

# FÍSICA 2011

ESTADO DA ARTE, DESAFIOS  
E PERSPECTIVAS  
PARA OS PRÓXIMOS CINCO ANOS



1ª EDIÇÃO  
São Paulo, 2011



# FÍSICA 2011

ESTADO DA ARTE, DESAFIOS  
E PERSPECTIVAS  
PARA OS PRÓXIMOS CINCO ANOS

Organização:  
Salvador Nogueira  
Thiago Romero



1ª EDIÇÃO  
São Paulo, 2011

Copyright © 2011 pela Sociedade Brasileira de Física

**EDITORA EXECUTIVA**  
Christiane G. Corrêa

**ORGANIZAÇÃO**  
Salvador Nogueira  
Thiago Romero

**DIAGRAMAÇÃO**  
Luiz A. Silva

**CAPA**  
Salvador Nogueira

**PRODUÇÃO EDITORIAL**  
Chris McHilliard Editora Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

---

---

Todos os direitos reservados à  
Chris McHilliard Editora Ltda.  
Rua Mandissununga 195  
05619-010 - São Paulo - SP  
(11) 3744.6141  
chris@mchilliard.com.br

# Sociedade Brasileira de Física

## Diretoria

### **Presidente**

Celso Pinto de Melo

### **Vice-Presidente**

Ronald Cintra Shellard

### **Secretário Geral**

Gastão Inácio Krein

### **Secretário**

Marcus Aloizio Martinez de Aguiar

### **Tesoureira**

Rita Maria Cunha de Almeida

### **Secretário para Assuntos de Ensino**

Nilson Marcos Dias Garcia

---

## Conselho

### **Titulares (mandato 2007 - 2011)**

Adalberto Fazzio  
José Abdalla Helayël Neto  
Maria Carolina Nemes  
Silvio Paolo Sorella  
Oscar Nassif de Mesquita

### **Titulares (mandato 2009 - 2013)**

Luiz Davidovich  
Silvio Roberto de Azevedo Salinas  
Alaor Silvério Chaves  
Maria Emília Xavier Guimarães  
Sylvio Roberto Accioly Canuto

### **Suplentes (mandato 2009 - 2011)**

Paulo Murilo Castro de Oliveira  
Carlos Henrique de Brito Cruz  
José David Manguera Viana  
Marcelo Knobel  
Marília Junqueira Caldas



## Comissões de Área

### **Física Atômica e Molecular**

Coord.: Sylvio R. A. Canuto  
José R. Mohallem  
José D. M. Viana  
Carlos E. Fellows  
Maria C. A. Lopes

### **Física Biológica**

Coord.: Amando S. Ito  
Oscar N. de Mesquita  
Maria T. M. Lamy  
João R. Neto  
Marcelo L. Martins

### **Física Médica**

Coord.: Oswaldo B. Filho  
Denise M. Zzell  
Paulo R. Costa  
Ana M. M. da Silva  
Marcelo B. de Freitas

### **Ótica e Fotônica**

Coord.: Jaime Frejlich  
Sandra Vianna  
Luiz Davidovich  
Antônio Z. Khoury  
Niklaus U. Wetter

### **Física Estatística, Computacional e Modelagem**

Coord.: Constantino Tsallis  
Ronald Dickman  
Rita M. C. de Almeida  
Francisco Alcaraz  
João A. Plascak  
Wagner Figueiredo

### **Física Nuclear e Aplicações**

Alinka Lépine-Szily: Coord.  
Carlos R. Appoloni  
Alexandre A. dos P. Suaide  
Brett V. Carlson  
Paulo R. S. Gomes

### **Pesquisa em Ensino de Física**

Anna M. P. de Carvalho: Coord.  
Roberto Nardi  
Deise M. Vianna  
Maria J. P. M. de Almeida  
Laércio Ferracioli

### **Física de Plasmas**

Iberê L. Caldas: Coord.  
Maria V. Alves  
Marisa Roberto  
Munemasa Machida  
Edson del Bosco

### **Física de Partículas e Campos**

Ioav Waga: Coord.  
João R. T. de M. Neto  
Orlando L. G. Peres  
Saulo C. de S. Silva  
Dionisio B. Filho

### **Física da Matéria Condensada e de Materiais**

Antônio G. de S. Filho: Coord.  
Marcos A. Pimenta  
Raimundo R. dos Santos  
Eduardo Miranda  
Antônio Azevedo





# Sumário

<i>Apresentação</i> .....	11
<i>Física Atômica e Molecular</i> .....	15
<i>Física Biológica</i> .....	33
<i>Física Estatística, Computacional e Modelagem</i> .....	47
<i>Física da Matéria Condensada e de Materiais</i> .....	61
<i>Física Médica</i> .....	83
<i>Física Nuclear e Aplicações</i> .....	99
<i>Pesquisa em Ensino de Física</i> .....	115
<i>Ótica e Fotônica</i> .....	127
<i>Física de Plasmas</i> .....	135
<i>Física de Partículas e Campos</i> .....	155
<i>Contatos</i> .....	175



# Apresentação

**A Sociedade Brasileira de Física** tradicionalmente se preocupa com a avaliação periódica dos rumos da disciplina no país, ciente que está de que são os próprios pesquisadores que precisam dar referências ao poder público de onde sua atuação é mais necessária e mostrar as formas em que pode ser mais frutífera. Mas em anos recentes a Diretoria da SBF decidiu acentuar ainda mais sua atuação nesse sentido, encurtando os períodos de avaliação de dez para aproximadamente cinco anos. O último trabalho nesse sentido foi Física no Brasil, publicado em 2005 e disponível em formato eletrônico no site da SBF ([www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br)). O presente trabalho é o mais recente nessa série de avaliações e perspectivas das diversas áreas da Física no país. Elaborado por mais de 50 cientistas em dez comissões de área, ele representa o que há de consensual nesses ramos da Física. Outros temas importantes, como, por exemplo, a regulamentação da profissão de físico, sua formação, tanto na graduação quanto na pós-graduação, as questões sobre a infraestrutura de pesquisa, a política nuclear, a política espacial, que são alvo de outras ações por parte da SBF, não estão abordadas neste documento.

Ao sintetizar as convicções da comunidade, este relatório se torna um instrumento precioso para os responsáveis pelo planejamento dos investimentos em Ciência, Tecnologia e Inovação, tanto em nível federal como dos estados e municípios. Para cada uma das áreas, há um sumário executivo, que contém as informações mais importantes de cada segmento, para permitir uma leitura mais fácil e atenta dos conteúdos. Mas tão importante quanto ele é a última seção de cada capítulo, que contém as recomendações para os próximos cinco anos, de forma a tornar cada uma das áreas da física brasileira mais forte e competitiva no cenário internacional.

Muitas dessas recomendações, há de se notar, permeiam praticamente todas as áreas. Um exemplo claro se manifesta na dificuldade clara em descentralizar as pesquisas pelo território nacional. Apesar dos grandes esforços feitos pelo governo federal em anos recentes, com a criação de novas universidades e a contratação maciça de pesquisadores, ainda se verifica uma centralização muito grande do poder de realização científica nas regiões Sul e Sudeste, sobretudo quando nos ramos experimentais. É algo que precisa continuar a ser atacado com vigor pelo governo, de forma a democratizar a produção científica no Brasil.

Há também aqueles diagnósticos que são particulares de cada uma das áreas e que, ainda que pontuais, são de grande relevância para que se possa desenvolvê-la a contento nos anos vindouros.

Por isso, a recomendação principal destacada neste livro para os órgãos responsáveis pelas políticas de Ciência, Tecnologia e Inovação é a de que se trate com igual atenção as generalidades e as particularidades de cada área da física, atentando aos desafios científicos que são abordados, pois são eles os portadores dos avanços que mais tarde se traduzem em benefícios para a sociedade.

É importante notar, contudo, que este documento não tem como único fim ilustrar os tomadores de decisão sobre os rumos da física brasileira. Escrito numa linguagem de fácil compreensão, mas sem perda do rigor científico, ele está voltado também a alunos do Ensino Médio que podem se confrontar com o desejo de cursar Física e não sabem que rumos sua carreira poderá tomar.

Da mesma maneira, ele será útil a quem já está na universidade e deseja investigar onde há mais oportunidades de pesquisa e emprego. Por isso, cada capítulo conta com seções específicas delineando o estado da arte de cada área, explicitando quais desafios e perspectivas se encontram no futuro próximo e detalhando qual é a posição do Brasil nesse cenário.

Por fim, mas não menos importante, este documento serve para registrar a importância que cada área da Física tem para a sociedade, e por isso mesmo é assunto que deixa de ser de interesse exclusivo da academia e dos órgãos de fomento e passa a ser um exercício de cidadania.

Embora o presente trabalho das comissões da área que elaboraram os relatórios esteja terminado, é importante salientar que esse é só o início de um esforço ainda maior, voltado para delinear o que a Diretoria da Sociedade Brasileira de Física está chamando de projeto “A Física em 2022”, do qual este livro é apenas um capítulo introdutório, no sentido de incentivar a cultura de auto-avaliação dentro da comunidade.

Por isso também houve esforço máximo para que este trabalho estivesse disponível a tempo do Encontro de Física 2011, que reunirá pesquisadores de todas as áreas e consistirá em excelente oportunidade para que este relatório seja discutido em detalhes e que, de sua reflexão, surjam novas ideias e perspectivas para tornar a física ainda mais forte em nosso país.

Agradecemos à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/MCT) que apoiou a realização deste estudo através do projeto “Mapeamento da Inserção da Comunidade de Físicos Brasileiros em Atividades Inovativas”.

**Celso Pinto de Melo**

Presidente da SBF

**Salvador Nogueira**

Organizador do volume



# Física Atômica e Molecular

*Sylvio Roberto Accioly Canuto*

*José Rachid Mohallem*

*José David Manguiera Viana*

*Carlos Eduardo Fellows*

*Maria Cristina Andreolli Lopes*

## Sumário Executivo

A Física Atômica e Molecular compreende uma série de fenômenos que envolvem átomos e moléculas e, por isso mesmo, se coloca numa região naturalmente fronteira com a Química.

Desenvolvida principalmente a partir da primeira metade do século 20, quando as teorias atômicas começaram a desvendar segredos como a compreensão do espectro de emissão do átomo de hidrogênio, a área teve avanços de notória expressão nos últimos anos, como a espectroscopia de femtosegundo, que permitiu analisar reações químicas na escala de tempo dos núcleos, e a obtenção dos condensados de Bose-Einstein, revelando as propriedades quânticas coletivas que os átomos podem assumir. Ambos motivaram a concessão de Prêmios Nobel, em 1999 e em 2001.

No Brasil, nota-se um fortalecimento recente da área e uma maior inserção internacional, o que se deve em parte a um saudável rejuvenescimento dos pesquisadores, em razão das contratações realizadas nas universidades brasileiras nos últimos cinco anos. É uma das áreas que vê melhor distribuição de pesquisadores pelo território nacional: apenas cinco estados da federação não apresentam grupos de pesquisa, e mesmo esses já começam a manifestar interesse no tema.

Contudo, um problema ainda a ser superado é a falta de um maior desenvolvimento multidisciplinar dos grupos de pesquisa, uma vez que a Física Atômica e Molecular tem muitas interfaces com outras áreas do co-

nhcimento, além de uma tendência ligeiramente maior que a desejada de opção dos pesquisadores pela área teórica, em detrimento da experimental (provavelmente pela maior dificuldade, em termos financeiros, de executar experimentos).

Esses grupos estão todos concentrados nas universidades, e a falta de contato com a indústria brasileira ainda é um grande entrave para o desenvolvimento de inovações tecnológicas, embora a Física Atômica e Molecular seja uma das áreas mais fecundas nesse sentido, com potencial impacto no desenvolvimento de fármacos, nanotecnologia e biocombustíveis. Também há uma carência instrumental, sobretudo fora da região Sudeste, e há dificuldades na importação de equipamentos e insumos, o que dificulta o andamento dos trabalhos.

## **Estado da Arte**

Área fundamental da física moderna, a Física Atômica e Molecular colocou em pauta, no final do século 19, a importante questão da compreensão do espectro de emissão do átomo de hidrogênio, em particular a série de Balmer, que consiste em emissões de radiação eletromagnética localizadas na parte visível do espectro.

O problema foi parcialmente resolvido na primeira metade do século 20, por Niels Bohr, durante o desenvolvimento da mecânica quântica e, posteriormente, ocorreu o primeiro teste de aplicação da nova mecânica quântica representada pela equação de Schrödinger.

