobre teoria evolucionária, faz-se clara a distinção entre explicação e previsão, bem como do quanto a previsão de eventos evolucionários é dificultada pela importância da aleatoriedade, contingência histórica e restrições.

Procurar entender qualquer sistema complexo consiste na busca de um padrão, isto é, na redução de complexidade a poucas regras simples, princípios que permitam a abstração da essência, a partir do ruído. Essa é também a chave para o gerenciamento: existe padrão em todos os níveis e em todas as escalas; reconhecer essa multiplicidade de escalas é fundamental para descrever e entender ecossistemas.

Dado que previsibilidade é entrelaçada com variabilidade, bem como com as escalas temporal e espacial de interesse, um desafio central em teoria ecológica deve ser o de conseguir entender:

- i) como é que as escalas são envolvidas;
- ii) como sistemas se comportam em diversas escalas;
- iii) como variam tanto a medida quanto a dinâmica de fenômenos particulares através de escalas.

A previsão da dinâmica de populações naturais ainda não foi adequadamente solucionada, nem mesmo para recursos renováveis

Os limites inerentes à previsibilidade em longas escalas de tempo enfatizam a importância de monitorar e de acoplar toda ação de gerenciamento com algum meca-

nismo para modificação baseado na análise dos dados obtidos a partir desse monitoramento. Esse gerenciamento adaptativo reconhece explicitamente os limites à previsibilidade e coloca ênfase na previsão de curto alcance, na qual a influência dos fenômenos não lineares é menos importante.

Assim, o gerenciamento do meio ambiente apresenta vários problemas de ordem geral. A previsão da dinâmica de populações naturais ainda não foi adequadamente solucionada, nem mesmo para recursos renováveis. As difi-

culdades são devidas à nossa incapacidade de identificar e prever variações nos fatores que controlam a dinâmica; à variabilidade temporal e espacial de parâmetros; e à propensão inerente aos modelos dinâmicos não lineares de apresentar dinâmica turbulenta. Esses problemas são evidentemente multiplicados aos considerarmos comunidades ou ecossistemas, em que, além da multiplicidade de escalas, é maior o número de interações. Os modelos devem apresentar respostas não apenas em termos de médias, mas sim em função de variâncias associadas com os efeitos estocásticos e incertezas na estimativa de parâmetros. Desafios maiores ainda se apresentam quando a escala é mudada, de forma que passamos de problemas locais para problemas globais ou regionais.

Finalmente, devemos admitir os limites de nossa capacidade de prever – o que pode ser encarado como o princípio da incerteza do ecologista – e estar preparados para gerenciar em face dessa incerteza. Isso exigirá o desenvolvimento de abordagens mais sofisticadas e flexíveis para gerenciamento e avaliação de risco.

**Devemos admitir os limites de nossa capacidade de prever – o que pode ser encarado como o princípio da incerteza do ecologista – e estar preparados para gerenciar em face dessa incerteza**

### 3.8.3. Tráfego em grandes cidades

Problemas relacionados a trânsito em cidades ou em rodovias são experiências diárias de cada cidadão. Em grandes cidades, o aumento da concentração de veículos ao longo dos anos causa engarrafamentos diários, com sérias implicações ao ambiente, perdas econômicas, perda de tempo dos cidadãos etc.

Do ponto de vista científico, pode-se analisar trânsito sob vários aspectos: como um problema de difusão de elementos autopropelentes com rotas grosseiramente definidas em um espaço limitado; como um problema de interação entre agentes que têm uma cultura, uma educação e características individuais específicas; ou ainda, admitindo-se a existência de informações globais instantâneas – rádio, avisos com conteúdo variável –, como um problema de unidades globalmente acopladas.

Em todos esses casos, pode-se usar – e, de fato, em muitos casos, isso já



YELLOWSTONE NATIONAL PARK

é verdade – simulações e modelos para prever o desfecho de situações, planejar soluções em longo prazo ou mesmo alterar configurações instantâneas de elementos de trânsito – sinais, direção de ruas –, uma vez que, com certos modelos, já se fazem simulações mais rápidas que em tempo real.

Apesar de antiga (1970), a área de simulação em trânsito começou a ser abordada pelos físicos no início da década de 1990. Conceitos de mecânica estatística – por exemplo, a introdução de fases de fluxo de trânsito – e conceitos de sistemas dinâmicos – por exemplo, controle de sistemas caóticos e técnicas computacionais de autômatos celulares – começaram, então, a ser usados. Vários problemas permanecem abertos: a origem das diferentes fases do trânsito, origem das ondas de trânsito, a importância das características individuais dos motoristas (teoria de jogos), a influência da ordem dos sinais, as possibilidades de intervenções globais centralizadas. Enfim, o desafio de achar uma solução que otimize o tráfego em grandes cidades está longe de ser vencido.

**No Brasil, o nível de informação e informatização do trânsito é precário; embora existam projetos nessa linha nas universidades, eles não são implementados**

No Brasil, o nível de informação – e informatização – do trânsito é precário. Essencialmente, há poucas informações difundidas pelo rádio, e isso em algumas cidades. A centralização de informações ou controle infor-

matizado que permita uma alteração dinâmica estratégica do fluxo são mínimos. Embora existam projetos nessa linha nas universidades, eles não são implementados.

A contribuição dos físicos advém de sua convivência com conceitos cunhados nas áreas de mecânica estatística e de sistemas dinâmicos, duas áreas que têm sido usadas para estudar os chamados sistemas complexos. Certamente, eles têm um papel estratégico a desempenhar em uma equipe multidisciplinar que abordasse o problema.

### 3.8.4. Física em economia e finanças

É bem conhecido o fato de que, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, um grande número de doutores em física vem sendo contratado por bancos de investimentos e por outras empresas financeiras. Mais recentemente, os físicos começaram a publicar trabalhos em assuntos de





As interações que mantêm os nucleotídeos do DNA são ligações de hidrogênio (figura) entre as chamadas bases nitrogenadas (guanina, citosina, adenina e timina). Essa é uma interação de natureza predominantemente eletrostática. Técnicas desenvolvidas na física têm encontrado aplicações amplas na biologia e na medicina. Equipamentos de ressonância magnética nuclear (NMR), cristalografia de raios X, microscopia eletrônica, espectroscopia eletrônica e infravermelho, entre outras, têm sido amplamente usadas no estudo de sistemas biológicos.

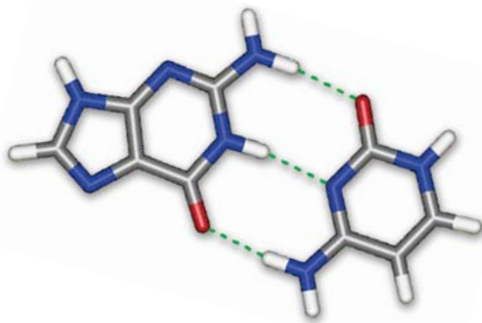
**Problemas fundamentais na biologia que podem ser estudados usando-se a física: interações intermoleculares, biologia estrutural, fotobiologia, bioinformática, biomecânica, motores moleculares**

Na realidade, a interação entre a física e a biologia é mais antiga, e não surpreende que físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), prêmio Nobel de 1933, foi um dos primeiros cientistas a mostrar que a origem da

replicação, associada à preservação da vida, estaria associada a um processo molecular. Reciprocamente, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) observou o fenômeno – explicado, em 1905, pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955) – do movimento de moléculas em suspensão, que deu grande ímpeto à mecânica estatística e à visão atomística da matéria. Foi graças aos estudos de raios X que o biólogo norte-americano James Watson e o físico e biólogo britânico Francis Crick (1916-2004) desvendaram a estrutura do DNA. Ainda que essas duas áreas tenham passado por influência recíproca, foi nos últimos anos que a aplicação da física na biologia teve um aumento considerável.

Problemas fundamentais na biologia que podem ser estudados usando-se a física incluem, entre outros, interações intermoleculares, biologia estrutural, fotobiologia, bioinformática, biomecânica, motores moleculares.

A ligação de hidrogênio tripla entre a guanina e citosina do DNA



### 3.9.1. Enovelamento de proteínas

Aminoácidos se combinam para formar as enzimas e proteínas. A combinação se dá através da ligação peptídica entre o carbono e o nitrogênio (C-N) que liga covalentemente dois aminoácidos. A compreensão da ligação peptídica é importante para se entender a

formação das proteínas. A estrutura final desse dímero tem muitas e distintas conformações possíveis. Para um grande número de aminoácidos, como aquele existente numa proteína, o número possível de conformações é astronômico. Por exemplo, uma proteína formada por 100 aminoácidos dá origem a um número estimado de  $10^{34}$  possíveis conformações. Em apenas uma delas a proteína é funcional.

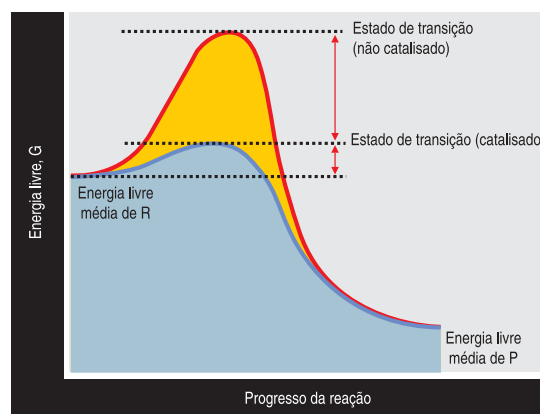
Assim, uma pergunta fundamental é como a proteína traça sua estratégia precisa em busca de uma solução extremamente rápida para obtenção de sua estrutura final. Ressalte-se que a má formação, provocada por um enovelamento errado, pode levar a doenças graves como ‘doença da vaca louca’, doença de príon, mal de Alzheimer etc. Estudos realizados por simulação computacional, modelagem estatística, entre outros, são técnicas recentes que podem ajudar a solucionar esse mistério. Modelos físicos têm sido tentados, e espera-se que progressos sejam obtidos nos próximos anos.

Uma pergunta fundamental é como a proteína traça sua estratégia precisa em busca de uma solução extremamente rápida para obtenção de sua estrutura final

### 3.9.2. Inibidores enzimáticos

Entre as proteínas, as enzimas desempenham um papel importante e são responsáveis pelas reações químicas envolvidas no processo biológico. Essas reações ocorrem no sítio ativo da enzima, cuja função é atuar como um catalisador de reações químicas no sítio. O conhecimento dos processos bioquímicos pode também ser usado para inibir reações adversas ao interesse biológico. Por exemplo, o uso de inibidores enzimáticos, paralisando a ação do sítio ativo, pode curar doenças que vão do câncer ao mal de Chagas.

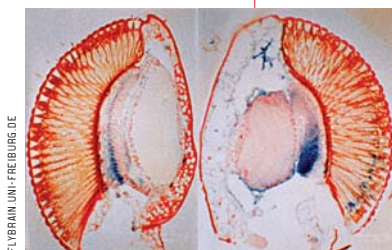
Por essas razões, tem sido muito intensa a participação recente de física no desenvolvimento de inibidores enzimáticos. Essa participação, além de ser de grande interesse não apenas para a ciência básica, pode também gerar desenvolvimento de eficientes fármacos para a indústria farmacêutica.



Um processo catalítico diminui a barreira de energia necessária para transformar o sistema de R (reagentes) em P (produtos)

### 3.9.3. Fotobiologia

Essa área tem desafios fundamentais que passam pela compreensão da interação da luz com material biológico. Entre esses, encontram-se a fotossíntese e os mecanismos de **visão**. Na fotossíntese, energia luminosa é convertida em energia para uso por sistemas biológicos.



FLYBRAIN/UNI-FREIBURG DE

Fotossíntese é feita por diferentes organismos, de plantas a bactérias, sendo que pigmentos fotossintéticos existem em grande variedade e são, normalmente, ligados a proteínas que absorvem luz para a conversão em energia. No caso da fotossíntese, a clorofila absorve luz, e a excitação é repassada ao centro reativo.

### 3.10. MONITORAMENTO ATMOSFÉRICO

Um dos problemas científicos mais complexos com que a ciência se depara hoje diz respeito à questão das mudanças climáticas globais e da poluição atmosférica global e urbana. A física tem muito a contribuir para compreensão dos processos e das possíveis soluções estratégicas para lidar com essas complexas questões globais.

**Um dos problemas científicos mais complexos com que a ciência se depara hoje diz respeito à questão das mudanças climáticas globais e da poluição atmosférica global e urbana**

A atmosfera é um sistema dinâmico altamente complexo, não linear e com forte interface com o sistema biológico e socioeconômico local, regional e global. O estudo desses processos atmosféricos re-

quer uma abordagem multidisciplinar, envolvendo física, química, biologia, meteorologia e aspectos socioeconômicos integrados.

A composição da atmosfera terrestre consiste de diversos gases, dominados pelo nitrogênio ( $N_2$ ), 78%; oxigênio ( $O_2$ ), 21%; argônio (Ar), 1%; vapor de água e gases que aparecem em concentrações pequenas e são chamados gases-traços, como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), o monóxido de carbono (CO), o metano ( $CH_4$ ), o ozônio ( $O_3$ ), o óxido nitroso ( $N_2O$ ), o dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ). Importante também na composição da atmosfera são os chamados aerossóis, partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera e que são responsáveis pela formação de nuvens e influenciam

no balanço de radiação solar e na formação e precipitação de nuvens.

A parte da atmosfera em contato com a superfície terrestre é chamada troposfera, consistindo da camada que vai até uma altitude de aproximadamente 14 km, a partir do qual inicia-se a estratosfera. É na troposfera que a maior parte dos fenômenos climáticos ocorrem e onde poluentes atmosféricos são emitidos, reagem e se depositam.

O monitoramento atmosférico pode ser realizado para cumprir objetivos como:

- 1) medição da concentração de poluentes em áreas urbanas – para isso, os parâmetros importantes são  $O_3$ ,  $NO_2$ , CO e aerossóis;
- 2) monitoramento de mudanças globais – parâmetros:  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $O_3$  e outros;
- 3) monitoramento climático – radiação, nuvens, aerossóis, precipitação etc.

Em ambos – medição e monitoramento –, a intervenção de físicos no processo de medida e de diagnóstico, bem como na proposição de soluções é relevante.

É na troposfera que a maior parte dos fenômenos climáticos ocorre e onde poluentes atmosféricos são emitidos, reagem e se depositam



### 3.10.1. Poluição atmosférica urbana

As emissões atmosféricas de veículos e indústrias em áreas urbanas elevam a concentração de poluentes atmosféricos, trazendo danos à saúde da população. Órgãos de controle de poluição como a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (Cetesb) e a Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente (Feema), ambas no Estado de São Paulo, operam redes de monitoramento para acompanhar os níveis de poluentes e monitorar o efeito de políticas de controle de poluição em áreas urbanas. Em cidades com altos níveis de poluentes, como São Paulo, a Cetesb monitora a concentração de  $O_3$ , CO,  $NO_2$ , hidrocarbonetos, aldeídos, material particulado e outros parâmetros. A figura coloca os principais poluentes atmosféricos em áreas urbanas e seus efeitos gerais na saúde.

A legislação brasileira estipula valores máximos de concentração para esses poluentes, mas os valores são frequentemente excedidos há mais de

POLUENTES	CARACTERÍSTICAS	FONTES PRINCIPAIS	EFEITOS GERAIS SOBRE A SAÚDE	EFEITOS GERAIS AO MEIO AMBIENTE
Partículas totais em suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho <100 microns.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua 'ressuspensa', queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas (MP <sub>10</sub> ) e fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho <100 microns.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fosforos. Pode ser transformado em SO <sub>3</sub> , que na presença de vapor de água, passa rapidamente em H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, póla e papel.	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO <sub>2</sub> .	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação (por ex. folhas e colheitas).
Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processo de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, baixa de resistência contra infecções respiratórias.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, no aprendizado de trabalho e visual.	
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração. O O <sub>3</sub> tem sido associado ao aumento de admissões hospitalares.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas, plantas ornamentais.

FONTE: CETESB, 2002

Fontes, efeitos e características dos principais poluentes urbanos

20 anos – não só em São Paulo, mas em várias áreas urbanas do País. Essas violações dos padrões de qualidade do ar em São Paulo são feitas sem que exista um plano integrado de controle de poluição do ar, com metas claras e políticas públicas que dêem suporte a esse plano – por exemplo, ampliação da rede do metrô, incentivos para carros a gás natural etc.

Em São Paulo, a Cetesb tem uma extensa rede de monitoramento atmosférico, com 29 estações fixas e outras móveis. Como a região metropolitana da cidade tem cerca de 17 milhões de habitantes – espalhados por cerca de 1.747 km<sup>2</sup> de área –, seria necessária uma rede mais extensa com cobertura mais densa, em particular em áreas de grande densidade populacional. Os dois principais problemas de poluição do ar em São Paulo são a alta concentração de material particulado em suspensão na atmosfera e as altas concentrações de ozônio.