Embora a explicação de Bohr possa ser considerada incompleta, alguns postulados se mostraram perenes e fundamentais. Certamente esse é o caso da relação entre a diferença de energia entre dois níveis e o comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida ou absorvida, o que se caracteriza como a essência da espectroscopia.

Os conhecimentos adquiridos nesse período serviram de base para a aceitação da equação de Schrödinger e ajudaram a valorizar a área de espectroscopia atômica. Naturalmente, essas preocupações foram ampliadas para sistemas moleculares, que são mais ricos espectroscopicamente, pois,



além de eletronicamente serem mais complexos, incluem também espectroscopia rotacional (na região de microondas) e espectroscopia vibracional (na região do infravermelho). Importantes estudos experimentais realizados na área correlata de química ajudaram a ampliação da área nessa direção. A multidisciplinaridade é uma característica muito importante da Física Atômica e Molecular: sistemas moleculares são hoje de interesse também em Química, Bioquímica e Farmácia, sendo que, de forma correlata, sistemas atômicos também são o foco de interesse em ótica quântica, átomos frios, antimatéria e condensados de Bose-Einstein.

O desenvolvimento da área de Física Atômica e Molecular é fortemente dependente e influenciado por avanços na parte experimental e na parte computacional. Uma vertente teórica significativa envolve a solução aproximada da equação de Schrödinger para sistemas cada vez mais complexos.

No início houve uma forte relação entre essa área e a Física Nuclear: um exemplo é o modelo de camadas (shell model) que, de modo semelhante ao modelo de configuração dos elétrons em um átomo ou molécula, determina como os prótons e nêutrons se arranjam em um núcleo. Outros importantes conceitos, métodos e teoremas também foram compartilhados como, por exemplo, o Teorema de linked cluster de Brueckner e Goldstone, considerada a base das teorias perturbativas utilizadas constantemente para átomos e moléculas.

Diante da dificuldade em se resolver a equação de Schrödinger para sistemas realistas, o desenvolvimento de códigos computacionais tem sido uma preocupação constante. Foi em meados dos anos de 1960 que importantes avanços em algoritmos e técnicas, aliados a um crescente – e posteriormente revolucionário – desenvolvimento de recursos computacionais, tanto em hardware quanto em software, levaram a uma área teórica intermediária entre a Física e Química, chamada de Química Quântica.

No Brasil essa área começou no início da década de 70 com iniciativas pioneiras em cidades como Rio de Janeiro, São Paulo, Belo Horizonte, Recife e Brasília, embora tenha apresentado um desenvolvimento mais expressivo a partir dos anos 80. Uma marca da presença e desenvolvimento dessa área temática no país tem sido o Simpósio Brasileiro de Química

Teórica, realizado bianualmente desde 1981 e que congrega cerca de 400 participantes, sendo 350 brasileiros.

Outra iniciativa foi a Escola Brasileira de Estrutura Eletrônica, criada em 1987, que tem contribuído principalmente com a formação e motivação de novos pesquisadores na área. Outros eventos científicos que ocorrem no Brasil e também já estão consolidados são o Workshop em Física Molecular e Espectroscopia, a Escola de Modelagem Molecular de Sistemas Biológicos e o Simpósio de Estrutura Eletrônica e Dinâmica Molecular.

O marcante desenvolvimento da química quântica e da área de estrutura eletrônica de materiais levou ao Prêmio Nobel de Química compartilhado entre John Pople e Walter Kohn, em 1998.

A inevitável aproximação da Física Atômica e Molecular com a Química e a Bioquímica tem levado a outras preocupações que se refletem no amplo desenvolvimento recente de simulações computacionais. Isso serve também como aproximação da área com outra muito ativa no Brasil: a Física Estatística, que tem permitido o estudo de átomos e moléculas interagindo com um meio líquido. Líquidos têm sido considerados em amplas condições termodinâmicas, desde temperaturas muito baixas até condições supercríticas.

Nesse último caso nota-se uma priorização de água supercrítica e também de dióxido de carbono, que em condições supercríticas é muito usado na indústria. Essa é uma área com importante participação brasileira, tanto de físicos como de químicos e bioquímicos teóricos, que tende a crescer vigorosamente nos próximos anos.

Internacionalmente, cresce também a aplicação e o desenvolvimento desses métodos para estudos tanto de espectroscopia e reatividade molecular como de estruturas de biomoléculas.

A área de estrutura de proteínas e reações em enzimas tem crescido bastante e, mais recentemente, os estudos de lipídeos, membranas e carboidratos também têm merecido atenção. Importantes grupos tanto na Física e na Química como na Biologia na área de simulações com aplicações biológicas se encontram em Recife, Vitória, São Carlos, Campinas, São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre.

Estudos com ênfase nos aspectos quânticos, mesmo de sistemas biomoleculares, são amplamente difundidos no Brasil envolvendo grupos em quase todas as grandes universidades e regiões do país.

A parte experimental da área tem crescido e participado de importantes desenvolvimentos recentes como a produção de átomos frios, condensados de Bose-Einstein e também a espectroscopia tradicional realizada em condições singulares oferecidas pelo Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

Em grande aproximação com a Ótica, notam-se importantes desenvolvimentos dessa área em Recife, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Campinas, São Carlos e São Paulo. A participação experimental na área tem mostrado competência para acompanhar e avançar os importantes desenvolvimentos internacionais. O número de participantes experimentais no Brasil ainda está abaixo da média desejável (que tende a ser em torno de 60%) quando comparado aos países mais avançados cientificamente, embora tenha crescido bastante em qualidade e diversidade nas últimas décadas. Por ser uma área fortemente influenciada pelo desenvolvimento experimental, é evidente que há uma necessidade maior de fortalecer grupos experimentais.

Alguns experimentos recentes, como a espectroscopia de femtosegundo (que deu o Prêmio Nobel de Química a Ahmed Zewail em 1999) e a obtenção, em 1995, 70 anos após sua previsão, dos condensados de Bose-Einstein (que deu o Prêmio Nobel de Física a Eric Cornell, Carl Wieman e Wolfgang Ketterle em 2001) usando gás atômico de  $^{87}\text{Rb}$ , são dois exemplos dignos de menção.

Um permite analisar reações químicas na escala de tempo dos núcleos e o outro mostra uma relação muito detalhada de sistemas atômicos agindo quanticamente numa escala grande e em temperaturas da ordem de nanokelvin. A obtenção do condensado é um exemplo do desenvolvimento de técnicas experimentais de alto nível, o que nesse caso envolve resfriamento por laser e por evaporação (laser cooling e evaporative cooling). Quatro anos antes, em 1997, Steven Chu, C. Cohen-Tannoudji e William Phillips ganharam o Prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento de métodos para resfriar átomos usando luz de laser. Manipulação quântica de átomos é uma área muito ativa no país com diversos grupos atuantes.

Sistemas atômicos e moleculares são importantes também em informação e ótica quânticas, sendo que existe também um esforço intenso na busca pela antimatéria em forma atômica e molecular.

Devemos mencionar ainda o desenvolvimento de técnicas instrumentais que ocorre em paralelo ao desenvolvimento para a obtenção de novos resultados. Os primeiros espectrômetros para esta finalidade foram construídos no início da década de 70.

A partir de então, várias experiências foram introduzidas pela primeira vez no Brasil, quando se criou a tradição em várias subáreas da Física Atômica e Molecular, devido ao custo e versatilidade proporcionada para estudos de fenômenos físicos de interesse. Essa tradição teve continuidade pelos grupos que se formaram a partir dos laboratórios pioneiros e sua evolução, em parte, coincide com o desenvolvimento mundial da área.

Nos primeiros espectrômetros construídos, constatou-se que uma melhor resolução espectroscópica era conseguida utilizando uma ótica de partículas carregadas e em condições de alto vácuo, livre de impurezas. Houve também destacados avanços computacionais com a disseminação dos computadores pessoais, que levou ao surgimento dos primeiros *softwares*.

Eles possibilitaram aos laboratórios cálculos de propriedades de lentes eletrostáticas para o eficiente transporte, aceleração e desaceleração de partículas carregadas através de seus espectrômetros. Aparelhos mais sofisticados e eficazes começaram a ser construídos, levando a um considerável avanço na área, incentivando até mesmo a comunidade mundial a revisitar uma variedade de estudos de colisão de partículas.

Atualmente, os estudos experimentais realizados no Brasil usam técnicas de espectroscopia por absorção de luz ou espalhamento envolvendo espectroscopia por perda de energia de elétrons, incluindo espectroscopia fotoeletrônica, que são realizados por grupos no Rio de Janeiro, Juiz de Fora, Campinas, Brasília e Niterói. Entre os diversos processos de colisão estudados estão a fragmentação e também a formação de agregados de íons, que também estão envolvidos nos estudos de física de superfície e espectrometria de massa.

Adicionalmente, estuda-se a física de colisões atômicas com íons pesados e a ionização de elétrons em camadas internas, além de obtenção de seções de choque para perda e captura de elétrons, multi-ionizações etc.

Resultados obtidos por esses laboratórios têm se mostrado importantes e servido para uma interação saudável entre grupos teóricos e experimentais. Bons exemplos têm sido encontrados pelos grupos que estudam espalhamento de luz, elétrons e pósitrons em Curitiba, São Carlos, Campinas, Brasília, Rio de Janeiro, Florianópolis, Belo Horizonte, São José dos Campos e Salvador. Para os próximos anos espera-se o desenvolvimento ainda maior dessas subáreas mencionadas e é possível notar uma crescente preocupação com o estudo de sistemas moleculares em estados excitados.

## **Desafios e Perspectivas**

Ao analisarmos o desenvolvimento da área nos últimos cinco anos, nota-se um forte amadurecimento recente da área e uma maior inserção internacional. Isso se nota também com a participação de vários pesquisadores em comitês científicos, corpo editorial de revistas internacionais e participação em conferências internacionais.

Isso tem sido acompanhado por um saudável rejuvenescimento dos pesquisadores, o que se deve em parte às contratações realizadas nas universidades brasileiras nos últimos anos. Como consequência, tem sido possível uma maior ousadia e participação em projetos de grande relevância. Existem vários estudos relacionados com outras áreas do conhecimento, como Ótica, Física Estatística, Ciência dos Materiais, Química, Bioquímica, Farmácia, Astrofísica e Cosmologia.

Relevantes problemas em aberto são encontrados, sendo desafios importantes a compreensão da reatividade de biomoléculas, dinâmica de estados excitados, estudos de marcadores biológicos, desenvolvimento e design de novas drogas medicamentosas, desenvolvimento de sensores em várias fases da matéria, compreensão de átomos e moléculas exóticas, etc. Existem também esforços para o estudo de caos em física atômica e molecular.

Além disso, recentemente foi anunciada a detecção de núcleos de anti- ${}^4\text{He}$ , a anti-partícula mais pesada já detectada, o que pode levar a estudos teóricos e experimentais de moléculas altamente exóticas e formadas de antimatéria. O “desaparecimento” da antimatéria no Universo é um enigma fascinante da cosmologia que está em permanente discussão. A produção de antimatéria em programas como o ATHENA-CERN ocorre em nível atômico, anti-hidrogênio, visando testar o Teorema CPT.

A existência da “molécula” hidrogênio-anti-hidrogênio é constantemente especulada. Outros sistemas exóticos como as moléculas muônicas e positrônicas estabelecem uma ponte entre a Física Atômica e Molecular, a Física Nuclear e a Física de Partículas. Uma importante fonte de informações em Astrofísica são espectros de alta resolução de moléculas particulares.

Na área de radioastronomia, a identificação de novas espécies moleculares no espaço interestelar é feita através da análise do espectro rotacional.

Deve ser ressaltado que existe a participação brasileira na maioria desses temas relevantes, mas espera-se um maior desenvolvimento multidisciplinar, uma das mais importantes características dessa área. Para a abordagem teórica desses temas certamente será necessário o desenvolvimento de recursos computacionais, além de novas metodologias e algoritmos.

Com a crescente necessidade de se estudar sistemas moleculares cada vez maiores, espera-se que métodos semi-empíricos continuem sendo de importância. A espectroscopia de porfirinas, clorofilas e ftalocianinas deve se tornar ainda mais importante diante da crescente pressão pelo entendimento dos processos moleculares do meio ambiente. Assim, é também possível o aumento de estudos de moléculas relacionadas a diversos aspectos do meio ambiente, incluindo os processos físico-químicos do aquecimento global e dos ciclos do dióxido de carbono e do oxigênio.