A meteorologia afeta a concentração de poluentes. Por exemplo, no inver-

no, observam-se freqüentes inversões térmicas a baixa altura, que, em conjunto com as altas emissões, fazem com que os níveis de poluentes atinjam valores maiores que o permitido pela legislação. A concentração de alguns poluentes cujos padrões máximos não são explicitamente limitados pela legislação ambiental brasileira – formaldeído e o acetaldeído – são muito altos em áreas urbanas no Brasil. Esses compostos são emitidos na queima do etanol, hidratado ou misturado à gasolina. A dinâmica desses compostos na atmosfera ainda é muito pouco conhecida, mas é importante para a situação brasileira.

No Brasil, diversas áreas urbanas têm problemas de poluição do ar que precisam de soluções locais. Medidas em baixa concentração de poluentes atmosféricos requerem métodos analíticos sofisticados, como a medida de metais pesados utilizando técnicas de geração de íons por plasma e espectrometria de massa. A modelagem do transporte, da dispersão atmosférica regional e da deposição é uma área importante da física e envolve processos que ainda são pouco conhecidos – por exemplo, deposição turbulenta de poluentes. A microfísica de nuvens envolve processos ainda não compreendidos, críticos no mecanismo de formação da precipitação e na deposição de poluentes.

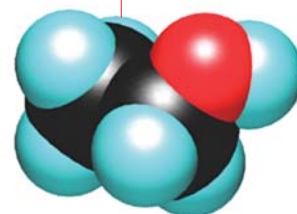
A dinâmica na atmosfera de compostos emitidos na queima do etanol ainda é muito pouco conhecida, mas é importante para a situação brasileira

### 3.10.2. Poluição atmosférica global

Em nível global, as concentrações de poluentes atmosféricos estão aumentando significativamente nos últimos 100 anos. As emissões globais de gases que aumentam o efeito estufa natural da Terra – como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , clorofluorcarbonos etc. – se elevaram com a queima de combustíveis fósseis e as emissões industriais globais. Esse aumento de concentração em gases que afetam o balanço radiativo terrestre está causando um aumento na temperatura média de nosso planeta, que já se aqueceu cerca de 0,7 grau celsius desde 1850.

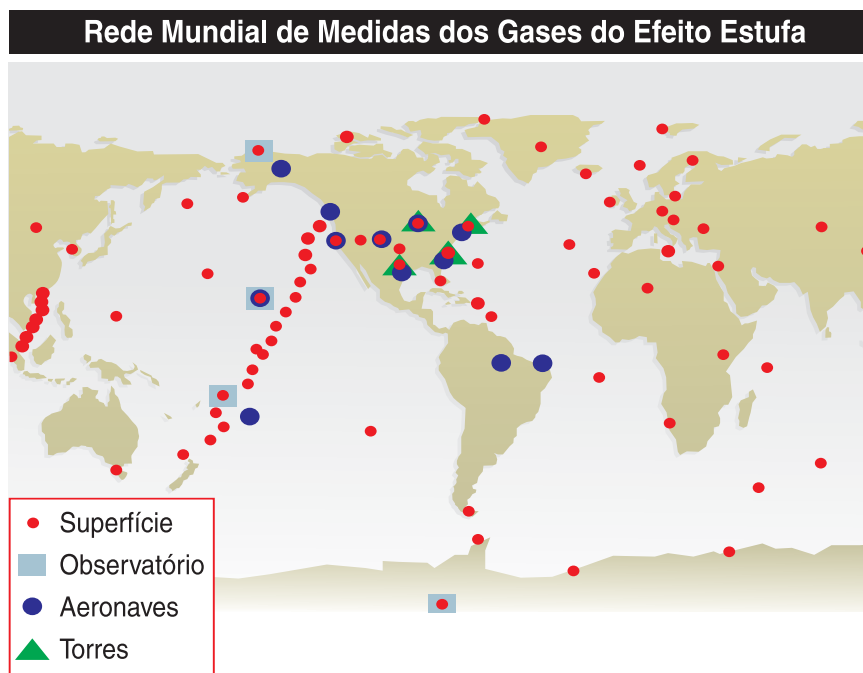
As previsões do IPCC – sigla inglesa para Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – é que, no final deste século, as temperaturas podem subir entre 3 e 8 graus celsius – mas com grandes incertezas, devi-

Previsões indicam que, no final deste século, as temperaturas globais podem subir entre 3 e 8 graus celsius; no entanto, há grandes incertezas nesses cenários





Rede Mundial de medidas de gases de efeito estufa operada pela NOAA (Agência Nacional de Oceanos e Atmosfera)



do ao desconhecimento do funcionamento geofísico do sistema terrestre como um todo.

Programas de monitoramento atmosférico global existem desde a década de 1960, contando com uma extensa rede de medidas de superfície. Com o advento de medidas de satélite na década de 1980, essas observações conseguem hoje atingir os principais poluentes com uma escala global. A **figura** apresenta uma rede global de medidas de gases de efeito estufa operada pela NOAA (Agência Nacional de Oceanos e Atmosfera), dos Estados Unidos.

Ainda conhecemos pouco sobre as complexas interações entre clima e mudanças na composição da atmosfera. A interação biosfera-atmosfera é extremamente complexa, e questões-chave como o balanço de carbono e a energia estão em aberto hoje. O papel da física no fechamento desses balanços é crucial, mas ela tem que ser feita em intervenções multidisciplinares, envolvendo a química, a biologia, a meteorologia e aspectos socioeconômicos.

**O Brasil opera uma rede observacional de superfície na Amazônia que mede a coluna total de aerossóis emitidos em queimadas e seus efeitos nas nuvens e na precipitação amazônica**

É possível fazer medidas globais por sensoriamento remoto da concentração de aerossóis com a ajuda de satélites, fornecendo uma situação diária da situação planetária. Essas partículas alteram signifi-

cativamente a absorção de radiação solar e a estrutura de nuvens. Essas medidas de parâmetros atmosféricos por satélites a partir de medidas de radiância necessitam de redes observacionais de superfície para sua validação. O Brasil opera uma dessas redes na Amazônia, que mede a coluna total de aerossóis emitidos em queimadas e seus efeitos nas nuvens e na precipitação amazônica.

Modelos globais integrados entre atmosfera, biosfera e oceanos estão sendo desenvolvidos, mas também aqui a física desse sistema é pouco compreendida

### 3.10.3. Balanço de radiação planetária

Com a emissão de partículas de aerossóis, gases-traços e seus efeitos na formação de nuvens, o homem está alterando, de modo significativo, o balanço radiativo atmosférico. Tanto na faixa da radiação visível – afetada pelos aerossóis – quanto no ultravioleta – afetado pela camada de ozônio –, bem como no infravermelho – afetado pelos gases de efeito estufa e pelo vapor de água –, o balanço de radiação atmosférico está sendo modificado. Os efeitos dessas alterações são ainda pouco compreendidos. Modelos globais integrados entre atmosfera, biosfera e oceanos estão sendo desenvolvidos, mas também aqui a física desse sistema é pouco compreendida.

O transporte de calor, massa e as interações com o sistema biológico são altamente não lineares e existem limiares que, uma vez ultrapassados, a dinâmica do sistema muda completamente. Medidas precisas do balanço de radiação nas várias faixas do espectro eletromagnético e em ecossistemas diferentes são importantes. Modelos de transferência radiativa foram desenvolvidos na década de 1970, mas processos importantes – por exemplo, espalhamento de radiação por partículas não esféricas – continuam em aberto.

Neste século, presenciaremos alterações importantes no clima terrestre global e também em nível regional. Elas terão implicações significativas no sistema socioeconômico como conhecemos hoje. A física pode e deve dar contribuições significativas no entendimento de processos críticos que sustentam o funcionamento de nosso planeta.

Neste século, presenciaremos alterações importantes no clima terrestre também em nível regional; elas terão implicações significativas no sistema socioeconômico como conhecemos hoje

### 3.11. ECOLOGIA E MEIO AMBIENTE

Há vários problemas no Brasil relacionados com importantes impactos socioeconômicos cujo diagnóstico e entendimento de processos científicos ainda deixam a desejar. Existe um enorme ‘mercado’ para desenvolvimentos científicos em física que são críticos e relevantes não só para o País, mas também para a fronteira científica em nível global. Do desenvolvimento de tecnologia de instrumentação necessária para medidas ambientais à modelagem de processos complexos e dinâmicos, o físico tem um papel crítico no diagnóstico e na mitigação de problemas ambientais. Isso ocorre para questões de contaminação em solos, água e atmosfera.

No Brasil, são inúmeras as questões associadas à poluição do ar, não só nas grandes metrópoles, como São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre, mas também em áreas remotas que sofrem os impactos de queimadas de florestas. Os físicos têm um papel crítico no desenvolvimento de métodos de medidas de poluentes atmosféricos, como aqueles relacionados à coleta de material particulado em suspensão na atmosfera ou à caracterização físico-química de poluentes. Por exemplo, existem aceleradores de partículas em Porto Alegre, São Paulo e Rio de Janeiro que implementaram o método de análise elementar PIXE (sigla inglesa para emissão de raios X induzida por partículas), que determina a concentração de metais pesados com limites de detecção e precisão analítica impossíveis de serem obtidos por métodos químicos mais tradicionais.

**Medidas da distribuição do tamanho de partículas nanométricas requerem métodos que estão longe de serem de domínio de órgãos federais e estaduais de controle ambiental**

Evidentemente, físicos são essenciais no desenvolvimento e na operação de métodos analíticos sofisticados. Medidas de metais pesados com analisadores que volatilizam as amostras com plasma de altíssima temperatura e detecção por espectrometria de massa já são de uso corriqueiro em vários laboratórios. Medidas da distribuição do tamanho de partículas nanométricas requerem métodos que estão longe de serem de domínio de órgãos de controle ambiental como Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) e da Companhia de Tecnologia de Saneamento (Cetesb) – respectivamente, federal e estadual (SP) –, embora sejam críticas no entendimento de processos de formação de material particulado em áreas urbanas. Parcerias entre grupos de pes-

quisa universitários e órgãos de controle ambientais são importantes na potencializar métodos inovadores de diagnóstico ambiental.

### 3.11.1. Modelagem atmosférica e de poluentes

Os físicos também se destacam na área de modelagem de processos atmosféricos, como a difusão e a turbulência atmosférica. Os processos de transporte e deposição de poluentes atmosféricos – altamente não lineares e

complexos – ainda são pouco compreendidos. A deposição de poluentes em ecossistemas e áreas urbanas no Brasil tem aspectos diferentes daquela que predomina na Europa e na América do Norte. Como nossa matriz energética é diferente da norte-americana, por exemplo – nesta predomina a queima de combustíveis fósseis –, concentrações atmosféricas de sulfatos e nitratos são muito menores no Brasil, com uma predominância de compostos diferentes daqueles observados no hemisfério Norte. Isso requer estudos localizados para os poluentes que são relevantes para nós. Por exemplo, no interior do Estado de São Paulo, existe a questão importante da deposição atmosférica de compostos provenientes da queima de cana-de-açúcar, que

**No interior do Estado de São Paulo, existe a questão importante da deposição atmosférica de compostos provenientes da queima de cana-de-açúcar, que inexistem em larga escala no hemisfério Norte**

inexistem em larga escala no hemisfério Norte. Modelos regionais e globais de transporte de poluentes, como os implementados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (SP), para previsão de tempo requerem o trabalho altamente especializado de físicos. O maior supercomputador do hemisfério Sul, o NEC SX-6, do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, do INPE, roda modelos de circulação global e regional com características que são únicas em nossa região tropical, como a convecção tropical, por exemplo, e grandes experimentos são realizados para melhorar as representações utilizadas nos modelos de previsão de tempo. É enorme o impacto socioeconômico na produção agrícola, defesa civil, indústria do turismo, entre outras atividades importantes para o Brasil.



PERGAMINE WOOD OBSERVATORY

Um dos problemas científicos mais importantes deste século é a questão das mudanças climáticas globais. O homem, desde a Revolução Industrial, tem a capacidade de alterar, de forma significativa, a composição global da atmosfera, com impactos possivelmente importantes, mas imprevisíveis. Ainda conhecemos pouco do funcionamento físico global da Terra para que possamos fazer previsões realistas de como será o clima do planeta quando a concentração de dióxido de carbono dobrar no final deste século, como prevêem alguns modelos. Com a grande elevação da concentração atmosférica de gases de efeito estufa – dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, vapor de água – desde o início do século passado, estamos

Na chamada Modelagem do Sistema Terrestre, a componente de dimensões humanas e econômicas é tão crítica quanto a parte do funcionamento físico de nosso planeta

observando um aumento gradual de temperatura. O relacionamento do fluxo de radiação solar com a temperatura atmosférica é altamente não linear e passa por processos biogeofísicos ainda impossíveis de modelar.

A transferência radiativa atmosférica é modelada ainda de modo simplificado, pois não conhecemos suficientemente o papel das nuvens e das partículas de aerossóis nestes processos dinâmicos e não lineares. Uma nova disciplina nessa área está nascendo. É a chamada Modelagem do Sistema Terrestre (*Earth System Modeling*), que desenvolve modelos biogeofísicos globais de alta complexidade em que a componente de dimensões humanas e econômicas é tão crítica quanto a parte do funcionamento físico de nosso planeta.

### 3.11.2. Queimadas e poluição hídrica

O entendimento dessas questões científicas é crítico para o País, para que possamos eventualmente desenvolver estratégias que possam minimizar o custo socioeconômico das mudanças globais. Por exemplo, trabalhos recentes publicados nas revistas científicas *Science* e *Nature* indicam que a floresta Amazônica pode sofrer um colapso ao redor de 2050 por causa das mudanças globais, diminuindo, assim, em muito, sua biomassa e o estoque de carbono.

Alterações significativas no regime hidrológico poderão ocorrer em diversas regiões, e é crucial que possamos conhecer os processos e a melhor estratégia de mitigação o quanto antes. Entender o papel das emissões de queimadas da Amazônia no clima regional e global é também uma tarefa importante,

pois as partículas de aerossóis emitidas pelas queimadas alteram os mecanismos físicos de produção de nuvens e de precipitação. Os impactos no ecossistema local e regional são importantes nestes processos.

A questão de **poluição hídrica** também é relevante para o Brasil. E isso não só em bacias hidrográficas do Sul, mas também em regiões que, há poucas décadas, estavam praticamente intocadas. Outra questão socioeconômica importante para o Brasil diz respeito às medidas de qualidade da água e à modelagem do transporte e da deposição de metais pesados, nitratos e compostos orgânicos que contaminam muitos de nossos sistemas hídricos.

A qualidade e a quantidade da água disponível para uso doméstico e industrial em várias regiões urbanas já são preocupante, e há questões científicas de otimização de seu uso. Medidas com traçadores radioativos que requerem instrumentação avançada são um poderoso auxiliar no diagnóstico e estudo científico de questões ambientais, em particular na questão hídrica.

**A qualidade e a quantidade da água disponível para uso doméstico e industrial em várias regiões urbanas já são preocupantes, e existem questões científicas de otimização de seu uso**



### 3.11.3. Pós-graduação no Brasil

Há um vasto e importante campo de atuação para físicos num número grande de universidades pelo Brasil afora. Para um trabalho efetivo nessa área, uma abordagem interdisciplinar é essencial, o que não é muito fácil de ser realizada na estrutura de pesquisa em vigor no país. Entretanto, é fácil observar que os limites entre as disciplinas estão sendo quebrados em diversas universidades. Por exemplo, na Universidade Federal de Mato Grosso, já existe um curso de pós-graduação, aprovado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (Capes), de física do meio ambiente que está tendo sucesso. Grupos de físicos trabalhando em estreita cooperação com profissionais de outras disciplinas proliferaram no País, e hoje existe o entendimento de que a natureza não segue a mesma lógica disciplinar da estrutura universitária brasileira.

Física aplicada a questões ambientais no Brasil é uma área em franca expansão, sendo realizada em intensas parcerias com outras disciplinas, com frutos importantes para um melhor desenvolvimento científico e socioeconômico do País.

## 3.12. A PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA

Neste início de século, as discussões sobre ensino e aprendizagem vêm sendo alimentadas pelos resultados dos programas de avaliação internacional, a saber: PISA (Programa Internacional de Avaliação de Estudantes) e o Enem (Exame Nacional do Ensino Médio), que mostraram que o desempenho dos alunos, sem diferenciar entre escolas públicas e particulares, está muito abaixo do resultado esperado. Esses resultados levaram a uma busca pela melhoria do ensino de ciências, dando um novo impulso para as pesquisas sobre ensino e aprendizagem nessa área.

### 3.12.1. Pesquisas sobre ensino e aprendizagem

Entre todas as pesquisas realizadas para estudar o ensino e a aprendizagem em física, uma teve impacto surpreendente: foi a realizada pela pesquisadora Laurence Viennot, na década de 1970, com estudantes universitários franceses. Os resultados mostraram que um número significativo de alunos que estavam terminando o curso de física ainda atribuía à força aplicada a um corpo a mesma direção e o mesmo sentido de sua velocidade quando resolviam problemas conceituais que não envolviam tratamento matemático.