Do lado experimental esperam-se desenvolvimentos importantes na área de espectroscopia de absorção multifotônica, o que será um interessante desafio para os estudos teóricos. Adicionalmente, os estudos de cinética de reações, resfriamento e aprisionamento de átomos, sistemas diluídos e espectroscopia de átomos frios continuam ativos.

## Brasil na Área

A pesquisa em Física Atômica e Molecular no país ocorre essencialmente nas universidades e está disseminada em todas as regiões. Apenas cinco estados da federação não apresentam grupos de pesquisa nessa área, mas alguns já mostram interesse no tema.

Diversos pesquisadores são cadastrados em mais de uma área e de fato trabalham em diferentes áreas, como Ótica, Física da Matéria Condensada, Física Estatística e Computacional. Por outro lado, a análise dos diretórios de grupos do CNPq mostrou a inexistência de alguns grupos importantes e conhecidos. Assim a distribuição de pesquisadores da área será feita aqui apenas de forma percentual, comparando as diferentes regiões do país. Esses números foram obtidos através de uma análise adicional dos pesquisadores cadastrados pela SBF na área e pelas participações em algumas das mais importantes reuniões do país.

Um aspecto interessante é que a participação da região Centro-Oeste é semelhante à participação da região Sul do país, mais tradicional como centro de pesquisas. Esse fato decorre da concentração conhecida de pesquisadores na região de Brasília, um conhecido pólo na área. A região Norte mostra uma baixa densidade, mas que não é característica da área, sendo notada também nas outras áreas de Física.

Parece que no Nordeste, por sua vez, existe uma baixa concentração relativa e, em parte, isso é normalmente nivelado quando se considera a participação de pesquisadores em departamentos de química. Mas considerando a Física Atômica e Molecular nota-se uma menor concentração de físicos na região Nordeste. Essa condição pode estar em vias de mudança com o aparecimento de novos grupos em Fortaleza (UFC), Natal (UFRN), Maceió (UFAL), Salvador (UFBA), Ilhéus (UESC) e Teresina (UFPI), esse com ênfase experimental. Novos pesquisadores da área foram recentemente contratados no campus de Marabá da UFPA e na Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), em Foz do Iguaçu, criando condições para que germinem grupos em outras localidades.

Enquanto pesquisadores teóricos se distribuem por todas as regiões do país, o mesmo não ocorre com a parte experimental.

Nesse caso, existe uma grande concentração no Sudeste, com fortes grupos no Rio de Janeiro, em Minas Gerais e em São Paulo. O Rio de Janeiro apresenta grupos nas mais importantes instituições da cidade e também em Niterói. Minas Gerais possui grupos em Juiz de Fora e São João Del Rei. Já o Estado de São Paulo é bem diversificado e envolve as principais universidades, como USP, UNICAMP e UNESP.

Também existem grupos experimentais atuantes em Florianópolis, São José dos Campos, Curitiba, Recife e João Pessoa. Vale destacar ainda a pouca ênfase que tem sido dada à consolidação das técnicas de espectroscopia ótica de alta resolução no país.

O número de laboratórios de pesquisa em Física Atômica e Molecular que usam técnicas de absorção, emissão, Raman, multifótons, espectroscopia laser em alta resolução é muito reduzido.

A formação de pesquisadores nessas áreas tem sido insuficiente. Isso é particularmente sério quando se nota que recentes descobertas e desenvolvimentos importantes ocorreram graças à espectroscopia ótica em alta resolução.

A maior disseminação de teóricos no país é interpretada como sendo consequência das dificuldades em estabelecer e manter grupos experimentais.

## **Relevância para a Sociedade**

A interação da Física Atômica e Molecular com outras áreas é uma característica marcante. Isso se deve a sistemas moleculares serem de interesse, além da Física, da Química, Biofísica, Bioquímica, Farmácia, Física Estatística, Ótica, Ciências dos Materiais, Nanotecnologia e Biotecnologia.

Outras possibilidades mais abrangentes ainda existem e, entre essas, pode-se citar a Gastronomia Molecular, onde se estudam processos químicos relacionados à preparação dos alimentos para a manutenção dos nutrientes importantes, além da Física Atmosférica, onde se estudam processos



químicos relacionados à degradação da camada atmosférica por conta da presença de poluentes.

Num momento de crescente impacto da população sobre os meios de sobrevivência e a crescente imposição social para qualidade de vida esse tema pode se tornar mais relevante.

### *Formação de Pessoal*

A formação de pessoal tem crescido regularmente e isso pode ser medido em diversas esferas, como a crescente participação nos Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada, organizados pela Sociedade Brasileira de Física. Do ponto de vista da necessidade de pessoal na área, tem havido uma formação combinada (em Física e Química Quântica) de pessoal quase em número suficiente para suprir os desafios mencionados.

Isoladamente, a formação na Física deveria crescer e ser incentivada pelo seu extraordinário aspecto multidisciplinar. Uma rápida análise dos doutorados concluídos na área de Física Atômica e Molecular mostra uma capacidade de crescimento de cerca de 50% nos próximos anos. Seria altamente salutar que aumentasse a interação com grupos de excelência no exterior, tanto no nível de doutorado quanto de pós-doutorado. A área teria também muito a contribuir para a formação de professores de ciências, disseminadores importantes do interesse científico em qualquer sociedade. Nesse sentido, é também muito importante incentivar a formação de pessoal para atividades experimentais e de instrumentação científica.

### *Desenvolvimento científico e tecnológico*

A área de Física Atômica e Molecular pode naturalmente ajudar o desenvolvimento científico e tecnológico sustentável pelo fato de se debruçar sobre sistemas moleculares vitais para a existência e preservação da vida. Além de tentar entender os mecanismos envolvidos em temas de meio ambiente, ciclos de oxigênio, proteção solar por absorção de moléculas, desenvolvimento de fármacos com possível utilização de moléculas naturais e de interesse regional, é possível o design de sistemas moleculares por encomenda.

A facilidade e os desenvolvimentos ocorridos na síntese orgânica vêm permitindo a formação de sistemas moleculares que sejam candidatos a formar novos materiais funcionais.

Essa engenharia molecular vem ocorrendo no que se intitula físico-química supramolecular, uma área essencialmente iniciada pelo Prêmio Nobel Jean-Marie Lehn (1987). As modelagens moleculares têm um papel vital nessa direção e contribuem para o design e formação de dispositivos e sensores na escala nanométrica, que se espera poder revolucionar a produção industrial nos próximos anos.

As simulações reduzem custos associados a experimentações desnecessárias e, às vezes, danosas ao ecossistema. Novas técnicas óticas têm sido utilizadas em problemas de saúde e em terapia fotodinâmica, que são motivo de grande interesse por seu potencial de aplicações em curas ou alívio de tumores. Sistemas organometálicos têm se mostrado muito promissores no tratamento de câncer. Corantes moleculares são vitais para os processos envolvidos em terapia fotodinâmica. Esse tipo de estudo requer a participação de pessoal de várias áreas além da medicina, como a física, a química e a biologia.

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron abriga importantes grupos que realizam pesquisas moleculares em diferentes níveis. Dentre essas, além de grupos que trabalham com caracterização de sistemas biológicos, há outros pesquisadores estudando espectroscopia de fotoionização de sistemas moleculares variados, incluindo fotoionização de aminoácidos. Está em planejamento o estudo de fotoionização de sistemas moleculares em fase líquida.

O Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, criado recentemente, tem como missão central o desenvolvimento de fontes renováveis de energia através do bioetanol de cana-de-açúcar, além de lidar com importantes desafios moleculares como a desconstrução do material lignocelulósico em açúcares fermentáveis para produção de etanol.

Ferramentas como hidrólise ácida, hidrólise enzimática e plasmas químicos podem ser utilizadas para essa finalidade. A escolha e aplicação da melhor estratégia exige, portanto, um conhecimento profundo de todas

as etapas de desconstrução, alicerçados pelas bases da Física Atômica e Molecular.

### *Impacto na economia*

Estudos na área de Física Atômica e Molecular podem contribuir enormemente no processo de Desenvolvimento e Inovação Tecnológica, desde os avanços conseguidos em laboratório de novas instrumentações até o design de produtos (sensores, marcadores, fármacos, cosméticos de proteção e recuperação). Só a L'Oréal investiu, em 2010, cerca de 650 milhões de euros no desenvolvimento científico associado aos seus produtos cosméticos.

O Brasil utiliza muito pouco sua capacidade já instalada nas universidades, que poderia contribuir muito mais para alavancar a inovação tecnológica. Os sistemas moleculares podem participar de tecnologia na escala nanométrica e ter forte impacto na indústria farmacêutica, de alimentos e cosmética.

A indústria farmacêutica carece de conhecimentos adicionais para o desenvolvimento de novas drogas e processos de transporte de drogas. A espectroscopia molecular tem sido largamente utilizada no estudo da concentração de poluentes nas grandes áreas urbanas por meio de métodos que possibilitam medir, de forma imediata, as variações de gases como NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e SO<sub>2</sub>.

Esse tipo de análise ambiental tem impacto indireto na economia por propiciar uma medida da qualidade do ar nos grandes centros e poder servir como parâmetro para qualidade de vida e prevenção de doenças do trato respiratório nas grandes concentrações urbanas.

Finalmente deve ser enfatizado que estudos moleculares importantes e pioneiros podem ajudar na manutenção da liderança brasileira nos projetos de energia renováveis, como os estabelecidos pela missão do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol.

## *Infraestrutura*

A parte teórica envolvida na área da Física Atômica e Molecular necessita primordialmente de bons recursos computacionais. A revolução ocorrida, tanto em hardware como em software, foi muito importante no grande desenvolvimento recente da área teórica. É fato que hoje todos os grupos atuantes têm acesso a recursos computacionais que permitem o desenvolvimento de seu trabalho.

O progresso é muito rápido e os sistemas atuais serão obsoletos ou pouco competitivos em um futuro próximo, o que torna necessário a criação de um sistema competitivo e flexível. Por essa razão, parece que a criação de clusters computacionais tem sido preferida em comparação com a antiga idéia de mainframes.

Por outro lado, considerando que as dificuldades computacionais crescem fortemente com o tamanho do sistema molecular, esses recursos mostram cedo os seus limites. Essa é uma realidade mundial e possivelmente a existência de sistemas mistos, com facilidades locais de clusters bem configurados sendo suplementadas com acesso a sistemas de computação de alto desempenho, seja uma solução a ser considerada.

No que se refere à pesquisa experimental, o Brasil conta com um bom parque de equipamentos, mas nota-se uma concentração muito grande em regiões específicas do país como no Sudeste. Seria importante a disseminação de recursos experimentais em outras regiões que, além de permitir o fortalecimento das pesquisas nessas regiões, seria também um incentivo para o surgimento de interesse na parte experimental.

Outros pontos importantes a serem ressaltados são a necessidade de manutenção de equipamentos existentes e uma melhora nas oficinas de apoio. Para maior agilidade na obtenção de resultados, seria importante também uma melhora na parte logística relacionada com os mecanismos de importação de equipamentos e insumos básicos, uma vez que as tentativas existentes de melhorar os processos de importação infelizmente não obtiveram o sucesso esperado. Condições de estabilidade na rede elétrica também podem comprometer decisivamente experimentos que devem ser conduzidos

ininterruptamente por semanas e até meses. Nesse caso, a infraestrutura que deveria ser oferecida pelas instituições de pesquisa não é tão simplesmente implantada como uma contrapartida a todos os laboratórios onde existem demandas por geradores e *no-breaks* de dezenas de kVA.

Para viabilizar pesquisas competitivas no país, uma política de implantação desta infraestrutura deve ser revista pelos órgãos de fomento.

### *Inclusão Social*

Física Atômica e Molecular está no berço da criação da Física Moderna e poderia ter uma maior participação no esclarecimento da sociedade sobre temas de extrema relevância atual. Entre os exemplos estão o funcionamento da atmosfera e seu papel na preservação e proteção do ambiente na Terra, o funcionamento de ciclos da vida, funcionamento e importância de relógios atômicos, importância e anomalias físicas e químicas da água e como isso nos afeta diretamente.

Outros pontos a serem revistos são a formação e atualização de professores e desenvolvimento de projetos científicos de laboratórios e de computação científica. É também parte do Regimento da Área a atribuição de auxiliar na organização de cursos que contribuam para a melhoria do ensino da matéria nos cursos de física e química em todo o país.