Essa pesquisa foi reaplicada nas melhores universidades, inclusive nas brasileiras. Pesquisas feitas em países que tinham excelente estrutura do ensino médio, como a França, Inglaterra, Suécia e os Estados Unidos, apresentaram resultados semelhantes ao de Viennot. A partir dessas constatações ficaram

definidos três novos problemas:

**Na França, na década de 1970, alunos terminando o curso de física ainda atribuía à força aplicada a um corpo a mesma direção e sentido de sua velocidade quando resolviam problemas conceituais**

i) isso somente acontece com o conceito de força ou temos outros conceitos resistentes ao ensino?

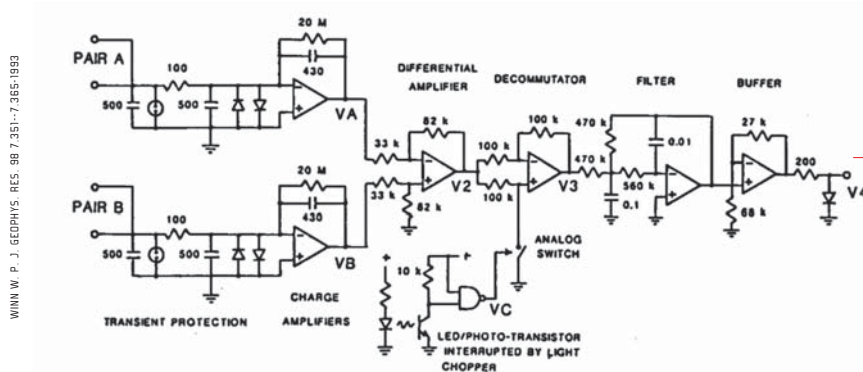
ii) por que isso acontece?

iii) é possível modificar o nosso ensino de modo a promover uma mudança conceitual em todos os nossos alunos?

Procurando responder à primeira questão, um grupo de pesquisadores se debruçou sobre o problema de conhecer os conceitos alternativos que os estudantes poderiam apresentar em vários dos conteúdos a serem ensina-



dos. A quase totalidade dessas pesquisas foi realizada no ensino médio. Assim, foram investigados os conceitos alternativos apresentados pelos estudantes sobre energia, circuitos elétricos, calor, visão, ondas etc. Essas pesquisas mostraram que os estudantes desenvolvem concepções alternativas para quase todos os conceitos tratados no ensino formal e que essas concepções são muito próximas ao pensamento pré-científico.



Além de varrer os conceitos físicos ensinados no ensino médio, as pesquisas foram planejadas para conhecer quais as concepções de ciências que os estudantes tinham antes de um ensino formal e depois deste. Os resultados mostraram que, assim como as concepções sobre os conteúdos específicos, essas concepções são limitadas e ingênuas, isto é, concebem a ciência como um conjunto de conteúdos imutáveis descobertos por pessoas excepcionais, sem perceber evolução conceitual nem estabelecer relações entre os diversos campos das ciências.

Os conhecimentos gerados pelas pesquisas sobre conceitos alternativos têm fornecido, aos elaboradores de currículos e aos professores, subsídios para o planejamento de seus cursos e também os têm sensibilizado para melhor interpretar as perguntas de seus alunos. Outra consequência desse conhecimento foi observada no processo da análise de livros-textos para a escola fundamental e média, uma vez que muitos desses conceitos alternativos são – ou foram – ‘transmitidos’ através deles.

Apesar dos inúmeros artigos e livros publicados sobre o assunto, é ainda um desafio fazer chegar a todos os professores de física tanto os resultados dessas investigações quanto o modo como os conceitos alternativos dos alunos afetam a compreensão dos conteúdos ensinados.

Paralelamente às pesquisas com os estudantes, foram feitas investiga-

Investigações feitas com professores do ensino médio mostraram que eles, em proporção semelhante à dos alunos universitários, apresentaram também conceitos alternativos próximos ao pensamento pré-científico

ções com os professores do ensino médio e, em proporção semelhante à dos alunos universitários, eles apresentaram também conceitos alternativos. Esses resultados influenciaram as propostas de cursos de educação continuada dos professores.

Procurando respostas para a segunda questão – ‘é possível modificar o ensino de modo a promover a mudança conceitual com todos os alunos?’ –, os pesquisadores buscaram referências teóricas em duas vertentes, não mais pensando numa simples mudança conceitual, mas numa verdadeira mudança de paradigma – do aristotélico para o newtoniano.

A primeira das vertentes busca na história e na filosofia das ciências – principalmente, nas idéias do historiador e filósofo da ciência norte-americano Thomas Kuhn (1922-1996) –, a explicação do porquê das dificuldades de compreensão conceitual observada. Para superação das dificuldades, propuseram também condições que deveriam ser obedecidas no processo de ensino-aprendizagem, utilizando estratégias que levavam os alunos a sentirem insatisfação com suas idéias prévias – ao tentarem explicar os fenômenos físicos apresentados numa demonstração – antes de ensinar a eles os conceitos. Essas técnicas foram de difícil aplicação no cotidiano da sala de aula, tornando os resultados dessas pesquisas pouco eficazes.

Outros grupos, entendendo o ensino como um fenômeno multidisciplinar – e aqui está a segunda vertente –, procuraram referências teóricas em outros campos do conhecimento, como na psicologia construtivista de David Ausubel, Robert Gagné e Jerome Bruner, na epistemologia genética do suíço Jean Piaget (1896-1980) ou na educação inclusiva do brasileiro Paulo Freire (1921-1997). Todos esses autores têm em comum a proposição de que o conhecimento novo é construído a partir do que o indivíduo já tem e da interação entre o sujeito e o novo conhecimento.

Outra proposição vinda desses autores – e importante para o planejamento do ensino – é que esse novo conhecimento deve ser significativo para o aluno. Aqui, também a história das ciências foi utilizada na procura dos problemas que originaram a construção dos conhecimentos científicos, tendo em vista tanto dar significação aos conteúdos a serem ensinados quanto mostrar, sempre que possível, qual foi o processo de construção do novo conhecimento. Na atualidade, o problema do porquê da dificuldade do aprendiza-

do das ciências está sendo pesquisado a partir da teoria de modelos mentais.

Os resultados dos estudos derivados de referenciais que utilizaram as duas vertentes acima referidas não deram os frutos esperados. Entretanto, o conhecimento produzido ao longo das últimas décadas a partir dessas investigações fez com que as pesquisas evoluíssem de uma proposta reducionista de verificação do que acontecia antes e depois do ensino para uma análise do processo do conhecimento construído pelos alunos, quer no ensino em sala de aula, quer na resolução de problemas, individualmente ou em grupo.

As análises dos dados que mostravam a realidade da sala de aula apontaram para uma série de outras variáveis que influenciam o processo de ensino e aprendizagem e que não tinham sido levadas em consideração nas pesquisas anteriores, quando somente o aspecto conceitual havia sido focado. Entre as variáveis mais importantes, podemos citar:

- 1) as de caráter social, como as formas de interação professor-aluno e as interações aluno-aluno;
- 2) as de caráter lingüístico, como o tipo de comunicação do professor em sala de aula e como são trabalhadas as diversas linguagens da física – conceitual, gráfica, matemática;
- 3) as relacionadas com o papel desenvolvido pelo professor em sala de aula, como a capacidade deste em criar ambientes de ensino nos quais os alunos tenham liberdade de praticar a argumentação científica, considerada como variável essencial para a aprendizagem significativa dos conceitos científicos.

Apesar de o caráter dessas investigações ser cada vez mais multidisciplinar, vários grupos de pesquisas continuam procurando compreender o processo de ensino e aprendizagem das ciências nos níveis fundamental e médio, sendo que ainda são poucos os grupos pesquisando o ensino superior.

Grupos de pesquisas continuam procurando compreender o processo de ensino e aprendizagem das ciências nos níveis fundamental e médio

### 3.12.2. Pesquisas em alfabetização científica

Vários fatores deram origem às pesquisas em alfabetização científica, sendo que o principal deles foi a conscientização das dificuldades do aprendizado

das diversas linguagens utilizadas pela física. Para compreender ciência, para ler e escrever ciência, é necessário combinar, de muitas maneiras, o discurso verbal, as expressões matemáticas e as representações gráficas. Essa combinação entre as diferentes linguagens traz dificuldades para os alunos introduzidos ao conhecimento científico.



Uma das críticas ao ensino tradicional – e que tem origem nessa linha de pesquisa – é justamente a grande ênfase dada à **matemática** como sendo a linguagem das ciências, sem considerar que as linguagens falada e escrita são os sistemas simbólicos mais freqüentemente utilizados para construir, descrever e apresentar os processos e argumentos científicos. As pesquisas em alfabetização científica vão justamente na direção de estabelecer as conexões entre essas linguagens, que deveriam ser explicitadas em todos os níveis de ensino.

As pesquisas em alfabetização científica mostram que no ensino, as conexões entre as diversas linguagens utilizadas nas ciências aparecem em duas situações diferentes: uma decorrente do próprio processo das ciências; a outra relacionada às habilidades que os alunos precisam ter para aprender ciência. Nas atividades relacionadas com o processo científico, as diversas linguagens necessárias são:

- 1) reconhecer as questões científicas a serem investigadas;
- 2) identificar as evidências necessárias para a investigação científica;
- 3) propor e avaliar as conclusões;
- 4) demonstrar sua compreensão dos conceitos científicos;
- 5) saber comunicar com validade o processo e o produto dos conhecimentos.

Em relação às habilidades necessárias aos alunos – para as quais as diversas linguagens são fundamentais num curso de física –, as áreas da pesquisa relacionam estudos sobre:

- 1) habilidade para resolver problemas;
- 2) a habilidade de estudo independente (aprendizagem auto-reguladora);
- 3) a habilidade de trabalho em grupo.

**Adaptar as idéias e os resultados das pesquisas em alfabetização científica está sendo o maior desafio para os professores envolvidos na implementação das propostas curriculares nas escolas fundamental e média**

Os Parâmetros Curriculares Nacionais (MEC/Semtec, 1998) propõem objetivos de ensino a serem alcançados pelos alunos a partir de um referencial baseado nos resultados das pesquisas realizadas em alfabeti-

zação científica. Entretanto, adaptar as idéias e os resultados obtidos nas pesquisas está sendo o maior desafio para os professores envolvidos na implementação das propostas curriculares nas escolas fundamental e média.

### 3.12.3. Tecnologia e ensino de física

Inicialmente, as pesquisas na área de tecnologia e ensino de física iniciaram-se procurando introduzir tecnologias para melhorar as estratégias utilizadas nas aulas de ciências: textos didáticos, conferências e representações gráficas, a partir do modelo de transmissão-recepção do ensino e da aprendizagem. Esses esforços foram desapontadores.

Como o computador ganhou poder, as ferramentas tecnológicas foram refinadas. Por exemplo, pesquisadores preocupados com a inserção de uma nova tecnologia em sala de aula planejam discussões *on-line* para engajar a totalidade dos alunos no discurso científico – e não só uma limitada participação de 20% nas classes tradicionais. Baseando-se no fato de que os alunos costumam, em seus trabalhos feitos com

O uso de ferramentas de hipermídia que combinam visualização, imagem, discussão, textos, vídeos, roteiros para reflexão etc. contribuíram também para a melhoria da aprendizagem dos alunos

base em pesquisas na internet, somente acrescentar as informações coletadas umas às outras, várias pesquisas foram feitas testando outras ferramentas educacionais, como a criação de mapas de argumentação, registro escrito da reflexão e dispositivos de gravação do trabalho dos alunos. O processo de reflexão dos alunos sobre o conteúdo pesquisado foi sensivelmente maior. A utilização de outras ferramentas de hipermídia que combinam visualização, imagem, discussão, textos, vídeos, roteiros para reflexão e outras atividades contribuíram também para a melhoria da aprendizagem dos alunos.

Enfoques relativos à aprendizagem dos alunos e que utilizam visualização e modelagem para melhorar as atividades nos laboratórios de ensino e a resolução de problemas têm sido as novas propostas da pesquisa na área de tecnologia e ensino de física.

Outras tecnologias de uso da imagem, como o vídeo, apresentam interesse como estratégias para o ensino, pelas múltiplas formas de utilização em sala de aula. A apresentação de demonstrações em vídeo não substituiu o

laboratório, mas contribui para o desenvolvimento conceitual de forma significativa. O material de apoio de boa qualidade nesse tipo de mídia é muito escasso no Brasil e poderia ser desenvolvido, com a participação dos professores, a baixo custo – em 2003, o Ministério da Educação apresentou

O material de apoio de boa qualidade, como o vídeo, é muito escasso no Brasil e poderia ser desenvolvido, com a participação dos professores, a baixo custo

um edital pra financiar projetos desse tipo com recursos muito limitados; espera-se que a avaliação dos resultados leve à implementação em maior escala desse tipo de programa.

As novas tecnologias têm tido impacto positivo na pesquisa em ensino de física e têm modificado as metas dos cursos bem como levantado a problemática do acesso eficiente a essas tecnologias. Muitas comissões nacionais – e também internacionais – em ensino de ciências têm chamado a atenção sobre os novos objetivos e o crescimento do papel da tecnologia nas ciências e no seu ensino. Preparar estudantes para a sociedade de hoje significa não somente engajá-los no complexo projeto que liga tecnologias avançadas com importantes tópicos das ciências, mas, principalmente, dar condições para que desenvolvam habilidade de usar ferramentas tecnológicas e aprender a partir da aplicação dessas tecnologias.

É interessante ainda frisar que as pesquisas desenvolvidas na área de tecnologia e ensino de física precisam ser mais bem operacionalizadas no desenvolvimento de estratégias que as implementem efetivamente na sala de aula. Esse é um outro desafio a ser superado.

#### 3.12.4. A pesquisa em formação de professores

Uma consequência natural das pesquisas em ensino e aprendizagem, bem como alfabetização científica e tecnologia em ensino de física, são as

Preparar estudantes para a sociedade de hoje significa, principalmente, dar condições para que desenvolvam habilidade de usar ferramentas tecnológicas e aprender a partir da aplicação dessas tecnologias

pesquisas em formação de professores, tanto a inicial quanto a continuada. A partir dos resultados de estudos que mostraram que o ensino discursivo – em que o professor fala, o aluno escuta e registra literalmente – serve apenas para os alunos já preparados

para aprender física, foi levantada uma questão importante: como preparar professores para um ensino fundamental que não é dirigido a um grupo de elite e sim ao estudante típico?

As pesquisas também mostram que, para alcançar os objetivos propostos pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), é necessária uma diversificação das estratégias de ensino e, principalmente, a criação de ambientes de aprendizagem que propiciem a argumentação dos alunos em aulas, pois essas interações professor-aluno e aluno-aluno são as condições básicas para o aprendizado das diversas linguagens científicas, ou seja, oral, gráfica, simbólica, matemática, visual e computacional.

As pesquisas em formação de professores mostraram vários fatores que oferecem maior resistência às mudanças no ensino de ciências escolar. Um deles é a força das concepções epistemológicas dos professores sobre a natureza da ciência que ensinam. Outros – não menos importantes – são suas concepções sobre o ensino e a forma como os alunos aprendem, bem como a influência dessas representações nas decisões sobre as práticas docentes.

Outro problema focado nessas pesquisas diz respeito à dificuldade do professor em realizar as mudanças em ‘sua didática’. O ensino exigido pelas novas diretrizes curriculares – visando a um ensino para a formação de cidadãos cientificamente letrados – exige novas práticas docentes e discentes que não são usuais em nossa cultura escolar. Introduce um novo ambiente de ensino e de aprendizagem que apresenta para o professor dificuldades novas e insuspeitadas. Este precisa sentir e tomar consciência do novo contexto e do novo papel que deverá exercer na sala de aula. Essas transformações não são tranquilas e nem fáceis de serem desenvolvidas nos cursos de formação – iniciais e/ou continuada – hoje oferecidos.

As pesquisas têm mostrado que as mudanças de conceito, de atitude e de metodologia por parte dos professores só acontecem quando eles tomam consciência de seu papel transformador de uma sociedade e quando as condições estruturais do ambiente de ensino-aprendizagem lhes são garantidas com continuidade. Esse, quem sabe, é o maior desafio.



Um dos fatores que oferecem maior resistência às mudanças no ensino de ciências escolar é a força das concepções epistemológicas dos professores sobre a natureza da ciência que ensinam



## 4. DESAFIOS ESTRUTURAIS

### 4.1. INFRA-ESTRUTURA E PESQUISA

Assim como as demais ciências básicas, a física no Brasil teve um vigoroso desenvolvimento nas últimas cinco décadas. Isso foi consequência da criação e da expansão de um sistema nacional de pós-graduação, aliado aos programas especiais de fomento à pesquisa. O crescimento do número de cientistas foi acompanhado por um avanço nos índices qualitativos da

Há, no Brasil, hoje, condições objetivas para um salto qualitativo no cenário científico, e a física tem papel fundamental na materialização desse salto

produtividade científica. Há, no Brasil, hoje, condições objetivas para um salto qualitativo no cenário científico. Esse salto, ancorado na

formulação de uma agenda para a ciência do País, tem como vertentes a inserção econômica e social mais efetiva das atividades científicas na sociedade brasileira, bem como a promoção de várias áreas da ciência a um papel de liderança mundial. A física tem papel fundamental na materialização desse salto.

A concretização de um salto qualitativo está apoiada no tripé: formação contínua de quadros científicos de excelente qualidade, o apoio consistente aos grupos de cientistas competitivos internacionalmente e a expansão das infra-estruturas de apoio e conexão. Para manter a expansão e a consolidação do sistema brasileiro de pesquisas, é também essencial fomentar os grupos emergentes.

Quando se examina o desenvolvimento científico brasileiro nesse último meio século, cabe destacar o papel seminal desempenhado, na fase ini-

Nos últimos 15 anos, os recursos destinados pelo Governo Federal para as diferentes ações em ciência e tecnologia deixaram de acompanhar o consistente crescimento da comunidade científica brasileira

cial desse esforço, pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), que possibilitou a implantação de infra-estrutura de pesquisa em várias institui-

ções em todo o País. Entretanto, nos últimos 15 anos, os recursos destinados pelo Governo Federal para as diferentes ações em ciência e tecnologia deixaram de acompanhar o consistente crescimento da comunidade científica brasileira. Nunca é demais reiterar que o apoio do Estado é essencial para que as atividades científicas sejam bem sucedidas. Essas dificuldades geram um gargalo ao próprio desenvolvimento nacional, com reflexos negativos sobre a competitividade econômica do País e a qualidade de vida de nosso povo.

Hoje, para propiciar uma mudança na qualidade da produção científica, é indispensável e urgente que o sistema estatal de apoio à ciência seja revisto, atualizado e fortalecido. A ciência deve se desenvolver com planejamento baseado na agenda brasileira, estabelecendo prioridades com foco em sua inserção na vida econômica e social do País. É fundamental a coerência do apoio, sustentado e sem discontinuidades. Por outro lado, é também essencial que o planejamento científico não seja interpretado como dirigismo. Todas as experiências históricas em que esses dois termos foram confundidos terminaram em fracassos.

O desenvolvimento da ciência sempre foi um trajeto cheio de surpresas. As grandes inovações não são previsíveis e, por isso, extrapolam do planejado. Assim, é fundamental que uma parcela do orçamento de ciência e tecnologia seja sempre assegurada para que – mediante competição por méritos intrínsecos a cada proposta – nossos melhores cientistas tenham espaço, recursos e condições para desenvolver sua criação segundo suas próprias iniciativas, com liberdade e com cronogramas ditados pelos objetivos científicos. No sistema atual de financiamento da pesquisa brasileira, isso somente é possível se parte substancial dos recursos forem destinados aos Editais Universais do CNPq.

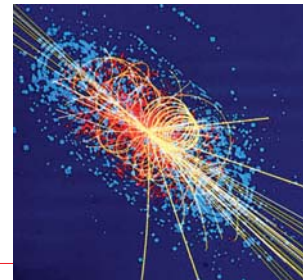
A ciência deve se desenvolver com planejamento baseado na agenda brasileira, estabelecendo prioridades com foco em sua inserção na vida econômica e social do País

Os recursos destinados aos Editais Universais do CNPq têm de ser aumentados para apoiar toda a pesquisa de excelente qualidade espontaneamente proposta por nossos pesquisadores

#### 4.1.1. Compartilhamento da infra-estrutura

A pesquisa experimental, na fronteira do conhecimento, freqüentemente depende do uso de equipamentos inovadores que não estão disponíveis

comercialmente. Ela induz o desenvolvimento de instrumentação avançada, necessária para explorar novos fenômenos físicos. Essa instrumentação encontra, depois, usos que não haviam sido previstos por seus inventores. É o caso de grande parte dos equipamentos de diagnóstico médico por imagem, originalmente inventados para medir características de partículas atômicas e subatômicas e de sistemas de matéria condensada. É o caso também dos microscópios de varredura por sonda (SPM), que têm hoje amplas aplicações industriais.



Em algumas áreas, a natureza da investigação requer o uso de equipamentos e instalações de grande porte que, geralmente, estão além da capacidade intelectual e financeira dos países, mesmo dos desenvolvidos. Conseqüentemente, são desenvolvidos, construídos e operados por consórcios de instituições que ultrapassam as fronteiras nacionais. Os exemplos mais conhecidos são os aceleradores e detectores de partículas e os grandes observatórios astronômicos. Entretanto, em quase todas as áreas da física, parte significativa da pesquisa de fronteira passa a exigir cada vez mais a utilização de infraestrutura cujo custo e complexidade extrapolam a escala típica dos laboratórios individuais ou de pequenos grupos. Empreendimentos desse porte requerem, de forma especialmente crítica, planejamento e apoio sustentado.

Assim, a criação de mecanismos que possibilitem a instalação e a manutenção de infra-estrutura de pesquisa para uso compartilhado é, hoje, componente fundamental da política científica e tecnológica de países que são – ou ambicionam ser – competitivos no cenário internacional. O termo

**O Brasil precisa formular e com urgência políticas coerentes, consistentes e estáveis em relação à pesquisa que usa compartilhamento de infra-estrutura**

compartilhamento usado acima se refere não apenas aos recursos físicos, mas também aos recursos intelectuais. Essas estruturas formam um elemento-chave na migração de experiências entre as diferentes áreas da ciência, assim como na conexão dos avanços científicos com as aplicações deles decorrentes. O Brasil precisa formular – e com urgência – políticas coerentes, consistentes e estáveis nesse campo.

As estruturas de apoio aqui mencionadas são diversificadas em sua dimensão e alcance. Vão das grandes estruturas, como os Laboratórios Nacionais (LN), que cobrem áreas inteiras da ciência e com frequência de atuação

multidisciplinar, aos laboratórios instalados numa instituição, cujo uso é compartilhado por uma rede de pesquisadores. Os Laboratórios Nacionais reúnem, em um mesmo local, uma infra-estrutura de pesquisa, com equipamentos de alto custo e equipes técnicas de suporte acessível a pesquisadores acreditados e que pertençam tanto a universidades e centros de pesquisas quanto a empresas. Ou seja: um LN é uma casa de ferramentas de alto desempenho disponível para pesquisadores externos.

Um LN é supervisionado por um comitê de cientistas, encarregado de assegurar sua ação científica consistente e sua abertura a usuários externos com base no mérito de suas propostas científicas. No Brasil, o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas (SP), e o Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), em Itajubá (MG), são exemplos bem sucedidos de LN. O País necessita de outros LNs cobrindo áreas como nanofabricação e análise de materiais, síntese sob alto vácuo, física de plasmas, partículas, raios cósmicos e física nuclear, meio ambiente, só para citar alguns exemplos. Evidentemente, áreas como as mencionadas podem compartilhar, por sua vez, recursos e instalações e pessoal.

Outro papel importante dos LNs é o apoio às atividades de cientistas brasileiros em experimentos científicos que operam em cooperação internacional. É o caso da física experimental de altas energias e da astrofísica, nas quais os grandes equipamentos são concebidos, construídos e operados por consórcios de grupos espalhados pelo mundo. Os grandes aceleradores de partículas e os grandes observatórios são construídos por consórcios de países, enquanto os detectores são frutos de consórcios de instituições. Hoje, para realizar um experimento nessa escala, nenhum país – nem os mais avançados – tem os recursos técnicos e a *expertise* para desenvolvê-lo sozinho. A cooperação, o compartilhamento de *know-how* e a tecnologia são essenciais para o sucesso do experimento.

A participação de grupos brasileiros nesses experimentos tem permitido o acesso a tecnologias normalmente não acessíveis e mobilizado a indús-

O País necessita de Laboratórios Nacionais cobrindo, por exemplo, áreas como nanofabricação e análise de materiais, síntese sob alto vácuo, física de plasmas, partículas, raios cósmicos e física nuclear e meio ambiente

A participação de grupos brasileiros em colaborações internacionais tem permitido o acesso a tecnologias normalmente não acessíveis e mobilizado a indústria nacional a produzir componentes com especificações rigorosas

tria nacional a produzir componentes com especificações rigorosas. Destacam-se, por exemplo, as participações de pesquisadores brasileiros em experimentos nos aceleradores Fermilab e RHIC (Colisor de Íons Relativísticos Pesados), ambos nos Estados Unidos, e no CERN (Organização Européia para a Pesquisa Nuclear), na área de altas energias, e em observatórios astronômicos, como o SOAR (sigla inglesa para Observatório Meridional para a Pesquisa Astrofísica) e o Gemini, ambos no Chile, sendo que este último também abriga um telescópio no Havaí. Na área de altas energias, destaca-se também a participação brasileira no Projeto Auger, que visa a estudar os raios cósmicos de enorme energia.



Apesar de ainda estarem limitadas às áreas mencionadas, não é difícil antever que esse mecanismo de cooperação será parte do elenco de atividades de outras áreas da física em futuro não distante. Essas colaborações internacionais são estratégicas para o País. Além de promover o desenvolvimento da física, elas têm também grande po-

tencial para transferência de tecnologias sensíveis e para induzir o desenvolvimento de instrumentação avançada, com aplicações que ultrapassam o plano da física das partículas. Por outro lado, abre a possibilidade da competição das indústrias brasileiras, participando do desenvolvimento dessas tecnologias e fornecendo componentes para os experimentos. Exemplos desse tipo de resultado já são colhidos no caso dos exemplos de colaborações citados. Nas colaborações internacionais, é importante assegurar que as equipes do País sejam bem estruturadas, com competência para competir e colaborar com seus parceiros e que os interesses nacionais sejam sempre resguardados.

**Colaborações internacionais são estratégicas para o País: promovem o desenvolvimento da física e têm grande potencial para transferir tecnologias sensíveis e induzir o desenvolvimento de instrumentação avançada**

A experiência de países que tiveram êxito em atingir um elevado patamar de desenvolvimento científico e tecnológico mostra que isso exige um leque variado de modalidades de financiamento e de arranjos institucionais para a manter o vigor das atividades de pesquisa. Entre essas medidas, destacam-se:

- i) o apoio com recursos e prazos diferenciados tanto ao pesquisador quanto a grupos de pesquisa emergentes ou consolidados;
- ii) o adequado balanço entre o incentivo à pesquisa espontânea e àquela direcionada;

- iii) atenção especial aos possíveis transbordamentos dos avanços científicos que resultem na melhora do grau de competitividade de empresas nacionais – sendo esta uma faceta ainda pouco desenvolvida no Brasil;
- iv) o apoio e o incentivo às atividades de pesquisa e desenvolvimento da indústria nacional que busquem expandir a inovação tecnológica.

Outras formas de compartilhamento de infra-estrutura de pesquisa são a congregação de grupos de pesquisadores em institutos virtuais, como os dos Institutos do Milênio, e a organização de laboratórios associados. Recomenda-se que programas como o Pronex (Programa de Apoio a Núcleos de Excelência) e os Institutos do Milênio sejam aprimorados e continuados. É importante que os projetos bem sucedidos nesses tipos de programas não sejam interrompidos e que continuem sendo financiados enquanto suas propostas se mantenham relevantes e seus resultados sejam convincentes.

#### 4.1.2. Pesquisa induzida, básica e iniciativas individuais

A esperada mudança qualitativa no apoio às atividades de pesquisa e desenvolvimento em áreas temáticas decorrente da injeção de recursos adicionais pelos Fundos Setoriais só poderá ocorrer se, de fato, esses fundos apoiarem pesquisa inovadora e de amplo espectro que abranja toda a cadeia de conhecimento associada a cada tema. Como bem demonstra a experiência de diversos países do Primeiro Mundo, o apoio à pesquisa induzida deve vir acompanhado de um forte investimento em pesquisa básica. Em particular, o apoio a pequenos grupos e pesquisadores individuais é essencial para o florescimento de novas idéias.

A excelência na preparação de novos pesquisadores, bem como o ambiente de estímulo intelectual, de cooperação e competição entre eles, são ingredientes essenciais no aparato científico de um país. Mesmo

nas grandes colaborações internacionais, com centenas de pesquisadores trabalhando em cooperação, cada produto é, essencialmente, criação de poucos cientistas. Descobertas e invenções como a ressonância magnética, o laser, o transistor, ou a supercondutividade, surgiram de pesquisas realiza-

Como bem demonstra a experiência de diversos países do Primeiro Mundo, o apoio à pesquisa induzida deve vir acompanhado de um forte investimento em pesquisa básica

das por pequenos grupos de cientistas, trabalhando com poucos estudantes. Essa é a norma, também, em toda a física teórica, bem como em áreas que tiveram um impacto considerável na tecnologia moderna, como a física da matéria condensada, a biofísica, a física atômica e a óptica.

Desde sua fundação em 1951, o CNPq tem desempenhado um papel fundamental no apoio ao pesquisador individual. Seu financiamento da demanda espontânea possibilitou o desenvolvimento e a diversificação da pesquisa em todo o País. No entanto, a partir da década de 1990, essa agência foi especialmente penalizada em seus orçamentos anuais e, em particular, nos últimos anos, os recursos destinados especificamente para o apoio à demanda espontânea passaram a ser inexistentes ou foram extremamente reduzidos.

Nos últimos anos, os recursos do CNPq destinados especificamente para o apoio à demanda espontânea passaram a ser inexistentes ou foram extremamente reduzidos

Apesar do expressivo e consistente crescimento da comunidade científica e tecnológica brasileira nas últimas décadas, o FNDCT, instrumento essencial para a implantação da atividade de pesquisa como um esforço de dimensão

nacional, entrou, na década de 1990, em fase agônica, com orçamentos anuais decrescentes. Com isso, desapareceram do cenário de financiamento as possibilidades de apoio institucional, o que foi apenas parcialmente compensado pela criação do programa Pronex, em 1996. Entendido na época como um novo programa que receberia recursos adicionais aos já existentes para o apoio à pesquisa básica – uma vez que não contemplava nem a demanda espontânea, nem o financiamento de pesquisadores individuais –, o Pronex acabou sendo a única fonte disponível de recursos em nível nacional. Numa necessária reestruturação do panorama de financiamento às atividades de ciência e tecnologia, esse programa, que fora concebido dentro de formas inovadoras de avaliação e acompanhamento de projetos, deveria ser reforçado e ter seu fluxo orçamentário regularizado. Em vez disso, a recente decisão de vincular o Pronex às agências estaduais de apoio à pesquisa (FAPs) aponta na direção contrária, pois impossibilita colabora-

Vincular o Pronex às FAPs impossibilita colaborações científicas importantes por não permiti-las entre pesquisadores de estados diferentes em um mesmo projeto

ções científicas importantes por não permiti-las entre pesquisadores de estados diferentes em um mesmo projeto.

Por sua vez, o programa dos Institutos do Milênio não pode ser pensado



como uma possível substituição do Pronex ou do essencial apoio do CNPq à demanda espontânea. Esses institutos – organizados em torno de temas específicos – contemplam apenas uma fração dos esforços científicos em nosso país e – seja pelos temas abordados, seja pelo volume de recursos envolvidos – não podem cumprir o papel de substituir os programas anteriores.

A implantação de redes de pesquisa no Brasil é certamente um ingrediente importante entre as possíveis formas de apoio ao nosso desenvolvimento científico e tecnológico. No entanto, iniciativas desse tipo devem ser entendidas como de natureza complementar, necessitando, para seu sucesso, de um apoio contínuo à demanda espontânea e aos grupos que participam da rede. Deve ser notado que, em outros países, redes de pesquisa – como aquelas associadas aos Institutos do Milênio e outras iniciativas governamentais – fortalecem a comunicação entre laboratórios, que recebem individualmente de outras fontes os recursos necessários para suas atividades. Aqui, no entanto, os recursos dessas redes têm sido, em muitos casos, o único apoio recebido pelos grupos que delas fazem parte. Com isso, a organização em rede não é capaz de gerar os resultados desejados, pois a comunicação entre seus componentes não compensa a ausência de infra-estrutura necessária para que os grupos diversifiquem e aprofundem suas pesquisas. A implantação de redes de pesquisa no Brasil é certamente um ingrediente importante do apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico.

**Redes de pesquisa devem ser entendidas como complementares, necessitando, para seu sucesso, de um apoio contínuo à demanda espontânea e aos grupos que delas participam**

Observações semelhantes valem para os programas estratégicos que venham a ser amparados pelos Fundos Setoriais, cujo êxito dependerá crucialmente da manutenção de um amplo apoio às demais formas de financiamento. Em particular, é importante que haja recursos substanciais destinados ao apoio à pesquisa mediante o critério único da excelência, sem subordinação a qualquer outra política ou priorização temática.