Por se tratar de uma área com múltiplas possibilidades de aplicações, ela lida com um grande potencial de gerar novos empregos no setor industrial e pode trabalhar com os importantes desafios dos Laboratórios Nacionais como o de Luz Síncrotron (LNLS) e de Bioetanol (CTBE), esse último sendo estratégico para a liderança brasileira na área de energias renováveis.

### **Recomendações**

- Maior formação interdisciplinar. Pelas características multidisciplinares da área, uma recomendação importante seria a aproximação das diferentes áreas temáticas em novos currículos de graduação e de pós-graduação. Essa, na realidade, é uma tendência mundial e, nas áreas de ciências, é essencial uma melhor formação interdisciplinar. No caso da física ressoa-se de uma melhor formação em

química e biologia (ou bioquímica). Uma maior mobilidade entre os pesquisadores destas áreas deveria ser incentivada, promovendo assim uma maior interseção entre as diferentes subáreas.

- Fortalecimento de colaborações internacionais. Há alguns anos o Brasil interrompeu o seu forte e bem sucedido programa de bolsas de doutorado no exterior. Esse programa foi muito importante na formação de nossos doutores num momento de poucos quadros atuantes no país. Deve ser acentuado, no entanto, que ele também serviu para a aproximação com fortes grupos de pesquisa no exterior. Até mesmo o incentivo para o cumprimento de programas de pós graduação, mais recentemente, parece ter diminuído. É essencial, por isso, o fortalecimento de colaborações internacionais com os grandes centros de pesquisa no mundo. Iniciativas como os convênios internacionais de cooperações entre as agências de fomento brasileiras e agências de outros países importantes deveriam ser ainda mais promovidas, inclusive envolvendo as fundações regionais de amparo à pesquisa (FAPs).
- Incentivo para formação de novos pesquisadores experimentais. Diante do atual quadro de ampla e dominante formação de pesquisadores na área teórica é fundamental o incentivo para a formação de novos pesquisadores experimentais. Isso pode ser realizado através de incentivos pelos órgãos de fomento para atividades experimentais. Uma parcela dessa responsabilidade pode também estar localizada na baixa formação científica oferecida pelos cursos de nível médio que, além de deficientes em geral, raramente incluem experimentos científicos em seus conteúdos programáticos. Deve ser dado ainda maior incentivo aos jovens para trabalhar em áreas experimentais e também atentar para os laboratórios que geralmente sofrem com a falta de manutenção, baixa renovação de material, pouca verba para material de consumo e pouca, ou quase inexistente, infraestrutura técnica.
- Criação ou preservação de uma política de apoio ininterrupto aos pesquisadores ativos cientificamente. É evidente que a prática de ciência competitiva requer disponibilidade de financiamentos sem

interrupções, além de uma política de manutenção de equipamentos. Assim, recomenda-se a criação ou preservação de uma política de apoio ininterrupto aos pesquisadores ativos cientificamente por meio de bolsas de pesquisa, fomento para pesquisa e maior possibilidade de locomoção no país ou para o exterior.

- Nucleação de grupos teóricos e experimentais nas diferentes regiões do país. Finalmente, embora existam pesquisadores ativos nessa área em todas as regiões do país, o mesmo não ocorre se o foco for colocado na parte experimental. A facilidade de equipamentos para o desenvolvimento de física teórica tem sido o incentivo para a criação de novos grupos de pesquisa em regiões menos favorecidas economicamente. Recomenda-se, portanto, a nucleação de grupos teóricos e experimentais nas regiões com menos recursos humanos em atividade científica. A formação de centros regionais fortes, com agregação de pesquisadores teóricos e experimentais, certamente poderia alavancar a área de Física Atômica e Molecular para um nível ainda maior de excelência científica e tecnológica.





# Física Biológica

*Amando Siuiti Ito*

Oscar Nassif de Mesquita

Maria Teresa Moura Lamy

João Ruggiero Neto

Marcelo Lobato Martins

## Sumário Executivo

A Física Biológica oferece uma janela de observação e análise poderosa na busca pela compreensão dos mecanismos mais íntimos do fenômeno que denominamos vida. Na divisa entre a física, a química e a biologia, é uma área naturalmente multidisciplinar.

Embora seu foco natural seja na pesquisa básica, é quase inevitável que seu desenvolvimento leve à inovação, seja com aplicações médicas, farmacológicas e biotecnológicas, seja na concepção de novos instrumentos e técnicas de pesquisa.

A área está em franca expansão no Brasil, e seu interesse cresce exponencialmente no mundo. O *Virtual Journal in Biological Physics* teve 1.249 trabalhos registrados em 2001. Oito anos depois, em 2009, já eram aproximadamente 4.800 anuais (um aumento de quase 400%). Para acompanhar esse crescimento, o Brasil precisa expandir sua infraestrutura de pesquisa. Laboratórios multiusuário de grande porte, entre os quais hoje se destaca o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas (SP), deveriam estar disponíveis em todas as regiões do Brasil. No Sudeste, onde a demanda é maior pela aglomeração de pesquisadores no pólo RJ-SP-MG, é preciso duplicar as instalações disponíveis.

No lado acadêmico, também é preciso que os cursos de graduação e pós-graduação se adaptem à realidade da Física Biológica e incorporem mais elementos de interdisciplinaridade em suas grades curriculares.

A estruturação de redes de pesquisa com profissionais de diversas áreas (física, química, biologia, medicina e ciências da computação) voltadas para a investigação científica dos problemas da Física Biológica também é extremamente desejável.

## Estado da Arte

A complexidade das ciências da vida oferece para a Física Biológica um alcance muito amplo. Os desenvolvimentos dessa área do conhecimento, que utiliza bases científicas específicas na busca de contribuições para a exploração de sistemas biológicos, podem ser teóricos ou experimentais e estar no campo das ciências básicas ou aplicadas.

A Física Biológica compreende diferentes subáreas e interage com outras disciplinas, como química, biologia, medicina, matemática, engenharias e biofísica. Usando uma abordagem eclética, a área procura explicar a função biológica em termos das estruturas moleculares e propriedades de moléculas específicas que, envolvidas em um processo biológico, podem ser identificadas usando as técnicas de análise química e bioquímica.

Um interesse comum da Física Biológica e da Biofísica é a necessidade de estabelecer descrições físicas sobre como moléculas individuais trabalham conjuntamente para produzir funções biológicas complexas e, ao mesmo tempo, fisiologicamente específicas dentro de um organismo. As estruturas moleculares e interações são determinadas usando técnicas espectroscópicas da física e da química, aliadas a simulações computacionais. A relação entre a função biológica e a estrutura molecular é investigada com o auxílio de instrumentos físicos de grande sensibilidade e técnicas capazes de monitorar as propriedades ou o movimento de grupos de moléculas e, até mesmo, mais recentemente, capazes de visualizar e manipular moléculas únicas e medir seu comportamento.

O crescente interesse pela área pode ser mensurado pelo grande número de eventos, organizados tanto pelas sociedades científicas de física de diversos países, entre as quais a *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP), como por eventos patrocinados pelas sociedades nacionais de

Biofísica e suas federações internacionais, como a *International Union of Pure and Applied Biophysics International* (IUPAB) e a *European Biophysical Societies Association* (EBSA).

Outro indicador do crescimento da área vem do *Virtual Journal in Biological Physics*, uma compilação quinzenal patrocinada pela *American Physical Society* contendo artigos publicados em mais de 60 periódicos, a maior parte publicada por sociedades científicas americanas. Os tópicos de interesse são: mecânica quântica em biomoléculas; física da água e solventes com ligação hidrogênio, biofísica de membranas; dinâmica/estática de polímeros fundamentais; enovelamento e dinâmica conformacional de proteínas; dinâmica conformacional de DNA e RNA; dinâmica de moléculas únicas; interações intermoleculares; mecânica de células; transferência de informação em sistemas biológicos; fenômenos multicelulares; redes biológicas; e desenvolvimento instrumental.

Dados recentes mostram um número crescente de artigos disponibilizados no *Virtual Journal in Biological Physics*, de 1.249 trabalhos registrados em 2001 para 2.466 em 2003, 3.036 em 2005 e chegando a cerca de 400 trabalhos por mês em 2009. Além disso, várias revistas no campo da Biofísica trazem, há muito tempo, publicações nos tópicos listados acima.

Dentre elas podemos destacar a *Biophysical Journal* (300 artigos/ano), a *European Biophysics Journal* (100 artigos/ano), a *Biophysical Chemistry* (200 artigos/ano) e a *Biopolymers* (170 artigos/ano). No Brasil, vimos muitos avanços relevantes. Nos últimos anos pesquisadores brasileiros participaram, no país e no exterior, de diversas pesquisas de destaque:

### **Estrutura e função de proteínas.**

Novos dados estruturais, originados principalmente do uso das técnicas de cristalografia de raios X, ressonância magnética nuclear e medidas de relaxação rápida, permitiram avanços nos estudos de enovelamento de proteínas. Medidas resolvidas no tempo deram informações no nível atômico e informações experimentais foram complementadas com o desenvolvimento de novos métodos computacionais para simulação de macromoléculas em diferentes ambientes.

**Exploração do genoma.**

Análise do genoma permitiu a identificação de proteínas não encontradas pelos procedimentos tradicionais de isolamento e purificação. O reconhecimento de proteínas em novas localizações e com novas funções permitiram generalizações nas relações entre estrutura e função. Terapias gênicas puderam ser propostas e testadas.

**Manipulação de partículas únicas.**

Avanços nas técnicas e métodos experimentais nos campos de microscopias ópticas, de fluorescência e de varredura permitiram a observação e manipulação de partículas e moléculas únicas, além de monitorar o comportamento de biomoléculas em diferentes ambientes celulares.

**Sistemas biológicos complexos.**

Houve grande acúmulo de informações sobre os componentes dos sistemas biológicos. Avanços metodológicos enfatizaram as análises baseadas nas inter-relações e conexões em redes, com importantes avanços na compreensão da dinâmica de células inteiras, de processos metabólicos e das funções cerebrais. Compreende-se que a função é determinada por múltiplos parâmetros e que conjuntos diferentes de parâmetros relacionam-se a diferentes funções.

**Aplicações médicas.**

Destaca-se o caráter multidisciplinar no campo das pesquisas na medicina moderna. Diversos avanços contaram com a utilização de conceitos, modelos, técnicas e procedimentos originados na física como, por exemplo, a combinação de métodos de simulação e procedimentos experimentais no desenho de drogas e no estudo de sistemas de transporte, aplicação de métodos e teorias das ciências de materiais no desenvolvimento de nanotecnologias em medicina e uso da física de partículas no desenvolvimento de métodos diagnósticos e terapêuticos.

**Desafios e Perspectivas**

Diversos problemas continuam em aberto e os pesquisadores brasileiros continuam engajados nos trabalhos. Dentre os desafios atuais destacam-se:

### **Estrutura, dinâmica e função de biomoléculas**

Esperam-se progressos, tanto teóricos como experimentais, que permitam melhor entendimento de problemas que continuam importantes, como a compreensão das relações estrutura-função e o estabelecimento de métodos gerais e eficientes para a obtenção da estrutura de proteínas a partir da sequência de aminoácidos. Espera-se uma contrapartida para o sequenciamento rápido de DNA na forma de determinações de estruturas em experimentos que representem melhoramentos em relação àqueles realizados atualmente. Melhor entendimento da dinâmica de proteínas será possível com cristalografia de raios-X resolvida no tempo, com resolução de subnanossegundos. Novos experimentos de NMR usando acoplamentos dipolares residuais (RDCs) podem juntar os domínios temporais de nanossegundos a milissegundos, em técnicas que exigem análise complexa de dados envolvendo simulações na escala atômica.

### **Deteção e manipulação de partículas únicas**

É um campo em desenvolvimento, visando à observação direta da dinâmica de biomoléculas e sistemas biomoleculares, uma vez que experimentos realizados em grande número de partículas permitem apenas a obtenção de valores médios das observáveis. A observação direta é relevante uma vez que aquelas entidades estão em ambiente caracterizado por múltiplos parâmetros e cada uma delas pode se comportar de modo particular. A microscopia de fluorescência com deteção de moléculas únicas deve permitir o estudo de flutuações no equilíbrio e fora de equilíbrio, importantes em diferentes estados estruturais. Experimentos nesses sistemas também têm impactos no campo da nanotecnologia.