### 4.1.3. Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa

No âmbito estadual, as Fundações de Amparo à Pesquisa (FAPs) vêm desempenhando um papel cada vez mais importante. No Estado de São

Paulo, a Fapesp tem uma história de financiamento vigoroso e estável à pesquisa, tanto no nível individual – ou seja, apoio à demanda espontânea de pesquisadores e bolsistas de mestrado, doutorado e aperfeiçoamento – quanto em relação a projetos de maior porte. Entre esses, podem ser destacados:

- i) as linhas de financiamento aos Projetos Temáticos, envolvendo grupos de pesquisa dedicados ao avanço do conhecimento em técnicas e/ou questões específicas;
- ii) o Programa de Inovação Tecnológica em Parceria (PITE) com empresas;
- iii) a participação no financiamento de Projetos Especiais, como o SOAR, que a Fapesp apóia em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia e organizações internacionais;
- iv) o Projeto Pierre Auger.

Os valores das bolsas pagos pela Fapesp continuam bastante superiores àqueles pagos pelo CNPq e pela Capes

A Fapesp também mantém um programa excelente de apoio ao pesquisador, com a chamada Reserva Técnica, que disponibiliza recursos para utilização rápida e desburocratizada para seus bolsistas e pesquisadores para itens de consumo, infra-estrutura, pequenos reparos e auxílio na vinda de pesquisadores visitantes.

Ao mesmo tempo, os valores das bolsas pagos pela Fapesp continuam bastante superiores àqueles pagos pelo CNPq e pela Capes, especialmente após o aumento substancial dado pela Fapesp às bolsas de pós-doutorado, conforme mostra tabela, referente ao mês de junho se 2004.

Estimulados pelo sucesso da atuação da Fapesp, as comunidades acadêmicas e tecnológicas de outros estados brasileiros lutaram para que, nas constituições estaduais elaboradas em 1988 e 1989, fossem criadas agências locais de fomento (FAPs) inspiradas no modelo paulista. Apesar do sucesso dessa iniciativa em vários estados, as histórias dessas agências mais novas têm sido marcadas por uma recorrente instabilidade administrativa e de recursos, agravada pela irregularidade nos aportes financeiros que os respectivos estados a elas destinam. Apesar disso, esse conjunto de FAPs tem tido uma evolução positiva, e sua consoli-

Valores de bolsas mestrado e doutorado		
	FAPESP	CNPq CAPES
Mestrado	907,00 (I)	855,00
	1030,00 (II)	
Doutorado	1430,00 (I)	1267,00
	1770,00 (II)	
Pós-Doutorado	4203,00	2219,00

dação é vista como essencial para o desenvolvimento do País em C&T.

As desigualdades hoje observadas no cenário de C&T entre as regiões e

estados brasileiros são, em parte, consequência das disparidades históricas de investimentos localmente feitos com recursos estaduais. O Estado de São Paulo, que há 40 anos mantém a Fapesp, aplica – com estabilidade e continuidade – mais de 10% de sua receita tributária em ensino superior e pesquisa, mantendo três grandes universidades, ativas em pesquisa – Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Universidade do Estadual Paulista (Unesp), bem como a Fapesp, além de 20 institutos de pesquisa estaduais, como o Instituto Agrônomo de Campinas, criado ainda no segundo império, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e o Instituto Butantã.

Essa situação contrasta com a da maioria dos estados brasileiros, que descumpra seus próprios dispositivos constitucionais de repasse obrigatório de verbas às suas respectivas FAPs. Esse descumprimento da lei precisa ser sanado. Deve ser notado, no entanto, que, dada a má distribuição geográfica da riqueza nacional, muitos estados estão pouco capacitados para promover significativamente seu próprio desenvolvimento científico, cabendo ao Governo Federal o dever de atuar no sentido de evitar a excessiva concentração da nossa ciência nos estados mais ricos. Uma das formas mais eficientes de conseguir a descentralização de nossa economia é a disseminação da C&T em todo o País.

O conjunto de novas FAPs tem tido uma evolução positiva, e sua consolidação é vista como essencial para o desenvolvimento do País em C&T

Muitos estados não estão capacitados para promover significativamente seu próprio desenvolvimento científico, cabendo ao Governo Federal o dever de atuar no sentido de evitar a excessiva concentração de nossa ciência nos estados mais ricos

## 4.2. PESQUISA FORA DA ACADEMIA

A pesquisa tecnológica, como ocorre em nível mundial, é feita principalmente nas empresas, enquanto as instituições acadêmicas se ocupam prioritariamente do avanço do conhecimento científico e da formação de pesquisadores e profissionais qualificados. No Brasil, onde as empresas têm pouca tradição na pesquisa e na inovação, a pesquisa se concentra

muito singularmente nas universidades e nos institutos estatais de pesquisa. Isso tem duas graves conseqüências:

- i) há muito pouca pesquisa tecnológica;
- ii) os gastos globais do País com pesquisa e desenvolvimento são muito baixos.

**No Brasil, há pouca pesquisa tecnológica, e os gastos do País com pesquisa e desenvolvimento são muito baixos**

Nos países que tiveram sucesso na inserção da ciência e da pesquisa na sociedade, as empresas são responsáveis por parte significativa do investimento em pesquisa e

desenvolvimento. Assim, embora a percentagem em relação ao PIB do investimento em pesquisa e desenvolvimento do Japão, da Coréia do Sul, dos Estados Unidos e da Alemanha ultrapasse os 2%, o investimento proveniente de fontes governamentais para o mesmo fim é inferior a 1% do PIB.

No Brasil, o investimento governamental em pesquisa e desenvolvimento foi em 1999 igual a 0,55% do PIB relativo à economia formal. Esse valor é comparável ao percentual de países desenvolvidos – é praticamente igual ao do Japão; na Coréia do Sul, o investimento é de cerca de 0,7%, enquanto o governo dos Estados Unidos investe cerca de 0,8% do PIB em pesquisa e desenvolvimento. Porém, uma vez que a economia informal no Brasil é muito forte, os gastos governamentais em pesquisa e desenvolvimento representam um percentual muito menor do PIB total do País. O que, entretanto, é ainda mais grave, é que o investimento correspondente por parte de empresas foi de apenas 0,33% do PIB – na Coréia do Sul e nos Estados Unidos, o gasto das empresas em P&D corresponde a 1,8% e 2,2% do PIB, respectivamente. Esses dados indicam que um aumento substancial do apoio à atividade de pesquisa e desenvolvimento em nosso país pressupõe uma

**No Brasil, o investimento das empresas em P&D foi de apenas 0,33% do PIB; na Coréia do Sul e nos Estados Unidos, esse gasto corresponde, respectivamente, a 1,8% e 2,2% do PIB**

mudança de seu perfil industrial. No momento, o Governo Federal esboça o programa Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior, que poderá ter importantes efeitos de indução da pesquisa em nossas empresas. É importante também que essa

política passe a, de forma crescente, incorporar metas quantitativas específicas para setores determinados, estabelecendo, a partir do diagnóstico da situação atual e de sua comparação com a situação desejada, objetivos de crescimento bem definidos. É muito importante que o Estado atue de for-

ma mais sistemática e vigorosa no setor, aumentando seus investimentos.

A questão da promoção da pesquisa nas empresas requer considerações adicionais. Inicialmente, é necessário questionar a visão – frequentemente formulada sem qualquer base científica – de que haja questões culturais profundamente arraigadas que tornem nossa sociedade menos apta à inovação tecnológica. Há razões para se crer que o maior empecilho ao nosso desenvolvimento tecnológico seja a extrema facilidade com que aqui se permite a importação de tecnologia. Se, de fato, somos uma espécie de porto livre para a tecnologia estrangeira, exemplos emblemáticos demonstram que, naqueles casos em que o País não encontrou lá fora tecnologia disponível para importação, ela foi desenvolvida internamente com eficiência e agilidade.

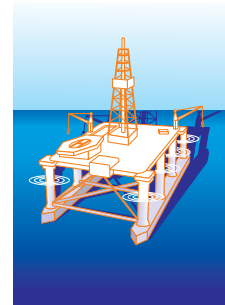
O exemplo mais notável é o da tecnologia agrícola. Até bem recentemente, o Brasil insistia em utilizar, sem sucesso, tecnologia agrícola desenvolvida para climas temperados e para solos mais básicos (alcalinos), bem distintos dos nossos. Recentemente, decidiu desenvolver tecnologias apropriadas para seu solo e seu clima, e os resultados têm sido extremamente positivos. Por exemplo, a produtividade da nossa lavoura de grãos (soja, milho e feijão), medida em toneladas por hectare, aumentou em 94% entre 1990 e 2001, e a taxa de expansão é crescente.

Hoje, temos a maior produtividade mundial em soja e estamos próximos de atingir o mesmo no caso do milho. Para isso, foi importante a criação, em 1973, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), uma empresa estatal dedicada a desenvolver tecnologia e a transferi-la ao setor produtivo em uma interação inteligente e efetiva.

O desenvolvimento de tecnologia de aviões comerciais, pela Empresa Brasileira de Aeronáutica, inicialmente estatal, é outro exemplo importante de sucesso brasileiro na área tecnológica. Fato semelhante ocorreu na

exploração de petróleo sob águas profundas, na qual a Petrobrás é hoje uma empresa líder em âmbito mundial. Um terceiro exemplo se encontra no setor de serviços. Para

Exemplos emblemáticos demonstram que, nos casos em que o País não encontrou lá fora tecnologia disponível para importação, ela foi desenvolvida internamente com eficiência e agilidade



O Brasil desenvolveu tecnologias apropriadas para seu solo e seu clima, e os resultados têm sido extremamente positivos: a produtividade da nossa lavoura de grãos aumentou em 94% entre 1990 e 2001

conviver com uma inflação crônica e elevada, nosso setor bancário teve de se informatizar a um nível não conhecido em outros países, e hoje temos a mais avançada tecnologia de informatização bancária em todo o mundo. Essa tecnologia foi absorvida pelo sistema governamental de recolhimento de impostos, e também nesse campo estamos à frente de outros países.

Um quarto exemplo de tecnologia desenvolvida com sucesso no Brasil é atualmente matéria de grande divulgação na mídia devido às suas implicações políticas: o do enriquecimento do urânio. Mais uma vez, o País viu-se forçado a desenvolver uma tecnologia não disponível para importação. O resultado, apesar de não inteiramente transparente por razões estratégicas, parece ter

sido extraordinariamente positivo: os indícios sugerem fortemente que o Brasil desenvolveu uma tecnologia para separação isotópica do urânio por centrifugação que supera as até hoje conhecidas nos países desenvolvidos.



#### 4.2.1. Oportunidades perdidas

O Brasil também apresenta uma outra história, a de oportunidades perdidas no campo da tecnologia. De todas, a mais conhecida – e também a mais lamentável – é a do uso do álcool como combustível para automóveis. O Pró-álcool, formulado e implementado na década de 1970, levou a um progresso muito rápido na tecnologia envolvida no programa, que vai desde o grande aumento na produtividade da cana-de-açúcar e em

seu teor de sacarose até a produção industrial do álcool e sua utilização como combustível.

Entretanto, o Pró-álcool foi quase totalmente paralisado na década de 1990, quando o preço do petróleo teve

uma fase de baixa. É verdade que o programa necessitava de subsídios – principalmente, devido ao baixo preço do petróleo –, mas, com certeza, a questão não foi vista em sua plenitude. O preço do petróleo também é altamente subsidiado pelos norte-americanos em suas ações militares para garantir o suprimento de petróleo oriundo do Oriente Médio. Assim, é inevitável que, num horizonte de tempo não longo, o preço do petróleo

O Brasil também apresenta uma história de oportunidades perdidas no campo da tecnologia; de todas, a mais conhecida e lamentável é a do uso do álcool como combustível para automóveis

supere o do álcool produzido da cana-de-açúcar, o que ainda é mais claro se considerarmos o avanço da tecnologia envolvida na produção do álcool.

No momento, o petróleo passa por forte tendência de alta, e as especulações mais fundamentadas sugerem que seu valor irá permanecer irreversivelmente num patamar elevado. Isso abre excepcionais oportunidades econômicas e tecnológicas para o Brasil, que pode se tornar um grande exportador de energia renovável de origem vegetal, principalmente de álcool e de biodiesel. Além do mais, um dos motivos da maior competitividade de nossa lavoura de grãos é a adoção da tecnologia – brasileira – do plantio direto, que dispensa a aração do solo e, portanto, economiza energia em alta escala.

Recentemente, os Estados Unidos decidiram usar álcool anidro misturado à gasolina, produzido localmente a partir do milho e a preço mais alto quando comparado com aquele produzido a partir da cana-de-açúcar. No âmbito desse programa, proibiu a importação de álcool brasileiro. A Cargil, empresa multinacional norte-americana, está projetando uma usina na América Central para produção de álcool anidro a partir de álcool hidratado brasileiro, visando a exportá-lo para os Estados Unidos. Isso demonstra que o álcool já se tornou bom negócio, mesmo sem subsídios. A União Européia decidiu que, a partir de 2010, 20% dos combustíveis usados pelos veículos automotivos naquele continente devem ser provenientes de fontes renováveis. A produção de energia renovável deverá se tornar um excelente negócio para o País, e é necessário iniciar com urgência as ações para o ágil aproveitamento dessa oportunidade.

Outro exemplo de oportunidade tecnológica perdida refere-se às comunicações por fibras ópticas. O Brasil chegou a desenvolver parte significativa da tecnologia das telecomunicações ópticas. Mesmo com a existência de uma empresa brasileira que podia produzir fibras ópticas com qualidade e preço comparáveis aos existentes no mercado internacional, foi decidido, no âmbito do Governo Federal, usar tecnologia inteiramente importada em nosso sistema de telefonia.

**A alta do petróleo abre excepcionais oportunidades econômicas e tecnológicas para o Brasil, que pode se tornar um grande exportador de energia renovável de origem vegetal**

**A produção de energia renovável deverá se tornar um excelente negócio para o País, e é necessário iniciar com urgência as ações para o ágil aproveitamento dessa oportunidade**



Empresas semelhantes à Embrapa e Embraer poderiam ser criadas em outros setores para os quais se queira dar um dinamismo mais intenso. Essa possibilidade deveria ser estudada no âmbito do programa Política Industrial, Tecnológica e de Comércio Exterior. Uma vez que, diferente-

Mesmo com a existência de uma empresa brasileira que podia produzir fibras ópticas com qualidade e preço comparáveis aos existentes no mercado internacional, o Governo Federal decidiu usar tecnologia inteiramente importada em nosso sistema de telefonia

mente do que ocorre no setor agrícola, o governo encontra na área industrial parceiros privados com grande porte econômico, deveriam ser pensadas formas de parcerias em que o setor privado contribuísse com grande parte dos gastos. É também importante destacar que o País

já conta com uma base científica muito considerável e que vem crescendo a uma taxa que apenas é superada pelo caso da Coreia do Sul.

### 4.3. TEORIA E EXPERIMENTO

No Brasil, cerca de 55% dos físicos são teóricos e 45% são experimentais. Em algumas áreas, essa diferença é ainda mais acentuada. Nos países desenvolvidos centrais, de dois terços a três quartos dos físicos são experimentais. Pode-se buscar razões sociológicas que expliquem a anomalia brasileira, de resto bastante característica de países em desenvolvimento. Porém, a mais clara delas está associada à dificuldade de os grupos experimentais obterem recursos adequados para a realização de suas

Apenas na área de matéria condensada, caminha-se, lentamente, para uma relação mais apropriada entre o número de físicos experimentais e teóricos; em partículas e campos, a assimetria é gritante

experiências. Apenas na área de matéria condensada, caminha-se, lentamente, para uma relação mais apropriada entre o número de físicos experimentais e teóricos. Na área de partículas e campos, a assimetria é gritante.

Nos países desenvolvidos, a distribuição entre teóricos e experimentais é regulada pelo mercado de trabalho: como pelo menos a metade dos físicos trabalha em empresas – e elas contratam muito prioritariamente físicos experimentais –, o mercado de trabalho para os experimentais é muito mai-

or. No Brasil, como as empresas ainda contratam poucos físicos, não há um mecanismo natural que leve os estudantes a elegerem majoritariamente a área experimental, e apenas políticas públicas com objetivos previamente deliberados podem alterar a situação presente. Infelizmente, em consequência dos prazos rígidos de bolsas de pós-graduação e da falta de recursos para a pesquisa – esta mais sentida no caso da física experimental –, o que, no momento, presenciamos é um crescimento da fração de físicos teóricos.