### **Estudos de sistemas complexos**

Existe uma tendência de as pesquisas serem encaminhadas na direção de sistemas mais complexos, alimentados pela maior capacidade de se adquirir e processar grande volume de dados. Avanços na área de microscopia, seus limites de resolução e de técnicas de monitoramento de sondas fluorescentes permitem a observação, no espaço e no tempo, de interações entre biomoléculas dentro de células. Emergem os estudos de modelagem de interações de células dentro de tecidos e órgãos e

o desenvolvimento de teorias e modelagem das funções complexas do cérebro.

### **Física/matemática/computação e a descoberta de drogas**

A computação em biologia pode substituir experimentos dispendiosos de laboratório por modelagem mais rápida e barata. O trabalho depende de campos de forças capazes de descrever as interações interatômicas, incluindo modelos da mecânica estatística para solvatação aquosa e associação biomolecular, campos de força que tratem com precisão polarizabilidades atômicas e bons métodos globais de otimização para encontrar estruturas moleculares estáveis. Não há bons modelos para protonação e transferência de prótons em biomoléculas, que são importantes para os mecanismos de ação biológica.

É preciso também desenvolver métodos para conectar escalas de tempo e distância atômicas para as escalas em que ocorrem os processos celulares, sendo necessário o desenvolvimento de uma nova mecânica estatística para descrever o comportamento de macromoléculas na matéria que compreende os sistemas vivos.

O desenvolvimento de uma mecânica estatística para o “estado vivo”, uma matéria condensada heterogênea contendo moléculas complexas auto-organizadas por uma combinação de forças eletrostáticas e de van der Waals é uma fronteira para a ciência fundamental e é essencial para a compreensão dos fundamentos físicos do comportamento de sistemas em biologia.

### **Metodologias experimentais**

A pesquisa experimental em Física Biológica assenta-se fortemente em métodos desenvolvidos na física, entre os quais: cristalografia de raios X, espectrometria de massa, ressonância magnética nuclear, imagens por ressonância magnética, espectroscopias ópticas, métodos de manipulação de moléculas únicas baseados em pinças ópticas, métodos de separação química de alto desempenho, transformadas matemáticas, tomografia computadorizada, tomografia por emissão de pósitrons, ultrasonografia e microscopia eletrônica, microscopia de força atômica, e métodos para sequenciamento de proteínas e DNA.

### **Grandes equipamentos**

A demanda por uso de grandes equipamentos supercomputadores e de linhas de síncrotron para a pesquisa aplicada em problemas biológicos cresceu significativamente e deve continuar crescendo nos próximos anos. Novos desafios, como a pesquisa em fibras biológicas associadas a doenças degenerativas como mal de Alzheimer e de Parkinson, exigirão o desenvolvimento de métodos específicos usando radiação síncrotron.

### **Questões abertas**

A modelagem teórica que não é precedida por resultados experimentais tem pouco apoio e o fato pode ser um gargalo para o progresso no estudo de sistemas biológicos complexos, onde propriedades emergentes do sistema não são evidentes em seus componentes menores, e nem existe um corpo de princípios experimentais para servir de guia. Há grandes questões, como quais as propriedades que diferenciam o vivo do inanimado ou o saudável do doente, cujas respostas talvez exijam uma nova forma de pensar sobre células como uma rede de entidades físicas e matemáticas que, por sua vez, atuam assentados sobre mecanismos fundamentais ainda não explicitados. Células criadas sinteticamente, talvez como novas terapias, poderão ser realidade e são necessários modelos conceituais para seu projeto e execução.

## **Brasil na Área**

No último ENFMC (Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada), que teve 1.300 inscritos, houve mais de uma centena de trabalhos em sessões sobre Física Biológica e Biofísica. No *VII Iberoamerican Congress of Biophysics*, em setembro de 2009, em Búzios, foram mais de 300 participantes e 60 brasileiros estiveram na *6th International Conference on Biological Physics*, em Montevideu, no ano de 2007.

A maior parte dos pesquisadores concentra-se em São Paulo e no Rio de Janeiro, seguidos por Minas Gerais e Rio Grande do Sul. No Nordeste, Pernambuco concentra a maior parte dos pesquisadores da área, vindo a seguir Sergipe.

Grupos emergentes de pesquisadores também se estruturam em Goiás, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Paraná. A infraestrutura experimental de maior porte está em São Paulo e no Rio de Janeiro.

## **Relevância para a Sociedade**

### *Formação de Pessoal*

#### **Graduação**

A Física Biológica apresenta a peculiaridade de conter fortes traços de interação com outros campos do conhecimento, como química, biologia, matemática e ciências da computação.

Na estrutura atualmente predominante nas Instituições de Ensino Superior, a formação do pesquisador em Física Biológica ocorre em cursos de bacharelado em física e o caminho para interdisciplinaridade tem início na pós-graduação. Eventualmente, o contato precoce com outras áreas do conhecimento acontece em programas de iniciação científica, em que o desenvolvimento de um plano de trabalho pode levar o aluno à busca de informações fora de seu currículo.

Algumas iniciativas no país levaram à criação de cursos em que o conhecimento básico inicial em Física é seguido por aprofundamentos interdisciplinares próprios da área, como o curso de Física Biológica na UNESP de São José do Rio Preto, o curso de Ciências Biomoleculares no Instituto de Física de São Carlos da USP e o curso de Ciências Moleculares da USP, em São Paulo.

Outra modalidade é a graduação em Biofísica dentro de um Instituto de Biofísica, como na UFRJ. O ensino de graduação, tanto em Física como nas outras áreas correlacionadas, deve levar em consideração os novos desafios presentes, uma vez que há um número crescente de dados primários originados da biologia. As mudanças estão ocorrendo rapidamente e a combinação de habilidades necessárias para o manuseio dos dados foge dos currículos dos vários cursos da área biológica e médica. Seria desejável que aspectos daquelas ciências fossem combinados com a matemática e a informática para enfrentar a nova situação.

Por sua vez, a formação nos cursos de Física deveria trazer elementos de bioinformática para um futuro trabalho com especialistas das ciências



da computação e engenharia de *software*, na construção e manipulação de bases de dados. As características da área apontam para um currículo de graduação que vise a formação de um profissional com conteúdos iniciais das diferentes disciplinas do campo de ciências exatas e biológicas, e aprofundamento em um dos campos de maior afinidade.

### **Pós-graduação**

Diversos programas de pós-graduação no país oferecem aos alunos a possibilidade de formação em Física Biológica ou Biofísica. A ampliação no quadro de orientadores com interesse na área leva a uma ampliação das opções abertas aos alunos, dentro dos programas tradicionais de pós-graduação em Física.

Normalmente a formação dos ingressantes nesses programas ocorre em cursos igualmente tradicionais de graduação e a complementação com conceitos e temas das áreas biológicas ou médicas acontece ao longo dos trabalhos de mestrado e doutorado. Apesar de salutar, é incipiente o ingresso de alunos com formação em ciências médicas ou biológicas dentro de programas de pós-graduação, mesmo que tenham interesse por pesquisas em campo interdisciplinar.

Dessa maneira, instala-se um círculo vicioso em que a interdisciplinaridade inerente ao campo fica prejudicada.

Dadas a características de rápidas mudanças na natureza das pesquisas biológicas que necessitam suporte das ciências exatas, e das pesquisas em física voltadas para problemas biológicos, corre-se o risco de fechamento de perspectivas de pesquisa e de diminuição na contribuição que pode ser dada para a busca de respostas aos problemas descritos anteriormente. É desejável o estabelecimento de políticas que atendam às características de formação multidisciplinar aos futuros pesquisadores na área, tanto nos cursos de graduação como de pós-graduação.

Mudanças em estruturas de cursos viriam acompanhadas da contratação de docentes que atuariam na área de Física Biológica ou Biofísica e no oferecimento de escolas com foco interdisciplinar para os atuais alunos de graduação e pós-graduação.

Uma importante iniciativa é a implementação da Pós-graduação Latino-Americana de Biofísica, sob coordenação da *International Union of*

*Pure and Applied Biophysics*. Esse programa, que conta com a adesão de alguns programas de pós-graduação brasileiros, oferece ao aluno interessado a possibilidade de frequentar cursos de pós-graduação em Biofísica em diversas instituições latino-americanas, de efetuar estágios de pesquisa em vários laboratórios da América Latina e de obter um diploma com reconhecimento pela IUPAB.

### *Desenvolvimento científico e tecnológico*

A disseminação dos novos conhecimentos, produto primário da pesquisa de natureza fundamental, deverá ocorrer de maneira pública uma vez que tenha sido gerada a partir do financiamento público.

Esse fato é particularmente relevante em áreas como a da bioinformática, na qual o princípio de disseminação do conhecimento deve prevalecer sobre interesses particulares que buscam limitar o acesso às informações. As pesquisas em Física Biológica e Biofísica também podem ter resultados com aplicação direta na área biomédica e impactos em medicina e indústria farmacêutica.

Das pesquisas em produtos naturais, do conhecimento detalhado da grande biodiversidade brasileira, pode-se empreender uma busca sistemática sobre compostos cujos princípios da ação biológica possam ser compreendidos e possam ser empregados com finalidades terapêuticas. Por outro lado, há necessidade de encaminhar soluções para graves problemas de saúde pública que ainda atingem parcela considerável da população.

O conhecimento das características das doenças emergentes e reemergentes, e de suas formas de controle e eliminação, pode resultar de esforços envolvendo pesquisadores da área.

Por sua abrangência, a área de Física Biológica ou Biofísica pode também apresentar impactos em outros campos relacionados a sistemas biológicos, como pecuária e agricultura. Mesmo sem se constituir no foco principal de interesse, há possibilidade de envolvimento de pesquisadores da área em instituições que cuidam de questões a eles pertinentes, como a Embrapa.

O parque de instrumentação científica relacionado à saúde humana, saúde animal e tecnologia agrícola surge como possibilidade de atuação profissional para recursos humanos formados na área.

Do ponto de vista geral, como em outras áreas, a pesquisa em Física Biológica e Biofísica tem importantes implicações na coesão social do país. Os benefícios da formação de pessoal qualificado em ciência e tecnologia são reconhecidos imediatamente como retorno de investimentos feitos na pesquisa básica.

### *Impacto na economia*

Pesquisa de grande porte na área geralmente é conduzida em instituições com financiamento das agências públicas, federais ou estaduais. Seus aspectos básicos podem envolver equipamentos de alto custo e a inovação tecnológica não é um objetivo a ser buscado, apesar do reconhecimento do papel da pesquisa básica como impulsionador para o desenvolvimento de novos produtos.

Nos países com tradição no financiamento público da pesquisa básica, percebe-se que esse tipo de esforço tem impacto substancial na produtividade e que há fortes relações entre o vigor da indústria de um país e o vigor na pesquisa básica.

Os resultados das pesquisas de caráter menos fundamental e mais aplicadas podem ter grandes impactos diretos em setores como o da indústria farmacêutica, de equipamentos de diagnóstico e de produtos com finalidade terapêutica.

### *Infraestrutura*

As pesquisas de natureza experimental na área são conduzidas em laboratórios de diferentes dimensões, podendo variar de laboratórios nacionais de grande porte, como o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, até instalações pequenas com instrumentos básicos de espectroscopia. Projetos de grande porte envolvendo pesquisa em proteoma, caracterização estrutural de proteínas e desenvolvimento de fármacos podem exigir aportes acima

de US\$ 1 milhão. Outras técnicas espectroscópicas tipicamente são montadas com recursos na faixa de US\$ 500 mil.

O Brasil conta com diversos laboratórios de médio porte que possuem equipamentos na faixa de US\$ 500 mil instalados em várias instituições nos estados de São Paulo (USP, Unicamp, Unesp, Ipen), Rio de Janeiro (UFRJ, PUC-Rio), Minas Gerais (UFMG) e Goiás (UFG).

Cada região do Brasil deveria contar com laboratórios multiusuários com equipamentos na faixa de US\$ 2 milhões, sendo que na região Sudeste, compreendendo São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, a duplicação é necessária. Paralelamente aos equipamentos, é necessária a montagem de equipes de pesquisadores envolvidos nos laboratórios.

O Brasil também precisa de equipamentos computacionais adequados às necessidades de simulação dos sistemas estudados. Diversos pesquisadores, em todo o país, desenvolveram competência para atuar na área, tanto isoladamente como em redes de colaboração.

## **Recomendações**

- As características da área apontam para um currículo de graduação que vise a formação de um profissional das Ciências, com conteúdos iniciais das diferentes disciplinas do campo de ciências exatas e biológicas para o aprofundamento em um dos campos de maior afinidade.
- É desejável o estabelecimento de políticas que atendam às características de formação multidisciplinar dos futuros pesquisadores na área, tanto nos cursos de graduação como de pós-graduação. Mudanças em estruturas de cursos poderiam vir acompanhadas da contratação de docentes que atuariam na área de Física Biológica ou Biofísica e no oferecimento de escolas com foco interdisciplinar para os atuais alunos de graduação e pós-graduação.
- Apoio a programas de pós-graduação com colaboração de diversas instituições para formação com conteúdos das áreas de exatas e biológicas.

- Formação de redes de pesquisa envolvendo especialistas de física, química, biologia, medicina e ciências da computação com foco nos problemas desafiadores da área.
- Formação de centros regionais para montagem de laboratórios multiusuários com foco nos problemas desafiadores da área, relevantes para a região.



# Física Estatística, Computacional e Modelagem

*Constantino Tsallis*

*Ronald Dickman*

*Rita Maria Cunha de Almeida*

*Francisco Alcaraz*

*João Antonio Plascak*

*Wagner Figueiredo*

## Sumário Executivo

A Física Estatística dá suporte a diversos ramos das pesquisas físicas e hoje já transcendeu até suas origens, sendo aplicada em química, biologia e até ciências sociais. A área consiste no estudo de sistemas envolvendo enorme número de partículas, com a aplicação de conceitos da teoria de probabilidades em conjunto com as leis da mecânica clássica ou quântica, dependendo do objeto de estudo. O campo começou a se desenvolver em meados do século 19, e ganhou inúmeras aplicações ao longo do século 20.

Hoje a Mecânica Estatística é usada para estudar a propagação de epidemias, a evolução do tráfego urbano, a compra e venda de ações em bolsas de valores, além de resolver diversos problemas da própria física em sistemas complexos. No Brasil, a área cobre todos os tópicos considerados nas reuniões trienais de Física Estatística da União Internacional da Física Pura e Aplicada (IUPAP), e tem seu maior expoente, desde 2008, no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Complexos, sediado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). O INCT reúne atividades de cientistas e tecnólogos de 18 instituições do país. Apesar da forte tradição do país nesses estudos, houve um grande entrave durante as décadas de 1970 e 80 com a reserva de mercado em informática, que inviabilizou a participação dos cientistas brasileiros em programas mais arrojados.

Para superar o atraso gerado por essa política equivocada e se fortalecer a médio e longo prazo, o Brasil precisa formar cientistas que possuam bom conhecimento em estatística e programação científica, assim como em métodos analíticos para desenvolver a área de física computacional. Para tanto, esse aprendizado deve começar o mais cedo possível, para a ampliação do número de profissionais capacitados a atuar nessa área, em sintonia com mais investimentos em centros de computação de alto desempenho, não vinculados, necessariamente, a universidades.

## Estado da Arte

Os conhecimentos gerados na Mecânica Estatística são utilizados em praticamente todos os campos da Física e em outras disciplinas. A área consiste no estudo de sistemas envolvendo um enorme número de partículas, em que conceitos da teoria de probabilidades são utilizados em conjunto com as leis da mecânica clássica ou, nos casos de baixas temperaturas, com os princípios da mecânica quântica. Aliada a métodos computacionais sofisticados, a física estatística tem sido aplicada em diversos problemas, desde a física de baixas energias, como no cálculo de propriedades térmicas, elétricas e magnéticas dos sistemas físicos considerados em Física da Matéria Condensada, até em física de altas energias, onde questões como o decaimento de núcleos atômicos a partir de estados altamente excitados são considerados. A aplicação dos conceitos desenvolvidos nessa área não se restringe, no entanto, unicamente ao campo da Física. Eles têm sido largamente aplicados em química, biologia e em áreas que vão além das disciplinas “duras”, como ciências sociais e econômicas.

A aplicação de métodos estatísticos à física teve início em 1860 com o trabalho de Maxwell, que determinou a distribuição de velocidades das partículas de um gás ideal, e posteriormente na década de 1870 com os trabalhos de Boltzmann. Mas somente após a publicação do livro de Gibbs em 1902, intitulado *Elementary Principles in Statistical Mechanics*, a área da Mecânica Estatística tornou-se uma das mais fundamentais da física, dando suporte, por exemplo, às leis da termodinâmica.



A teoria dos ensembles estatísticos de Gibbs foi empregada, inicialmente, no estudo de gases e mistura de gases diluídos. Com o passar do tempo ela foi estendida a outros sistemas em física da matéria condensada, bem como no estudo da cinética das reações químicas. Um grande progresso nessa área foi conquistado com o advento da mecânica quântica, quando as propriedades termodinâmicas dos sistemas físicos puderam ser descritas em termos das estatísticas de Fermi-Dirac ou de Bose-Einstein.

O grande sucesso alcançado pela Mecânica Estatística foi obtido, entretanto, na elucidação dos mecanismos envolvidos nas transições de fase em fluidos e sistemas magnéticos. Os primeiros modelos utilizados foram baseados em teorias bastante simplificadas, como a teoria de van der Waals para os fluidos e teorias de campo médio para os sistemas ferromagnéticos. Um marco na área de Mecânica Estatística foi a solução analítica obtida por Onsager, em 1944, para a transição de fase do modelo de Ising em duas dimensões. Embora a solução exata desse modelo tenha sido obtida em 1924 em uma dimensão espacial, a importância da solução de Onsager para a área deve-se ao fato de ter sido esta a primeira solução exata obtida para um sistema de muitas partículas interagentes com transição de fases em uma temperatura diferente de zero.

O método desenvolvido por Onsager não pôde ser estendido a outros problemas de transições de fase. Diferentes teorias aproximadas surgiram ao longo do século 20, como as expansões em série de baixas e altas temperaturas para descrever o comportamento crítico dos sistemas físicos. O reconhecimento dessa área de pesquisa ocorreu com o desenvolvimento do método do grupo de renormalização, cuja versão definitiva foi estabelecida em 1971. Essa teoria permitiu que fenômenos aparentemente tão diferentes, como a transição de fase observada em fluidos e em sistemas ferromagnéticos, tivessem comportamentos termodinâmicos semelhantes ao ponto de transição. O comportamento dos sistemas físicos nas vizinhanças do ponto crítico pôde ser explicado com algumas poucas variáveis, como a simetria do parâmetro de ordem, o alcance das interações e a dimensionalidade espacial.

De modo paralelo aos estudos relativos às transições de fase, outros avanços foram obtidos na área de Mecânica Estatística, particularmente aqueles voltados ao estudo das propriedades físicas de sistemas fora do equilíbrio termodinâmico. O ponto de partida nesses estudos é a equação de transporte de Boltzmann que tem sido utilizada para determinar propriedades de transporte dos materiais, tais como a viscosidade e as condutividades elétrica e térmica dos sistemas nos estados sólido, líquido e gasoso. Além do formalismo baseado na equação de transporte de Boltzmann, outras descrições têm sido empregadas no estudo de sistemas fora do equilíbrio termodinâmico.

No caso das transições de fase cinéticas, uma abordagem baseada na dinâmica estocástica, como o formalismo da equação de Langevin, tem sido bastante utilizada como ponto de partida para descrever as equações para a evolução temporal das distribuições de probabilidade dos sistemas físicos.

Levando-se em conta taxas de transições entre os estados possíveis de um sistema, equações mestras e de Fokker-Planck são muito utilizadas na determinação da transição de fase entre estados ativos e absorventes. Esse procedimento tem sido aplicado no estudo da propagação de epidemias e reações catalíticas, tráfego urbano, compra e venda de ações em bolsas de valores, etc. Esses tópicos fazem parte de uma linha de pesquisa em Mecânica Estatística, denominada Sistemas Complexos, com núcleos de pesquisa atuantes na maioria dos centros de pesquisa do Brasil. Vale mencionar a existência, desde 2008, do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Complexos, sediado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, aglutinando atividades de cientistas e tecnólogos de 18 instituições do país.

Podemos dizer que a pesquisa realizada na área de Mecânica Estatística no Brasil cobre todos os tópicos considerados nas reuniões trienais de Física Estatística da União Internacional da Física Pura e Aplicada (IUPAP). Nos temas considerados fundamentais, destacamos as pesquisas diretamente voltadas aos resultados rigorosos e soluções exatas, onde são estudados modelos integráveis de sistemas interagentes. Relativamente aos fundamentos da Mecânica Estatística e Termodinâmica, um grupo de pesquisadores bra-

sileiros desenvolve, desde 1988, pesquisas sobre mecânica estatística não extensiva, focalizando sistemas fora de equilíbrio, sistemas com interações de longo alcance e outros sistemas complexos.

Entre as aplicações oriundas das teorias e métodos desenvolvidos em Mecânica Estatística, destaca-se a continuidade dos estudos sobre as transições de fase e fenômenos críticos em equilíbrio (especialmente sistemas magnéticos ordenados e desordenados) e fora do equilíbrio termodinâmico (modelos epidêmicos e catalíticos).

Outra importante linha de pesquisa é o de problemas com motivação biológica. Nesse caso, os problemas investigados vão desde o estudo de moléculas complexas, polímeros, cristais líquidos, membranas, microemulsões, colóides carregados, soluções eletrolíticas, canais iônicos e envelhecimento de proteínas, até a investigação de motores moleculares, modelos de evolução e genética de populações.

Temas como a formação de padrões espaciais e temporais em sistemas fora do equilíbrio termodinâmico, processos de crescimento, reações químicas e turbulência também têm sido estudados com as técnicas usuais da Mecânica Estatística. Transições de fase em modelos quânticos, condensação de Bose-Einstein e sistemas eletrônicos fortemente correlacionados também têm sido pesquisados por pesquisadores brasileiros. Além da aplicação da Mecânica Estatística em problemas relativos às ciências da natureza, tópicos interdisciplinares têm recebido a atenção de diferentes grupos de pesquisa, entre os quais citamos problemas de tráfego urbano, análises de séries temporais, econofísica e redes complexas com aplicações em diversas áreas, entre elas as ciências sociais.

A física estatística promoveu grandes avanços da Ciência e Tecnologia no último século. A partir dos anos 1950, os métodos desenvolvidos pela Física Estatística foram apropriados pela comunidade científica e computacional, acelerando o desenvolvimento do que se designou Física Computacional. As portas abertas por este feliz encontro levou ao desenvolvimento de várias frentes de trabalho como a aplicação em análise de dados relativos a inteligência, previsões atmosféricas e projeções climáticas.

Espera-se que dentro de muito pouco tempo a supercomputação, associada aos desenvolvimentos inerentes da física estatística, possa acelerar a pesquisa científica em áreas como biologia, medicina, geofísica e astrofísica. Para situar a importância da física estatística e computacional no desenvolvimento científico e tecnológico, basta observar o investimento feito no mundo em computação de alto desempenho. Entre os 500 centros com computadores de mais alto desempenho no mundo encontramos a Arábia Saudita, Itália, Canadá, França e Estados Unidos.

O Brasil não aparece nesta lista e a China recentemente montou um supercomputador, o Tianhe, com capacidade de até 1 petaflop (um quatrilhão de operações de ponto flutuante por segundo), rivalizando com os mais rápidos computadores do mundo (<http://www.top500.org>). No último encontro patrocinado pela IUPAP sobre Física Computacional, realizado em Ouro Preto em 2008, houve uma sessão especial sobre computação em petaflops (<http://www.ccp2008.ufop.br/site/welcome.php>).

É necessário enfatizar que nossa capacidade de solucionar problemas cresceu enormemente desde o início do desenvolvimento da física computacional. Esse crescimento ocorreu, em parte, devido o aumento no desempenho dos computadores, embora o desenvolvimento de novos algoritmos tenha superado em muito a contribuição devida a novos processadores. Uma modelagem computacional é um programa de computador que procura descrever o comportamento de um sistema particular como, por exemplo, o estudo do fluxo de água em reatores nucleares, extração de petróleo, tráfego, mercado financeiro, modelamento estrutural de proteínas, desenvolvimento de novos materiais e transições de fase quânticas. Para modelar tais situações a mecânica estatística é um instrumento fundamental no desenvolvimento dos aplicativos computacionais.

As técnicas e os avanços em física estatística são rapidamente incorporados ao universo da modelagem com o objetivo de tornar o código desenvolvido mais eficiente. Hoje é consenso que a modelagem computacional desempenha um papel complementar indispensável às formas clássicas de investigação. Sistemas com algum ingrediente estocástico, para os quais contingências ocorridas no decorrer de sua evolução dinâmica são fun-

damentais, são tratados através da geração de números pseudoaleatórios. Nesse caso, o tratamento computacional é uma simulação e os métodos mais comuns usam duas técnicas principais conhecidas como Dinâmica Molecular (DM) e Monte Carlo (MC).