Temos aqui um círculo vicioso: a pequena demanda por físicos na empresa leva a termos poucos físicos experimentais. E, por termos poucos físicos experimentais, o surgimento de indústrias com base na inovação e na pesquisa fica mais difícil. É necessário romper esse círculo através de uma política adequada de bolsas – da iniciação científica ao doutorado – que dê preferência a programas de pesquisas experimentais. O País tem, neste momento, mais capacidade de formar físicos teóricos que experimentais, e, por isso, é necessário que retomemos o programa de enviar bons estudantes para fazer doutorado em universidades de excelente reputação no exterior. Há um consenso de que a interrupção do programa de formação de cientistas brasileiros no exterior foi muito precoce. É importante continuar formando gente lá fora, e, no caso da física, a área experimental deve ser altamente privilegiada nesse tipo de programa. Além do mais, deveria ser considerada a possibilidade de que o prazo de bolsas de mestrado e de doutorado para trabalhos experimentais fosse mais longo que as de natureza teórica.

No Brasil, como as empresas ainda contratam poucos físicos, não há um mecanismo natural que leve os estudantes a elegerem majoritariamente a área experimental

É necessário que voltemos a enviar bons estudantes para fazer doutorado em universidades de excelente reputação no exterior

## 5. FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS

### 5.1. FORMAÇÃO CIENTÍFICA

A rápida evolução da ciência e da tecnologia demanda urgentes e profundas inovações tanto na forma quanto nos conteúdos ensinados em todos os níveis. Esse problema tem sido objeto de atenção mundial e, portanto, é importante considerar as análises e iniciativas propostas tanto no Brasil quanto no exterior.

Uma sociedade cada vez mais inserida em um ambiente tecnológico exige que todas as pessoas recebam formação científica que lhes permita discernimento dos riscos e benefícios envolvidos nas inovações tecnológicas, bem como preparo mínimo para usufruir os produtos da tecnologia. Como base de

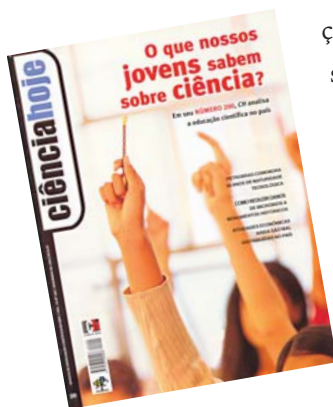
comparação, podemos citar o caso da

Em números absolutos, a produção da física da Coréia do Sul corresponde àquela do Brasil

Coréia do Sul, que não tem analfabetos desde 1960. Hoje, naquele país, o ensino fundamental da matemática e das ciências

é considerado como um dos melhores do mundo. Em números absolutos, a produção da física da Coréia do Sul corresponde àquela do Brasil, segundo Jorge Guimarães, em conferência inaugural na Coordenação de Pesquisa e Pós-graduação em Engenharia, em março de 2004.

No ensino de ciências, devemos considerar três vertentes: a educação escolar para o futuro exercício da cidadania; a preparação de profissionais para serviços diretos à sociedade; e a formação de cientistas capazes de contribuir para o avanço da ciência e da tecnologia.



#### 5.1.1. Resultado preocupante

Em reportagem publicada sobre o conhecimento científico de nossos jovens ('Saber Fragmentado', Alicia Ivanissevich, *Ciência Hoje*,

dezembro de 2003, p. 27), foram publicados os resultados da avaliação do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA, Unesco, julho 2003), relacionando 43 países. Esses dados mostram que o Brasil ficou em 42<sup>o</sup> lugar nas aptidões para as ciências.

O estudo avalia a capacidade de jovens em torno de 15 anos de usar conhecimentos científicos, reconhecer perguntas relacionadas à ciência, responder a questões relacionadas às pesquisas científicas, saber associar dados científicos com afirmativas ou

conclusões e comunicar aspectos da ciência. Esse resultado, mesmo preocupante, é previsto pelos resultados das pesquisas – nacionais e internacionais – na área de ensino

**Resultados do Programa Internacional de Avaliação de Estudantes, relacionando 43 países, mostraram que o Brasil ficou em 42<sup>o</sup> lugar nas aptidões para as ciências**

de ciência, que mostram que as dificuldades dos estudantes estão relacionadas ao uso de formalismo matemático e de outras formas simbólicas – gráficos, diagramas e tabelas –, que exigem um grau de abstração que eles ainda não têm.

Tradicionalmente, o ensino da física em todos os níveis tem se concentrado no acúmulo de informações, na apresentação dos ‘produtos’ da ciência e no desenvolvimento de habilidades operacionais. Esse tipo de abordagem é necessário, mas não suficiente. Sem a correspondente discussão fenomenológica da natureza das ciências experimentais, fica difícil a compreensão das diferentes linguagens – oral, gráfica, matemática, computacional – indispensáveis para a construção dos conceitos científicos. Mesmo quando essas ferramentas são trabalhadas no cotidiano escolar, o hábito de ensinar privilegiando estratégias de caráter operacional mascara a importância da evidência experimental e sua contribuição para a compreensão da cultura científica.

## 5.2. FORMAÇÃO DE PESQUISADORES

A física é a base última não somente das ciências naturais, mas também de quase toda a ciência e a tecnologia contemporâneas. Isso faz com que seja ensinada como disciplina básica na graduação de física e como disciplina de serviço para os estudantes das outras ciências e de engenharia.

Hoje, as pesquisas têm um caráter temático envolvendo freqüentemente colaboradores sem formação matemática; portanto, os físicos devem ser preparados para comunicar suas idéias para públicos mais amplos

A investigação da natureza hoje se apóia em três classes de métodos: experimentais, teóricos e computacionais. A simulação computacional como método poderoso de investigação da natureza tem levado não somente à percep-

ção de fenômenos complexos, mas também a importantes descobertas que ainda não puderam ser descritas pelos métodos analíticos tradicionais da física matemática, nem evidenciadas pelos métodos experimentais.

No que concerne à formação de bacharéis e pós-graduados em física, deve-se considerar o tipo de profissional que a sociedade solicita. Hoje, as pesquisas têm um caráter temático e não mais disciplinar, envolvendo freqüentemente colaboradores sem formação matemática. Por isso, os físicos devem ser preparados para comunicar suas idéias para públicos mais amplos.

A necessidade de formação de recursos humanos para a ciência e a tecnologia atual e a crescente fragmentação do conhecimento em especialidades cada vez mais restritas geram problemas que exigem a revisão de todo o processo educacional, especialmente do ensino universitário. No 1º Congresso Mundial da Transdisciplinaridade, realizado em 1994, em Portugal, a norte-americana Julie Klein apresentou um recorte do conhecimento que distinguia 8.530 disciplinas reconhecidas. Segundo Evando Mirra, ex-presidente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

A crescente fragmentação do conhecimento gera problemas que exigem a revisão de todo processo educacional, especialmente do ensino universitário

(CNPq), esta agência classifica a pesquisa em 868 campos e especialidades. Mesmo que especializações tão minuciosas sejam requeridas, a formação do especialista deve se assentar em uma

base científica mais ampla, que dê ao estudante uma boa visão dos fundamentos científicos da sua especialidade.

Em geral, amplos espectros de especialidades se apóiam na mesma base científica. Por isso, o domínio dos fundamentos científicos de sua atividade qualifica o especialista para interagir de forma eficiente com outros da mesma grande área do conhecimento. Essa capacidade de interação é cada vez mais importante no cenário de fragmentação crescente das especialidades. Hoje, as empresas estão priorizando a contratação do profissional com

sólida formação científica, capaz de rapidamente dominar alguma especialidade e mais apto para entender o significado de seu trabalho na atividade global da empresa e de interagir tanto com colegas cuja atividade é complementar à sua quanto em projetos temáticos de pesquisa.

A questão da formação abrangente é polêmica, pois se argumenta que, sem âncora em uma formação disciplinar profunda, a formação generalista leva a idéias vagas, freqüentemente estéreis. Entretanto, é necessário entender que a ciência é muito ampla, mas sua estrutura lógico-conceitual é relativamente simples e se apóia num pequeno número de princípios gerais dos quais tudo se obtém – pelo menos, em princípio – por dedução. Por isso, se, por um lado, é impossível exaurir as implicações dos princípios gerais, por outro, quando o estudante domina esses princípios acaba entendendo, através da vivência, as implicações importantes para o seu trabalho.

Quando o estudante domina os princípios em que se apóia a estrutura lógico-conceitual da ciência, acaba entendendo, através da vivência, as implicações importantes para o seu trabalho

Não só a física, mas também os métodos da física teórica – matemática e computacional –, bem como da experimental, estão hoje continuamente ampliando o âmbito de suas aplicações, e, por isso, freqüentemente os físicos têm de colaborar em equipes multidisciplinares.

### 5.2.1. Cursos de graduação mais flexíveis

A flexibilização curricular deve facilitar a formação múltipla entre as áreas de conhecimento na graduação ou na pós-graduação. Por exemplo, um advogado de patentes necessita de uma formação interdisciplinar que somente pode ser obtida se seu curso de graduação for realizado conjuntamente em direito e ciências naturais ou engenharia. Advogados com essa formação – inexistentes no Brasil e muito valorizados nos países desenvolvidos – são essenciais para que o País participe do jogo de vida ou morte da propriedade intelectual.

É também importante a implementação de novos cursos em que as fronteiras entre físicos, químicos, matemáticos, engenheiros e biólogos sejam rompidas e que levem à formação de profissionais aptos para enfrentar os desafios da pesquisa e do desenvolvimento tecnológico atual.



Áreas importantes como a ciência dos materiais, a nanotecnologia, a física biológica, a robótica e a engenharia biomédica seriam beneficiadas por esses novos métodos de formação. Docentes filiados simultaneamente a departamentos distintos facilitariam o intercâmbio.

Em particular, uma melhor integração da física, da química e das engenharias é fundamental para nosso avanço tecnológico. Essa integração seria estratégica para acelerar o ritmo de desenvolvimento da

engenharia no Brasil. Em muitas universidades públicas brasileiras, o aluno é impedido de fazer simultaneamente mais de um curso de graduação. Em contraste, em outros países, os alunos estão sendo estimulados a se graduarem em mais de uma carreira. Por exemplo, atualmente no MIT um terço dos alunos de física se gradua em um segundo *major*, e esta fração é crescente. No Brasil, os alunos de melhor desempenho deveriam ser estimulados a se graduar em duas áreas da ciência, ou em ciência e engenharia.

### 5.2.2. Ênfase nas físicas moderna e contemporânea

No mundo inteiro, os conteúdos da física – tanto nos cursos destinados aos físicos quanto naqueles oferecidos como disciplinas de serviço – há muito oferecem uma visão inadequada do quadro atual dessa área do conhecimento, de seu dinamismo e de sua abrangente inserção na ciência e na tecnologia. O problema é mais grave nas disciplinas de física básica –

Os conteúdos da física há muito oferecem uma visão inadequada do quadro atual dessa área do conhecimento, de seu dinamismo e de sua abrangente inserção na ciência e na tecnologia

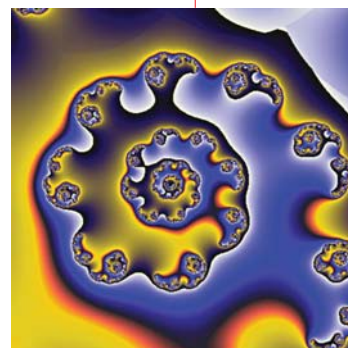
geralmente, as únicas oferecidas aos estudantes de engenharia e de outras ciências –, o que contribui para o desprestígio da física frente ao público educado. Passamos a impressão de que física é algo centrado em roldanas, planos inclinados, piões, circuitos elétricos, lentes etc.



Tópicos como relatividade e física quântica, que já completam um século, são classificados como física moderna e quase omitidos nas ementas da física básica.

Já os tópicos da física contemporânea, como estrutura da matéria, campos de força, cosmologia, **caos**, complexidade, materiais, física computacional e outros, são pouco enfatizados, mesmo no ciclo profissional da graduação em física. Nos cursos de licenciatura em física, a desconsideração da física moderna e contemporânea é muito grave, já que os professores formados para o ensino médio não estão preparados para mostrar essa disciplina como algo interessante e cuja validade de conteúdo é digna de consideração. Esse quadro exige mudanças, caso contrário a física poderá cair numa relativa marginalização. É lamentável que hoje os bacharéis em física que entram na pós-graduação rapidamente se especializem sem chegar a desenvolver uma razoável visão geral da física contemporânea.

**Professores formados para o ensino médio não estão preparados para mostrar a física como algo interessante; esse quadro exige mudanças, caso contrário a física poderá cair numa relativa marginalização**



### 5.3. FORMAÇÃO PARA A TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

O programa de pós-graduação brasileiro, criado há cerca de 35 anos, pode ser considerado uma das mais bem sucedidas ações de política científica do País. Nesse relativamente curto período, a pós-graduação formou cerca de 4 mil doutores em física.

Sua construção nesses anos baseou-se fortemente num processo autocatalítico em que um dos principais objetivos era a formação de recursos humanos qualificados absorvidos pela própria academia.

**As universidades e os institutos de pesquisa não têm conseguido absorver os cerca de 200 doutores formados anualmente em física, e o número deles trabalhando na indústria ou outros setores fora da academia é ínfimo**

Esse processo criou uma pós-graduação forte que levou a um considerável crescimento da produção científica no País. Após esse período inicial, existe, hoje, um consenso de que foi atingida uma massa crítica de

pesquisadores de alto nível implantados nas universidades públicas. Comparado com os países mais desenvolvidos, esse número é ainda relativamente pequeno e deve crescer. No entanto, as universidades e os institutos de pesquisa não têm conseguido absorver os cerca de 200 doutores formados anualmente em física, e o número deles trabalhando na indústria ou outros setores fora da academia é ínfimo.

### 5.3.1. Programa de interação com a indústria

É, portanto, chegado o momento de acrescentar aos objetivos do programa nacional de pós-graduação contribuições que permitam à física se

É necessário criar no Brasil mecanismos que permitam a interação entre os físicos e a indústria; um deles é criar uma interação entre os programas de pós-graduação e as indústrias

envolver mais diretamente no setor não acadêmico. Nos Estados Unidos, por exemplo, para cada cinco doutores em física, dois estão na indústria. É necessário criar no Brasil mecanismos que

permitam a interação entre os físicos e a indústria. Um deles seria uma interação entre os programas de pós-graduação e as indústrias. Exemplos desse tipo de interação já existem, na Alemanha, como o sistema Fraunhofer, em que setores da indústria alemã mantêm cursos de pós-graduação em centros específicos.

Programas ainda mais próximos da academia existem em outros países, como Estados Unidos, Irlanda e Suécia. Neste último, o programa AIM (sigla inglesa para Medidas e Instrumentação Avançadas), criado na Universidade de Uppsala, em 1998, desenvolve projetos de pós-graduação em parceria e com financiamento da indústria. Na Irlanda, o programa DIAS (sigla inglesa para Instituto Para Estudos Avançados de Dublin), criado em 1988, mantém estudantes trabalhando em contratos com a indústria. Nesses casos, é importante frisar que a participação da universidade na interação deve ser de natureza acadêmica, e os alunos selecionados para esse programa – uma fração estabelecida do universo total deles –, devem passar pelos mesmos critérios de avaliação de qualidade, produzindo teses originais.

O propósito básico seria educar uma fração dos doutores com conhe-

cimento básico e experiência estratégica, treinando-os não apenas com o conhecimento internacional e avançado da ciência, mas também em colaboração com a indústria nacional. A percepção pela indústria da capacidade de desenvolvimento tecnológico a partir de cientistas treinados é um possível e eficiente mecanismo para impulsionar um desenvolvimento industrial autônomo. É importante que uma parcela da nova geração de físicos esteja engajada com os problemas industriais e que esteja preparada para trabalhar fora da academia.

Esse mecanismo de preparação do físico para atuar em setores não acadêmicos pode ser realizado mesmo em nível de mestrado. Cursos de bacharelado em física com flexibilidade na grade curricular podem levar a uma formação ampla e ao mesmo tempo dirigida ao interesse de cada aluno. A complementação e a profissionalização dessa formação geral pode ser obtida com um curso de mestrado de duração curta, de um ano, no qual o estudante pode tanto se especializar em uma área não acadêmica e, depois, partir para o mercado de trabalho quanto se preparar para um doutorado com fins acadêmicos ou não.

A interação universidade-indústria, nos moldes descritos aqui, tem a vantagem de aumentar

o conhecimento científico, a competitividade e a transferência de tecnologia para a indústria. Por outro lado, a universidade se beneficiaria com possíveis recursos advindos do setor não acadêmico e com possibilidades de emprego. Há exemplos desse tipo de interação no Brasil. Em Minas Gerais, por exemplo, a indústria de metalurgia manteve uma colaboração próxima com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), participando do financiamento e do desenvolvimento de novos projetos, absorvendo pesquisadores formados nessa interação, motivando novos pesquisadores e criando perspectivas concretas de emprego. O exemplo da metalurgia é emblemático: o Brasil produz hoje aço de melhor qualidade e mais barato que o norte-americano e

É importante que uma parcela da nova geração de físicos esteja engajada com os problemas industriais e que esteja preparada para trabalhar fora da academia

O exemplo da metalurgia é emblemático da interação universidade-indústria: o Brasil produz hoje aço de melhor qualidade e mais barato que o norte-americano e que a maioria do europeu

que a maioria do europeu, sendo também praticamente independente em produção de aços especiais.