A DM é um procedimento que usa as interações entre partículas (átomos, moléculas, spins, etc.) para escrever as equações de movimento do sistema físico de interesse. As equações resultantes são integradas numericamente e a evolução do sistema pode ser acompanhada e visualizada a cada instante de tempo da simulação. A repetição deste processo para diferentes condições gera um conjunto de sistemas sobre os quais os métodos de mecânica estatística podem ser usados para obter a termodinâmica. Os métodos de DM são limitados por dois problemas intrínsecos: os métodos de integração numérica que levam a um acúmulo de erros quando aplicados a tempos longos, e pelo tempo de computação que depende da complexidade das forças de interação presentes no problema.

Os métodos de MC, por sua vez, são muito usados quando todos os métodos analíticos falham. Eles se caracterizam pelo uso de variáveis aleatórias para obter amostragens do sistema para o qual se quer computar os resultados de interesse. Como esse é um método que se baseia em tomar amostragens do espaço de interesse, ele é mais adequado quando o número de graus de liberdade do sistema é muito grande.

As noções de mecânica estatística são essenciais ao método de simulação de Monte Carlo, em especial os conceitos de distribuição de probabilidades, o teorema central do limite e suas generalizações, além da cadeia de Markov, a equação mestra, a geração eficiente de números pseudoaleatórios e a análise de erros em medidas. Grande número dos exemplos acima se refere aos sistemas ergódicos em equilíbrio, para os quais qualquer possível estado do sistema em um dado instante pode ser substituído por qualquer outro estado igualmente provável, sem que tal troca tenha influência na evolução temporal futura das quantidades macroscópicas de interesse. Essa propriedade permite que se estude diretamente a evolução temporal das distribuições de probabilidade, no lugar da evolução temporal dos estados sucessivos em que o sistema se encontra em cada instante.

De forma simplista, o estado atual pode ser substituído pela “média” de todos os possíveis estados. Isso se faz através de equações diferenciais do tipo Boltzmann, Fokker-Planck, de difusão ou as próprias equações de movimento de Newton ou Schrödinger, como é o caso da DM. Portanto, estão excluídos dessa classe importantes fenômenos em que a própria história passada do sistema deve ser levada em conta para descrever a citada evolução. Em geral são sistemas em que algum grau de hereditariedade entre gerações sucessivas está presente, evolução biológica, de linguagens, de comportamentos sociais, econômicos, etc.

Em determinado sistema, uma vez estabelecido o estado particular em que se encontra num dado instante (geração), apenas uma parte ínfima dos possíveis estados do mesmo sistema são acessíveis em um instante subsequente, ou seja, apenas aqueles compatíveis com os resultados potenciais da regra de hereditariedade aplicada àquele estado particular anterior já estabelecido. Trata-se da filtragem hereditária que reduz enormemente o número de estados possíveis. Nesse caso, a substituição do estado particular atual pela “média” não faz sentido e o sistema guarda memória de longo prazo que envolve todo o seu passado ancestral. Como resultado, não há em princípio equações diferenciais possíveis que traduzam as regras microscópicas diretamente na evolução temporal das grandezas macroscópicas de interesse, sendo que, assim, não existe uma “equação de Darwin”.

Mais recentemente, os métodos da física estatística têm sido aplicados também a estes problemas, através dos modelos de agentes em que as características de cada indivíduo são armazenadas na memória do computador e atualizadas sucessivamente a medida que as gerações se sucedem, segundo as regras microscópicas de hereditariedade impostas. Contingências ao longo da evolução são decididas pelo sorteio de números pseudo-aleatórios.

Não se realizam médias intermediárias e, ao estado inicial, é aplicada a regra de evolução programada durante muitas gerações.

Estatísticas macroscópicas são obtidas através da evolução de diferentes estados iniciais e/ou diferentes sequências de números pseudo-aleatórios, sendo a média realizada apenas entre os respectivos estados finais.

## Desafios e Perspectivas

A infraestrutura computacional no Brasil ainda é muito incipiente. Não há desenvolvimento de programas científicos realmente inovadores feitos genuinamente por cientistas brasileiros. Além disso, são pouquíssimos os profissionais em física que sabem produzir códigos paralelos de forma eficiente. Nossos centros de “alto desempenho” não passam de ajuntamentos de computadores ou CPU's que a maior parte do tempo fazem programação sequencial.

Os recursos gastos para formar centros de alto desempenho espalhados pelo país deveriam ser usados em poucos centros, sob a direção de cientistas que sejam da área de física computacional. Estes locais deveriam funcionar como centros de treinamento para estudantes e profissionais, além de prestar assessoria para o desenvolvimento de *software*.

Para que o centro fique livre de intervenções políticas locais ou que seu potencial seja desviado para serviços administrativos, sugere-se que a sua estrutura seja feita nos moldes do LNLC e não esteja vinculada a universidades. Não menos importante é estimular nossos estudantes a usar o computador como um instrumento para a solução de diversos problemas em ciência.

Entre as áreas em que os desafios deverão ser maiores nos próximos anos destacam-se: sistemas correlacionados, novos materiais, nanotubos de carbono, transições de fase quânticas, sistemas caóticos, previsão do tempo, sistemas abertos e fora do equilíbrio e sistemas financeiros.

## Brasil na Área

Devido à sua forte tradição, a física estatística vem contribuindo com grandes progressos e avanços no Brasil. Pode-se dizer, de modo geral, que nos anos 70 uma pequena comunidade de físicos brasileiros iniciou estudos em física estatística atacando problemas experimentais e teóricos em transições de fases magnéticas e fenômenos críticos. A física computacional, por outro lado, só chegou ao Brasil no final dos anos 80. Muito esforço

foi feito no sentido de trazer para o país uma nova área que se mostraria dentro de pouco tempo indispensável em qualquer iniciativa científica.

Apesar desse esforço, inicialmente poucos pesquisadores se arriscaram a trabalhar na área e existem várias razões para isso, sendo uma delas a reserva de mercado da informática nos anos 80 que inviabilizou a participação dos cientistas brasileiros em programas mais arrojados. Isso provocou uma paralisia nos pesquisadores e um atraso de vários anos na área.

## **Relevância para a Sociedade**

### *Formação de Pessoal*

Os métodos e técnicas usados em física computacional, em particular em simulações, estão intimamente relacionados com os métodos da física estatística. Não há como pensar em um cientista na área de simulação sem que se faça uma associação à física estatística: os métodos usados em simulação são tipicamente derivados da física estatística. Ainda é bastante incipiente o uso de métodos computacionais para a solução de problemas em nossos cursos universitários tradicionais e até mesmo no segundo grau.

Nas universidades, apesar de já haver laboratórios com computadores em quantidade e qualidade suficientes para iniciar esse processo, não existe um número suficiente de livros e textos que abordem os problemas a partir de uma perspectiva computacional.

No segundo grau, com exceção de algumas escolas particulares, não existem laboratórios nem pessoal capacitado para fazer este tipo de trabalho. Uma solução relevante seria estimular os professores a darem seus cursos dentro desta perspectiva, uma vez que esse tipo de profissional passaria de simples usuário de produtos comprados no exterior para produtor de programas de uso fundamental.

Por outro lado, se o uso de técnicas de simulação se tornasse mais comum, seria muito mais simples para profissionais de ciência e tecnologia usarem essas inovações em busca da solução de problemas até então insolúveis por meio de outras técnicas. Um exemplo disso é a possibilidade de descoberta de novos materiais ou testes não destrutivos de novas tecnolo-



gias. Para que isto ocorra de forma organizada, é necessário que se inicie imediatamente um programa nas escolas de segundo e terceiro graus. Além disso, seria preciso implementar alguns grandes centros de computação de alto desempenho, não necessariamente ligados a universidades e com capacidade não só para gerenciar os próprios centros, mas para auxiliar os usuários nos primeiros anos de uso. Os centros devem também ter independência gerencial e orçamentária para contratar por tempo determinado profissionais que auxiliem no desenvolvimento e manutenção do centro.

Nunca é demais lembrar que um centro como o proposto deve atualizar seus equipamentos pelo menos a cada dois anos. No curto prazo espera-se que o Brasil se torne auto-suficiente na formação de mão de obra especializada na área de simulações. Para que isso ocorra será necessário contratar um número significativo para os novos centros de computação de alto desempenho e também aumentar o número de profissionais das universidades.

### *Inovação tecnológica*

A descoberta de novos materiais e a exploração de petróleo em águas profundas são exemplos de questões importantes e atuais no Brasil. As soluções para todos esses problemas complexos requerem o conhecimento detalhado de suas propriedades intrínsecas.

Até 20 anos atrás não havia uma solução ou predição teórica para esses problemas, situação que mudou drasticamente com a descoberta de novas aproximações analíticas e o desenvolvimento de várias técnicas em Física Estatística.

O desenvolvimento do poder computacional permitiu a vários grupos científicos, baseados em universidades, centros de pesquisa e empresas, a previsão e descoberta de propriedades de grande relevância física, com interesse econômico, científico e tecnológico. O Brasil teve um grande avanço na área teórica que não foi seguido por um avanço estratégico em computação de alto desempenho. Para recuperar o tempo perdido, será necessário investir na área de computação de alto desempenho, em particular

na área de física computacional. Do ponto de vista econômico, o impacto pode ocorrer de várias maneiras principais:

- Pelo desenvolvimento de programas que permitam fazer testes não destrutivos. Esses métodos incluem um grupo de técnicas que permitem a inspeção de propriedades de materiais ou processos sem causar dano ao meio no qual se faz o teste. Muito comuns são as previsões para implantes radioativos em tratamento de câncer e testes em dutos de usinas nucleares.
- Na exploração de situações de interesse tecnológico de difícil acesso por outros meios. A quantidade total de petróleo contida em uma reserva é diferente da quantidade que se pode retirar do poço e essa limitação ocorre devido a diversos fatores. Por conta disso, técnicas de simulação têm sido usadas para estudar procedimentos que permitam aumentar o rendimento de um poço.
- Barateando o custo final de testes de interesse tecnológico. Já existem atualmente vários programas que podem prever propriedades físicas sem a necessidade de análises como microscopia eletrônica, difração de raios-x e calorimetria.
- Prevendo o comportamento de novos materiais. O uso de técnicas de simulação, como Monte Carlo e Dinâmica Molecular, pode levar ao desenvolvimento de novos produtos bem como desvendar novas propriedades de materiais existentes no mercado, inclusive no mercado farmacológico. No curto prazo, o principal interesse tecnológico está no desenvolvimento de novos materiais, biomedicina e predição de estruturas de proteínas.

Por conta da reserva de mercado em informática dos anos 70 e 80, o Brasil ficou atrasado no uso e desenvolvimento de aplicativos científicos para computadores de alta eficiência. Quase todos os aplicativos utilizados por nossos pesquisadores foram desenvolvidos no exterior, fazendo com que os grupos de pesquisa nacionais tivessem pouco interesse no desenvolvimento de *softwares* e a nossa indústria apenas replicasse máquinas para uso pessoal. Nenhum desenvolvimento significativo foi feito no sentido de se produzir máquinas dedicadas a realizar computação de alto desempenho.

Por essas razões, nossa infraestrutura computacional, física e de desenvolvimento de códigos, é ainda muito dependente do que vem do exterior. Em certos casos, a venda de máquinas e *softwares* está condicionada a não realização de algumas linhas de pesquisas consideradas estratégicas pelos vendedores desses bens.

Uma mudança de paradigma do ensino no país, com a utilização do computador para o ensino e a resolução de problemas, terá como imediata consequência a introdução de todos os estudantes em um mundo tecnologicamente mais avançado, permitindo que o patamar de instrução mude drasticamente. Dentro da perspectiva de que o mundo necessita cada vez mais de pessoal especializado em novas tecnologias, é fácil observar o grande potencial que desempenhará uma mudança na forma de se lecionar e aprender, seja no ensino básico, médio e superior.

## Recomendações

Qualquer plano estratégico de médio ou longo prazo para ciência e tecnologia passa pelo desenvolvimento de estratégias que invistam em centros de excelência em Física Estatística e Computacional. O Brasil precisa formar cientistas que possuam um bom conhecimento em estatística e programação científica, assim como em métodos analíticos para que possam desenvolver a área de física computacional.