#### 5.4. FORMAÇÃO DE PROFESSORES

As evidências de que a maioria dos professores, da escola primária à graduação, tem carências de conteúdo e/ou metodológicas exigem revisões profundas nos cursos de formação desses profissionais. A etapa de formação inicial do professor que ensina física, em todos os níveis, deve constituir-se

**O licenciado deve ter capacidade de aplicar tecnologias ao ensino de física e de operacionalizar resultados da pesquisa na área de ensino, bem como suas metodologias e suas estratégias**

na base de seu futuro desenvolvimento profissional, assegurando-lhe independência intelectual e capacidade de adequação às tarefas próprias do educador de ciências.

As diretrizes básicas da comissão de especialistas na área de física da Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação, elaboradas em 2002, recomendam que o profissional, independentemente de sua área de atuação, tenha conhecimentos sólidos e atualizados em física, seja capacitado para abordar problemas novos e tradicionais, bem como preocupado em buscar novas formas do conhecimento científico e tecnológico na área em que se propõe atuar. Recomenda, ainda, que, em todas as suas atividades, a atitude de investigação esteja presente, associada às diferentes formas e objetivos de seu trabalho específico.

**As disciplinas da física básica da licenciatura devem ter o mesmo nível de aprofundamento daquelas oferecidas para os outros cursos de física da instituição**

Assim como o futuro bacharel é encaminhado para a pesquisa pura e aplicada, o futuro licenciado deve ter, além de uma sólida formação de conteúdo, capacidade de aplicar

tecnologias ao ensino de física e de operacionalizar resultados da pesquisa na área de ensino, bem como suas metodologias e suas estratégias. Entretanto, os currículos devem considerar as características próprias da clientela da licenciatura. Os cursos noturnos – hoje, em número considerável – recebem alunos que voltam aos estudos anos após terem completado o ensino médio. Eles trazem consigo dificuldades que freqüentemente os impe-

dem de ter sucesso nos estudos universitários, o que leva às altas taxas de evasão observadas.

### 5.4.1. Dois modelos de currículos

Os currículos obedecem hoje dois modelos predominantes. Um deles apresenta a visão utópica do que deva ser a formação do professor de física, baseada em critérios absolutos de qualidade. O outro rebaixa a qualidade dos cursos para poder atender à realidade de alunos heterogêneos e com exigências intelectuais diferenciadas. Assim, faz-se necessário implementar estratégias de ensino alternativas que individualizem o ensino, quando preciso.

Hoje, com o aumento da oferta de licenciaturas noturnas, o grau de diferenciação entre os currículos do bacharelado e da licenciatura abrange um amplo espectro. Há instituições que conferem identidade própria ao curso de licenciatura. Essa separação é polêmica. Idealmente, deve-se assegurar que as disciplinas de física básica da licenciatura tenham o mesmo nível de aprofundamento daquelas oferecidas para os outros cursos de física da instituição.

Para se desenvolver um ensino de boa qualidade, é necessário: criar infra-estrutura e realizar uma mudança de atitude em relação a abordagens com ênfase na fenomenologia e na experimentação; dar boa idéia da natureza da ciência e do método científico e de sua história. Além disso, é necessária uma articulação entre as disciplinas de conteúdo de física e sua componente pedagógica específica. A grande maioria dos docentes que lecionam nas licenciaturas não foi preparada para essa função. No entanto, é importante entender que o professor universitário deve ser um modelo para seus alunos, expondo seu domínio dos conteúdos através da aplicação de boas práticas didáticas.

É também importante que os conteúdos dos programas ofereci-

A grande maioria dos docentes que lecionam nas licenciaturas não foi preparada para essa função. No entanto, é importante entender que o professor universitário deve ser um modelo para seus alunos, expondo seu domínio dos conteúdos através da aplicação de boas práticas didáticas

É importante que os conteúdos dos programas oferecidos sejam revistos, pois, hoje, apresentam um excesso de disciplinas da física clássica

**Deve-se pensar num currículo mínimo nacional para a licenciatura em física que seja adaptável às diferentes realidades**

dos sejam revistos, pois, hoje, apresentam um excesso de disciplinas da física clássica. Devem ser ensinados mais tópicos da física do século passado, como estrutura da matéria e introdução à mecânica quântica, além de disciplinas de física experimental moderna e eletrônica digital. O total das disciplinas experimentais é também pequeno: cerca de 20% do total das disciplinas oferecidas. Temas da física contemporânea são raramente incluídos.

A revisão curricular deverá introduzir estudos de cunho interdisciplinar, para formar professores que possam trabalhar novos enfoques, como solicitado pelos Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio (MEC/Semtec, 2001). Assim, é importante montar grades curriculares que permitam o trânsito do professor nas diversas áreas das ciências, cosmologia, biofísica, química molecular, geociência, energias alternativas, meio ambiente etc., assim como também uma melhor formação para uso das novas tecnologias de informação e comunicação aplicadas ao ensino da física. O conhecimento da história da ciência e da tecnologia deve estar sempre presente nos novos currículos. A pesquisa em ensino de física deve sempre ser apresentada aos estudantes no contexto das disciplinas de prática e estágio.

Na atualidade, não existe um currículo mínimo nacional para a licenciatura em física, que possa ser adaptado pelas diferentes instituições. Esse programa deveria ter abrangência bastante para constituir a base de uma proposta nacional para a licenciatura em física, podendo ser adaptado às diversas realidades.

**Pelo seu potencial formador e como contribuição para uma cultura científica atualizada, a exposição do licenciado à pesquisa científica e aos temas da física contemporânea deverá ser fortemente incentivada**

Os aspectos curriculares e metodológicos devem integrar os conteúdos da física com seus métodos de ensino. Os atuais estágios e as práticas de ensino – que ocupam quase 30% da grade das licenciaturas – devem ser reformulados radicalmente e implementados através da forte integração/colaboração entre os professores de ciências tanto com a escola quanto com educadores do ensino médio e superior.

Pelo seu potencial formador e como contribuição para uma cultura

científica atualizada, a exposição do licenciado à pesquisa científica e aos temas da física contemporânea deverá ser fortemente incentivada. Nesse sentido, é necessário implementar programas de bolsas de iniciação científica, sendo também aconselhável que os alunos recebam crédito por sua participação em seminários e colóquios através de uma programação específica.

O Enem, que está sendo implementado pelo MEC em caráter obrigatório para todos os estudantes que finalizam o ensino médio, deverá ter impacto sobre o ensino formal da física hoje oferecido

### 5.4.2. Vestibular e reformulação da licenciatura

A reformulação dos cursos universitários, em especial dos cursos de licenciatura, deve ser feita após a definição das novas formas de seleção de estudantes, consideradas na Reforma do Ensino Superior, ora em discussão. É difícil defender o atual modelo de vestibular, cujas exigências acadêmicas são excessivas e dão demasiada ênfase à quantidade informações que os candidatos já acumularam. Estudos sobre o desempenho e a evasão universitária mostram que essa forma de acesso à universidade tem baixa discriminação do potencial para estudos universitários: a classificação do candidato não assegura sua permanência e/ou futuro desempenho na universidade. Além disso, o atual sistema, em que o estudante concorre a um curso pré-definido, leva a uma especialização muito precoce e à exclusão da maioria dos melhores candidatos. Essa falha provavelmente será sanada.

Disciplinas introdutórias de nivelamento são necessárias para atender alunos com formação prévia incompleta

O vestibular tradicional brasileiro, que não valoriza o desempenho do aluno no ensino médio, também já está sendo revisto. Nesse sentido, foi introduzida a prova do Enem (Exame Nacional do Ensino Médio), que exige raciocínio, leitura com compreensão e bom domínio das linguagens simbólicas, e que vem sendo utilizada cada vez mais pelas universidades como critério parcial para a classificação dos candidatos. Essa prova, inicialmente de caráter voluntário, está sendo implementada pelo MEC em caráter obrigatório para todos os estudantes que finalizam o ensino médio, o que deverá ter impacto



sobre o ensino formal da física hoje oferecido, favorecendo o desenvolvimento de habilidades de raciocínio, capacidades operacionais mais gerais e domínios das linguagens simbólicas, como estabelecido nos Parâmetros Curriculares Nacionais.

**É importante que o sistema universitário brasileiro ofereça aos alunos aptos para estudos mais avançados disciplinas básicas em níveis de aprofundamento diferenciado**

Entretanto, se as novas formas de exames irão provavelmente selecionar melhor os candidatos, políticas de inclusão social deverão trazer novos desafios para o ensino

superior. O estabelecimento de cotas para os alunos da escola pública e dos grupos hoje excluídos inevitavelmente levará à escolha de alunos com formação inadequada. Assim, deverá ser assegurada a oferta de disciplinas introdutórias que permitam o nivelamento de alunos com formação prévia incompleta, minimizando a evasão que atualmente aflige o sistema e que poderá aumentar caso medidas apropriadas não sejam tomadas. Essas disciplinas requerem uma revisão da física ensinada no ensino médio – em conteúdo e extensão – com enfoques que associem os conteúdos à compreensão da natureza aplicada aos fenômenos do cotidiano. Paralelamente, o processo de ensino-aprendizagem precisa ser repensado à luz da clientela e de uma nova dinâmica de ensino.

A implementação de modelos que utilizam meios eletrônicos e/ou a educação a distância deverá ser adotada, respeitando as diferenças individuais e melhorando a eficiência da

**Recomenda-se que todas as reformas curriculares prestem atenção especial à proficiência dos estudantes na compreensão de textos e no uso da língua materna, escrita e oral**

aprendizagem. É necessário usar formas de avaliação diagnóstica que permitam verificar se o aluno atingiu as competências estabelecidas.

Essas ações requerem:

- i) implementação de infra-estrutura adequada;
- ii) recursos humanos, administrativos, técnicos e docentes voltados para novas formas de ensino;
- iii) materiais didáticos especificamente desenvolvidos;
- iv) operacionalização das novas tecnologias de comunicação, que até hoje permanecem como uma necessidade do futuro.

Em contrapartida, é importante que o sistema universitário brasileiro, à semelhança das experiências internacionais, ofereça aos alunos aptos para

estudos mais avançados disciplinas básicas em níveis de aprofundamento diferenciado. A solução é de fácil implementação na universidade pública brasileira.

Finalmente, devido à sua relevância, recomenda-se que todas as reformas curriculares prestem atenção especial à proficiência dos estudantes na compreensão de textos e no uso da língua materna, escrita e oral. A análise dos resultados dos vestibulares nessas áreas demonstra a necessidade de melhorar o domínio dos alunos na utilização do português e da matemática básica aprendidos no ensino médio. Sem essas capacidades bem estabelecidas, é impossível ensinar com eficiência a física ou qualquer outra ciência, pois não existe metodologia que leve à superação dessas dificuldades.

## 6. INCLUSÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA



### 6.1. EDUCAÇÃO PARA A CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Na escola básica – ou seja, nos níveis fundamental e médio –, o ensino deve contribuir para a educação do cidadão, através da compreensão do papel da ciência no desenvolvimento da tecnologia. O cidadão comum precisa processar informações de forma objetiva e comunicar-se de forma

É hoje reconhecido que as dificuldades de se realizar um bom ensino de ciência escolar aumentam à medida que descemos no nível de escolaridade

estruturada, bem como possuir espírito crítico e ser capaz de compreender a cultura científica e tecnológica do seu tempo – vale citar aqui que os novos currículos da Univer-

sidade de Harvard (abril 2004) introduzem dois aspectos comuns a todas as áreas de conhecimento: flexibilização e a introdução de uma componente *hands-on* (mão na massa) de ciências.

É hoje reconhecido que as dificuldades de se realizar um bom ensino de ciência escolar aumentam à medida que descemos no nível de escolaridade, e o ensino dos graus posteriores fica prejudicado quando a educação inicial foi deficiente. Mesmo que uma criança das primeiras séries ou pré-escola não estude física como tal, essa criança está formando suas estruturas de raciocínio lógico a partir do contato com a natureza e o cotidiano. Como Piaget nos diz em sua teoria dos estágios do desenvolvimento cognitivo, quanto mais rico e mais bem organizado esse ambiente, melhor a criança estará apta para o desenvolvimento do pensamento abstrato quando poste-

Fazer experiências é uma diversão para a maioria das crianças antes de serem apresentadas ao ensino formal das disciplinas de ciências

riormente for introduzida formalmente ao estudo das ciências.

Fazer experiências é uma diversão para a maioria das crianças antes

de serem apresentadas ao ensino formal das disciplinas de ciências, quando a curiosidade inicial dá lugar ao desinteresse hoje observado nos alunos do ensino médio. Essa realidade só pode ser modificada quando o ensino de ciências for trabalhado de forma adequada, tanto em relação à metodologia quanto a conteúdos que apresentem tópicos fundamentais bem escolhidos, respeitando as faixas etárias e o desenvolvimento cognitivo dos alunos.

Os resultados de pesquisas na área de ensino de ciência mostram que as habilidades desenvolvidas a partir da observação controlada dos fenômenos – observar, classificar, registrar eventos, desenvolver pequenas atividades com controle qualitativo e semiquantitativo das grandezas, correlacionar etc. – precisam ser trabalhadas nas crianças desde muito cedo. E isso só pode ser feito por professores formados para essas tarefas.

O professor primário – responsável pelo ensino de ciências no primeiro segmento do ensino fundamental, quando as crianças se encontram em sua etapa mais formativa – é formado para o magistério nos cursos de ensino médio profissional – ou no normal superior –, cujas grades curriculares ensinam pouco do conteúdo das ciências. O resultado é que professores de formação incompleta e inadequada ensinam ciência para as crianças – que se encontram em sua etapa mais criativa – como se a ciência fosse um conjunto de vocabulários, definições e ilustrações que os livros fornecem – quando se usam livros. Esse quadro precisa ser modificado, e isso só acontecerá quando os professores receberem formação apropriada e for assegurada uma infraestrutura escolar que implemente e mantenha em operação bibliotecas e laboratórios.

As novas tecnologias – informática, vídeos, Internet etc. –, que já foram oferecidas como uma solução final para a melhoria da educação – e temos evidência de que realmente são apenas uma estratégia útil, quando bem dominada pelo professor –, ainda não foram operacionalizadas. Isso precisa ser feito com urgência em toda a rede escolar pública.

Situação semelhante pode ser apontada para o ensino de física no segundo segmento do ensino fundamental. A avaliação dos alunos brasileiros no PISA – como mencionado no início deste capítulo – evidencia a situação crítica do ensino de ciências nesse nível. Os professores habilita-

**Professores de formação incompleta e inadequada ensinam ciência para as crianças como se esta fosse um conjunto de vocabulários, de definições e ilustrações**

A exigência de uma formação específica para o ensino de física nesse nível só será efetivada através de uma profunda reestruturação curricular das licenciaturas que modifique os conteúdos e os métodos de ensino da física e das outras ciências

dos para o ensino das ciências no segundo segmento da escola básica, 5<sup>a</sup> a 8<sup>a</sup> séries, são formados nas licenciaturas em biologia e seu conhecimento de física é geralmente precário. A exigência de uma formação específica para o ensino de física nesse nível só será efetivada através de profunda reestruturação curricular das licenciaturas que modifique os conteúdos e os métodos de ensino da física e das outras ciências.

### 6.1.1. O ensino de física e a escola fundamental e média

Os problemas enfrentados pela escola exigem que sua infra-estrutura básica seja modificada, com incorporação de bibliotecas e laboratórios bem equipados, planta física adequada, disciplina escolar, tempo de preparação para os professores etc. Aspectos acadêmicos como formação continuada do professor, número de horas de física na grade escolar, materiais didáticos adequados, entre outros, não são menos relevantes. Atenção deve ser dada à situação trabalhista do professor, que leciona mais de 40 horas de aula/semana, em diversas escolas, para um contingente de alunos que pode em muito superar 500 estudantes/semana. Nesse quadro, a escola pública oferece dificuldades maiores, com salários indignos e condições

Atenção deve ser dada à situação trabalhista do professor, que leciona mais de 40 horas de aula/semana, em diversas escolas, para um contingente de alunos que pode em muito superar 500 estudantes/semana

de trabalho que colocam em risco a própria integridade física do professor. Essencialmente, os problemas do ensino no ensino médio e, principalmente, no ensino fundamental são decorrentes dos salários pagos aos professores. Sem uma valorização salarial desses educadores, não há solução real para as mazelas que afetam a educação das nossas crianças

O estado de falência da escola pública é bem conhecido. O MEC apresenta soluções paliativas como o subsídio de programas de educação continuada para os professores e verbas que nem sempre são utilizadas para os objetivos propostos. A situação do ensino da escola particular difere pouco

desse quadro de inadimplência da escola pública. Como exceção, temos somente as escolas federais do ensino médio – regular e técnico –, os colégios de aplicação universitários e algumas escolas particulares de elite.

Fica claro que, sem uma política educacional e de financiamento voltada para a qualidade da escola, será impossível reverter o quadro atual. Sendo a lentidão do efeito da inovação educacional bem conhecida, as autoridades educacionais responsáveis pela implementação dessas mudanças, em todos os níveis, erram pela rapidez com que inventam novos programas e pela ausência de uma avaliação que conduza e justifique mudanças.

**A implementação de novos programas erra pela rapidez com que eles são propostos sem avaliação que justifique mudanças**

Mencionamos a seguir problemas considerados prioritários no cenário atual (P), apontando possíveis soluções (S):

- P: O número de horas de física na grade escolar pública está reduzido a uma ou duas horas/semana e a três ou quatro horas/semana na particular; assim, as tentativas de inovação ficam comprometidas, sendo o currículo reduzido a conteúdos mínimos fragmentados.
- S: É importante montar uma grade curricular e estratégias efetivas para sua implementação; montar laboratórios didáticos e bibliotecas atualizadas e preparar os professores para utilizá-los adequadamente.
- P: Os professores precisam formação adequada para a utilização das tecnologias hoje consideradas necessárias para superar os problemas do ensino de física.
- S: Dar formação específica aos professores para uso de informática e vídeo na escola.
- P: O livro didático é pouco utilizado, pese a existência de excelentes livros para o ensino médio.
- S: Manter coordenações capacitadas nas escolas que assegurem o uso de materiais didáticos e tecnologias adequados e que integrem os professores nas propostas educacionais (projeto pedagógico) da escola.
- P: A disciplina escolar não pode apenas ser implementada pelo professor em sua sala de aula.
- S: A administração da escola deve prever e prover que a disciplina necessária para o bom andamento da sala de aula seja mantida.

### 6.1.2. Programas de formação continuada

E bom lembrar que não devemos reinventar a roda. Muito já foi e está sendo feito desde a década de 1970 na tentativa de melhorar o ensino de ciências através de programas prioritários de formação continuada para professores. A Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) tem um programa de oficinas regionais para professores, e muitas universidades oferecem cursos de educação continuada, formulando programas através de diversos editais do MEC. Os Centros de Ciência da década de 1960 – Cecierj (RJ), Cecine (PE), Cecisp (SP), dentre outros – foram criados para atender à formação continuada do professor. Na década de 1970, a produção

**As novas propostas devem se basear nos diagnósticos dos programas de educação continuada realizados nas últimas décadas**

de material didático de baixo custo foi fortemente incentivada e implementada através da Funbec (Fundação Brasileira de Ensino de Ciências), que desenvolveu kits experimentais de baixíssimo custo. Esse programa, mundialmente considerado de

excelência, ganhou prêmio da Unesco, mas seus efeitos em longo prazo nunca foram avaliados, e os *kits* desapareceram.

Seria importante que o desenvolvimento de novas propostas levasse em consideração qual foi o resultado dos programas de educação continuada anteriores e quais foram seus efeitos no ensino de ciências escolar das últimas décadas. Pelos resultados das avaliações nacionais e internacionais disponíveis, sabemos que poucos avanços podem ser considerados significativos. Citamos como exemplos projetos como SPEC/PADCT/Capes, Pró-Ciência, Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa, Fundação Vitae e muitos outros, organizados pelas secretarias de ensino municipais e estaduais.

**Quando o objetivo é educar, a escola deve ser o principal instrumento, mesmo quando não o único**

Uma retrospectiva dos diversos programas desenvolvidos no Brasil leva a concluir que, quando o objetivo é educar, a escola deve ser o principal veículo, mesmo quando não o único. As autoridades devem ter em mente que os programas de enriquecimento – como os oferecidos por museus, materiais extracurriculares etc. – têm papel importante como coadjuvantes, se utilizados como complementação da formação escolar, mas nunca poderão substituir o que a escola não está fazendo. Vale a pena reforçar que a forma-



ção inicial do professor é que assegura que os cursos de formação continuada para esses profissionais tenham sucesso, acrescentando que, se a licenciatura não formou bem o professor, esses cursos não poderão reparar o que deixou de ser feito em anos de formação inicial. E é isso o que se observa quando se avaliam os resultados dos cursos de formação continuada, aproveitados somente por aqueles professores que já têm uma base inicial consistente.

Sendo ainda prematuro fazer uma avaliação dos programas de mestrado profissional em ensino de física, pode-se considerar que eles oferecem uma oportunidade para a melhoria dos quadros de professores em serviço do ensino médio. Especialmente para poder formar quadros de coordenadores que multipliquem os esforços em cada escola. Espera-se também que novas tentativas e incentivos para a melhoria e educação continuada dos professores do ensino médio serão implementadas caso se materialize a nova proposta do MEC: Coordenação para a Melhoria do Ensino Médio (Capem).

Acreditamos que a contribuição dessas ações, passadas e presentes, foi importante e necessária. Mas reconhecemos que só a melhoria efetiva da formação inicial do professor, aliada à implementação de políticas educacionais corretas, poderá, em médio e longo prazo, responder pela indispensável melhoria do ensino de ciências no País. É, portanto, obrigação prioritária da universidade criar e manter programas de excelência para a formação dos professores de física em todos os níveis.

**É obrigação prioritária da universidade criar e manter programas de excelência para a formação dos professores de física em todos os níveis**

### 6.1.3. O potencial de formação de professores de física

O número de cursos de formação de professores de física – licenciatura plena e licenciatura em ciências, com habilitação em física – existentes no Brasil em 2000 totalizou 58, sendo 42 (75%) oferecidos pelas universidades públicas – federais, estaduais e municipais – e 16 (25%) pelas universidades particulares e centros universitários, faculdades isoladas e confessionais.

O total de matrículas nesses cursos foi de 5.644, sendo que 4.600 (86%) pertenciam às universidades públicas e 771 (14%) às particulares e

confessionais. Naquele ano, formaram-se 305 professores, dos quais 80% nas instituições públicas, 12% nas particulares, bem como 8% em outros centros de ensino de ciências com habilitação em física – dados obtidos da *Sinopse Estatística* (MEC), *Censo 2000* e informe INEP/MEC (2003). Esses dados indicam que a oferta real atual não poderá atender o atual déficit de

**A evasão nas licenciaturas em física é da ordem de 40%, e muitos dos formandos não se destinam efetivamente ao sistema educacional**

professores de física, que ameaça aumentar nesta década, caso a oferta efetiva de vagas para as licenciaturas em física não seja ampliada, e a eficiência de formação não seja melhorada.

É importante observar outros fatores que influenciam os dados acima descritos. A evasão nas licenciaturas em física é da ordem de 40%, e um certo número dos formandos não se destina efetivamente ao sistema educacional. Os alunos fizeram a escolha pela possibilidade de um título de 3º grau e pela oferta de cursos noturnos e gratuitos.

Uma estimativa da demanda de professores de física para a década 2001-2010, considerando a universalização obrigatória do ensino fundamental, mostra que seriam necessários 32 mil professores de física – um terço dos 95 mil novos postos – para atender o segundo segmento do ensino fundamental. Somados aos 23 mil professores previstos para o ensino médio, seriam necessários 55 mil professores para atender à demanda total. Essa cifra está muito além do potencial de formação dos cursos vigentes que, idealmente, poderiam formar cerca de 14.200 licenciados na década.

**Seriam necessários 55 mil professores para atender à demanda total na década 2001-2010; porém, os cursos vigentes, idealmente, só poderiam formar cerca de 14 mil licenciados nesse período**

Fica evidente que uma solução passa pelo aumento de vagas oferecidas nas licenciaturas das universidades públicas, que atualmente formam a maioria dos professores. O ensino particular tem contribuição pequena, e os cursos de licenciatura oferecidos estão diminuindo.

Novos cursos de licenciatura em física na modalidade de ensino a distância têm sido criados, como o oferecido pelo Cederj (Coordenação de Ensino a Distância do Rio de Janeiro), mas seu potencial quantitativo é ainda pequeno. Outra opção que parece ser a de maior fôlego é a habilitação para o ensino de física dos profissionais de áreas afins, engenheiros, químicos, matemáticos etc., nos cursos que oferecem o curso de ensino superior de

complementação pedagógica.

Os cursos de pós-graduação *lato sensu* têm alta procura, e as estatísticas mostram que boa parte da demanda poderá vir a ser preenchida

por esse profissional reciclado. É, no entanto, necessário avaliar o efeito desse tipo de formação acadêmica na qualidade do ensino de física no ensino médio. Um fato positivo desse grupo é a motivação pela carreira, pois muitos dos licenciados formados nos cursos regulares destinam-se a outras carreiras que não o magistério, aumentando a ineficiência do sistema.

Outra opção que parece ser a de maior fôlego é a habilitação para o ensino de física dos profissionais de áreas afins, engenheiros, químicos, matemáticos etc.

## 6.2. ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA

Projetos Nacionais de mobilização para a melhoria da educação em ciências devem se pautar por critérios que assegurem a eficiência do ensino nas escolas. Esses critérios devem abranger três componentes totalmente integrados:

i) conscientização da necessidade do ensino de ciências (física) nas escolas para a formação de cidadãos integrados na sociedade científico-tecnológica deste século.

Isso se traduzirá em ações:

- de responsabilidade do Estado:
    - apoio à unidade escolar – infra-estrutura material e pessoal (número de aulas, estrutura de laboratório didático, de computação etc.);
  - de responsabilidade do Estado e da comunidade científica:
    - propostas curriculares que traduzam essa necessidade.
- ii) projetos de educação continuada para os professores de física devem enfatizar:
- a física do século passado;
  - os métodos da física: experimental, matemático e computacional;
  - integração conceitual epistemológica dos conteúdos;
  - a compreensão de como as crianças e adolescentes constroem seus conhecimentos;
  - o papel da linguagem no ensino;
  - o papel da interação interpessoal no ensino;

Isto se traduzirá em ações:

- de responsabilidade da comunidade científica:

- planejar e executar cursos; acompanhar e avaliar os cursos;
- de responsabilidade de estado:
  - estimular e financiar os cursos de educação continuada;
- iii) elaboração de material instrucional (livro-texto, *kits* de laboratório, *software*, vídeos etc.) que reflitam as diretrizes da formação de professores.

Isso se traduzirá em ações:

- da comunidade científica
  - planejamento do material instrucional;
- da sociedade (empresas, laboratórios e produtoras)
  - produção material
- do Estado:
  - Distribuição para as redes públicas.

### 6.3. DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E O ENSINO FORMAL DA CIÊNCIA

O ensino de ciências e matemática no Brasil, como vem sendo mostrado ao longo de décadas por sucessivas pesquisas, exige mudança de paradigma da escola fundamental e da universidade. A solução passa por uma política educacional que assegure um ensino formal de qualidade para todos. Porém, é hoje admitida a necessidade de complementação da educação através de ações de caráter informal.

Reconhece-se que a divulgação científica pode contribuir para a cultura de todos aqueles que se encontram ou já passaram pelos bancos escolares de modo que possam enxergar o estudo da natureza sem mistérios

de todos aqueles que se encontram ou já passaram pelos bancos escolares de modo que possam enxergar o estudo da natureza sem mistérios

Reconhece-se que a divulgação científica pode contribuir para a cultura de todos aqueles que se encontram ou já passaram pelos bancos escolares de modo que possam enxergar o estudo da natureza sem mistérios

É obvio que a divulgação científica depende da comunicação, e esta das diversas mídias utilizadas para efetivá-las. Desse modo, se faz necessário repensar a forma como essa divulgação é feita. Para que a divulgação cien-

tífica interaja de forma efetiva com a base escolarizada, sua eficiência será decorrente das formas em que seja oferecida e do engajamento da escola, que deve mostrar através de diagnósticos preliminares quais são suas necessidades culturais, para melhor utilizar a oferta.

A divulgação científica, não estando limitada a ser desenvolvida prioritariamente num único espaço, fornece um amplo espectro de enfoques, com ações de caráter multidisciplinar desenvolvidas nos museus, centros de ciência, teatros e cinema, atividades de extensão universitárias, mostras de arte, música, dança e literatura, contadores de história etc., que complementam e enriquecem o universo escolarizado.

É obvio que a divulgação científica depende da comunicação, e esta das diversas mídias utilizadas para efetivá-las; desse modo, se faz necessário repensar a forma como essa divulgação é feita



### 6.3.1. Quadro brasileiro

A atuação no País desses centros difusores é bem conhecida e tem sido, a partir da década dos 1990, implementada por ações governamentais de forma consistente. Mas, no Brasil, é necessário que o âmbito de atuação se amplie de forma estruturada, de modo que esses centros atinjam com eficiência a grande maioria excluída: a rede escolar pública.

Dada a enorme penetração da televisão nos lares brasileiros – segundo o IBGE, 97% têm um ou mais aparelhos – e nas escolas, é importante buscar linguagens e dar

No Brasil, os centros difusores de ciência estão mais concentrados em 12 estados, liderados por SP, RJ e RS

prioridade a materiais especialmente desenvolvidos para essa mídia, que alcança as maiores audiências. Devem-se ocupar espaços hoje invadidos por diversas formas de ‘culturas alienígenas’ ou mesmo por formas de expressão dificilmente reconhecíveis como ‘culturais’. Nada contribui para as cabeças em formação dos nossos alunos a apresentação de programas totalmente irrelevantes que apresentam violência e baixíssimo nível etc., mas que chegam a manter milhões de espectadores, em média, ao longo de meses.



Programas diretamente dedicados à difusão cultural – como os canais culturais televisivos Cultura, Rede Brasil, Futura, Discovery, National Geographic Channel, entre outros, cujos programas têm uma filosofia educacional bem definida – têm em geral níveis de audiência reduzidos. Muito ainda pode ser falado em relação às ofertas pela Internet que, junto a materiais de altíssima qualidade, apresentam o ‘lixo’ habitual, tão perigoso para as nossas crianças.

A contribuição dessas ações difusoras da ciência para os leigos vem sendo incentivada, como é o caso de programas organizados em diversas cidades e realizados pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC), com conferências de especialistas oferecidas em horários apropriados. Mas temos que reconhecer que o público beneficiado pertence a setores já aculturados.

**É importante que a divulgação científica seja integrada de forma sistemática à vida escolar, evitando que se perca através de iniciativas pontuais**

Para os alunos em idade escolar, é

necessário que as ações desenvolvidas sejam integradas de forma mais sistemática à vida escolar e incorporadas às estratégias utilizadas pelos professores, evitando que se percam como iniciativas interessantes porém pontuais, que geralmente favorecem os já mais favorecidos.

É necessário que os resultados de pesquisas já realizadas no País e que fornecem informações interessantes sobre a interação público-museu sejam utilizadas de forma a dar maior eficiência à divulgação científica. Sua contribuição deve incentivar ações que melhorem a utilidade das visitas e o uso das instalações atuais. Caso contrário, o sistema da rede escolar pública continuará sendo a única mídia possível.

**Estudos mostram que quem frequenta museus e espetáculos culturais são os já iniciados no universo da cultura**

As políticas educacionais deverão considerar financiamento apropriado para a criação de espaços mais informais dentro da escola que

ofereçam, com periodicidade razoável, filmes e vídeos, teatro e música. As salas de aula e bibliotecas devem estar equipadas para permitir o uso de programas de vídeo selecionados pelos professores para complementação dos conteúdos, de forma a ampliar a sua percepção cultural/social e motivar os alunos na compreensão da ciência que está sendo ensinada.

Hoje, já temos no Brasil ofertas de divulgação científica variadas e de boa qualidade – nesse universo, para citar apenas um exemplo, vale destacar a contribuição dada à divulgação científica por duas publicações ligadas à SBPC e agora publicadas pelo Instituto Ciência Hoje: as revistas *Ciência Hoje*, lançada ainda em 1982 e para a qual já escreveram mais de 2 mil pesquisadores brasileiros e estrangeiros, e *Ciência Hoje das Crianças*, que chega mensalmente a 60 mil escolas da rede pública de ensino no Brasil. Os museus e espaços de ciência e de arte estão cada vez mais voltados para públicos escolares. Mas é necessário compreender que, para motivar, é preciso mais do que divertir. É, portanto, necessário que a maioria dos alunos tenha possibilidade de visitas mais frequentes, de modo a deixar um lastro permanente. Somente assim poderemos falar de uma cultura científica para todos: oferta, por parte dos grupos habilitados para isso, e demanda, por parte de públicos interessados.

**É necessário que a maioria do público escolar possa ser exposta com maior frequência à cultura gerada pela divulgação científica; só assim poderemos falar em cultura científica para todos**