Para que isso ocorra de forma consistente, esse aprendizado deve começar o mais cedo possível, ainda antes do estudante ingressar no terceiro grau. Para aproveitar todo o potencial desenvolvido, recomenda-se:

- Investimento em centros de computação de alto desempenho, não vinculados, necessariamente, a universidades.
- Investimento no ensino superior para o desenvolvimento de textos que usem física computacional como técnica para a solução de problemas.
- Contratação de pessoal, no Brasil e no exterior, com experiência comprovada na área para atuar nesses centros.



# Física da Matéria Condensada e de Materiais

*Antônio Gomes de Souza Filho*

*Marcos Assunção Pimenta*

*Raimundo Rocha dos Santos*

*Eduardo Miranda*

*Antonio Azevedo*

## Sumário Executivo

Muitos dos grandes avanços tecnológicos da nossa era, que incluem o desenvolvimento dos aparelhos de DVD e *Blu-ray*, telas de cristal líquido e equipamentos hospitalares de ressonância nuclear magnética, nasceram das investigações em nível de pesquisa básica da Física da Matéria Condensada. Por seu vasto alcance, é considerada a mais ampla das sub-áreas da Física e promete continuar expandindo os limites da tecnologia nos anos que virão.

A Sociedade Americana de Física concluiu que os cientistas da Física da Matéria Condensada continuarão a ter um campo de pesquisa amplo e rico na próxima década. E o Brasil já mostrou grande potencial para estar na frente dessa onda, com estudos significativos na ciência dos nanotubos de carbono e, mais recentemente, com o grafeno, um material que apresenta vários fenômenos que vão além da própria Física da Matéria Condensada.

No Brasil, existe uma comunidade experimental e teórica consolidada de Física de semicondutores, e a realização da conferência ICPS (*International Conference on the Physics of Semiconductors*), em 2008, no Rio de Janeiro, demonstra a inserção internacional da comunidade brasileira. E um fator importante é a distribuição de grupos de pesquisa por praticamente todo o território nacional, com trabalhos publicados em revistas de alto impacto.

Mas para que o país esteja à altura dos desafios vindouros, é imperativo suprir a falta de pessoal na área, estimulando jovens a se dedicarem a essas carreiras, e aumentar investimentos em infraestrutura e no fomento a grupos pequenos de pesquisadores. Na história da Física da Matéria Condensada, as grandes inovações dessa área têm sido feitas por grupos reduzidos.

## **Estado da Arte**

A Física da Matéria Condensada (FMC) é considerada a mais ampla das sub-áreas da Física em termos de objetos de estudo. Os métodos, modelos e técnicas da FMC têm impactado diversas áreas, desde a Física Biológica até a Física de Altas Energias, passando por outras áreas, como química, engenharias, ciência da computação e matemática aplicada. Historicamente, o progresso da área tem sido realizado pela quebra de pequenos paradigmas por diversos grupos de pesquisa. A descoberta de novos fenômenos na FMC vem dando origem ao desenvolvimento de novos materiais e dispositivos. São vários os exemplos de fenômenos que primeiro foram investigados e desenvolvidos no âmbito da matéria condensada e que hoje fazem parte das nossas atividades diárias. Os aparelhos de DVD e Blu-ray, por exemplo, são equipados com lasers à base de semicondutores, materiais magnéticos são usados nos discos dos computadores, telas de cristais líquidos estão nas TVs, celulares e câmeras fotográficas, assim como supercondutores são a base do funcionamento de equipamentos de ressonância nuclear magnética.

O desenvolvimento dos novos materiais de carbono na última década trouxe avanços importantes, quando foram descobertos novos fenômenos nos nanotubos de carbono com o aprimoramento de técnicas para isolar e realizar experimentos nesses materiais. O conhecimento da física dos sistemas unidimensionais avançou com a descoberta de fenômenos como o fato de os nanotubos poderem ser metálicos ou semicondutores dependendo de sua simetria, a física especial dos éxcitons nos nanotubos quando comparado com os semicondutores tradicionais e a espectroscopia ótica

(fotoluminescência, espalhamento Raman e Rayleigh) em um único nanotubo. O forte confinamento quântico nos nanotubos de carbono contribuiu também com o desenvolvimento de novas ferramentas para a investigação de nanomateriais. Diversos grupos brasileiros, tanto experimentais quanto teóricos, deram contribuições importantes para o desenvolvimento da ciência dos nanotubos de carbono. Parte desse sucesso foi possível com a criação de redes nacionais de pesquisa sobre o tema.

A Física da Matéria Condensada verificou uma verdadeira revolução com a realização de experimentos relacionados ao grafeno, o que foi rapidamente reconhecido com o Prêmio Nobel de Física em 2010, apenas seis anos após a publicação dos primeiros experimentos com esse tipo de material. Vários fenômenos fundamentais estudados no grafeno vão além da FMC, tendo relação até com a Física de Partículas, e podem ser explorados para aplicações tecnológicas em diferentes áreas do conhecimento. O fato de ser bidimensional já é bastante atrativo para os físicos e, de modo geral, os problemas nessa dimensão revelam peculiaridades que não ocorrem em uma ou três dimensões. Os elétrons no grafeno possuem uma propriedade singular: se comportam como partículas sem massa, ou seja, se propagam como se fossem luz no vácuo, exibindo uma dispersão da energia que depende linearmente do vetor de onda, em vez da dependência apresentada pela maioria dos sistemas em estado sólido.

A baixa velocidade dos férmions sem massa permitiu que fenômenos puramente relativísticos fossem observados e estudados em um sistema bastante simples, em um laboratório comum de matéria condensada de baixas energias. Os elétrons se propagam por uma distância muito grande sem que sejam espalhados, o que leva o sistema a possuir um dos maiores valores de mobilidade eletrônica já observados em laboratório, propriedade fundamental na eletrônica moderna. O fraco acoplamento spin-órbita permite aos elétrons viajar por frações de micra, preservando assim suas características intrínsecas e permitindo que o grafeno seja usado em transporte de spin, propriedade fundamental para o tão sonhado desenvolvimento da computação quântica.

Fenômenos de difícil observação, como a fase de Berry, e genuinamente relativísticos, como tunelamento de Klein, foram medidos com sucesso no grafeno. O efeito hall quântico nesse material se diferencia daquele observado em semicondutores ou metais e a natureza dos portadores permite a observação de efeitos quânticos à temperatura ambiente.

A estabilidade química, a possibilidade de obtenção em grande escala, dada a abundância e baixo custo da matéria-prima, além da completa compatibilidade do grafeno com a tecnologia do silício, pavimentam o caminho para uma nova geração de dispositivos operando com uma eletrônica baseada no carbono. Esse é o material mais rígido e mais resistente já medido em laboratório, sendo também o mais elástico.

A comunidade de FMC brasileira tem participado do desenvolvimento da ciência teórica e experimental do grafeno de forma mais ativa através de redes de pesquisa e colaborações internacionais. A realização do congresso *Graphene Brazil* em dezembro de 2010, na cidade de Belo Horizonte, e do NT07 (*International Conference on Science and Applications of Carbon Nanotubes*) em julho de 2007, na cidade de Ouro Preto, reuniram os pioneiros da área e mostraram o importante papel que a comunidade brasileira tem desempenhado no desenvolvimento do segmento.

Nesse mesmo contexto de importantes avanços científicos, a área de semicondutores foi repleta de desenvolvimentos na última década: a precisão na deposição de heteroestruturas permitiu a observação de uma série de fenômenos nos semicondutores magneticamente diluídos e óxidos. Sistemas dopados com Mn permitiram o desenvolvimento de materiais multifuncionais com as características dos semicondutores e propriedades magnéticas de multicamadas.

Outros avanços significativos ocorreram na área de single dopants, dando origem a um campo chamado de solotronics, com impactos na área de computação quântica. Isso porque esses single dopants permitem a realização física de qubits e também são fonte de emissão de luz não convencionais, tais como emissão de single photons.

No Brasil, existe uma comunidade experimental e teórica consolidada de Física de semicondutores, que trabalham com heteroestruturas, pontos



quânticos, nanofios, semicondutores magneticamente diluídos e semicondutores orgânicos.

A realização da conferência ICPS (*International Conference on the Physics of Semiconductors*), em 2008, no Rio de Janeiro demonstra a inserção internacional da comunidade brasileira na área.

A área dos metamateriais também tem verificado progressos importantes, mas fenômenos ligados à refração negativa foram pouco estudados antes de 2000, quando um trabalho teórico de J. B. Pendry mostrou que uma lente consistindo somente em uma chapa de material com índice de refração negativo, com permeabilidade e permissividade negativas pode, em princípio, funcionar como uma “superlente” com resolução melhor que o limite tradicional imposto pela difração.

Essa área se desenvolveu bastante na última década. No ano de 2006, foi implementada a primeira aplicação de metamateriais em dispositivos de “invisibilidade”, porém na faixa de microondas e, em 2009, conseguiu-se desenvolver dispositivos semelhantes na faixa do infra-vermelho próximo.

Para uso com comprimentos de onda menores, o desafio de fabricação é ainda maior. Além da necessidade de técnicas complexas de fabricação destas estruturas, existe o problema de absorção e perdas devido às ressonâncias. Este problema é fundamental nestas estruturas, embora existam pesquisas mostrando o uso de meios com ganho para contrabalançar o efeito da absorção.

Uma das áreas mais ativas da FMC está relacionada com a investigação de magnetismo e propriedades magnéticas de materiais. Do ponto de vista da física básica, o magnetismo representa uma aplicação complexa de mecânica quântica, física estatística e eletromagnetismo.

Isto faz com que o magnetismo exerça grande atração sobre os físicos teóricos e experimentais. Nas duas últimas décadas a pesquisa em magnetismo e materiais magnéticos vem passando por uma fase de muito interesse que se deve, principalmente, ao desenvolvimento de técnicas sofisticadas na área de preparação e caracterização de materiais.

A capacidade de controlar o crescimento de filmes finos e multicamadas em escala atômica, que ocorreu na área de semicondutores, se estendeu à

área de magnetismo, motivado pela indústria de armazenamento de informações. Um dos exemplos da relação íntima que existe entre a física de fenômenos fundamentais em magnetismo e suas aplicações tecnológicas foi a utilização do fenômeno da Magnetoresistência Gigante, que levou menos de dez anos entre sua descoberta e sua utilização em produtos. A descoberta, que levou à concessão do prêmio Nobel de 2007 a Albert Fert e Peter Grunberg, foi um dos trabalhos seminais da área hoje conhecida como spintrônica e que teve a contribuição do físico brasileiro Mario Baibich. A capacidade de sintetizar novas estruturas magnéticas na escala de dimensões nanométricas tem levado ao descobrimento sucessivo de vários fenômenos em magnetismo com amplas possibilidades de utilização na área de magneto-eletrônica.

Grandes desenvolvimentos têm ocorrido também na área dos materiais multiferróicos, os quais envolvem fenômenos como ferroeletricidade e ferromagnetismo. Conciliar esses dois fenômenos é desafiador porque envolvem diferentes tipos de simetria. Tanto os materiais ferroelétricos como os magnéticos estão presentes na sociedade moderna em muitas aplicações. Na área de materiais magnéticos com magnetização espontânea, é marcante o impacto na indústria de armazenamento de dados, principalmente depois da descoberta do fenômeno da magnetoresistência gigante: além de estarem presentes nos computadores, serão fundamentais para o desenvolvimento da spintrônica.

Por outro lado a indústria de sensores e atuadores é toda baseada em ferroelétricos, que exibem a propriedade de ter a polarização espontânea reversível pela aplicação de campo elétrico. A coexistência de ferroeletricidade e magnetismo é, sem dúvida, uma plataforma para explorar a física de sistemas fortemente correlacionados e grandes avanços são esperados para os próximos anos, tanto no entendimento quanto nas estratégias de potencializar o acoplamento entre essas duas ordens. No Brasil, diferentes grupos têm atuado na área, destacando-se trabalhos em desenvolvimento de novos materiais multiferróicos, investigações dos acoplamentos entre fônons e magnons e das propriedades dos eletromagnons em diversos sistemas. Atualmente, aplicações tecnológicas têm sido realizadas envolvendo

compósitos magnetoelétricos, formados pela combinação de um material ferroelétrico e um material ferromagnético.

De maneira geral, tanto materiais magnéticos quanto multiferróicos são genericamente classificados como “sistemas fortemente correlacionados”.

Essa denominação engloba uma série de compostos e sistemas cuja descrição teórica requer abordagens mais sofisticadas que teorias simples de campo médio ou correlatas. Vale acrescentar também os átomos frios aprisionados, que foram inicialmente estudados no contexto de Física Atômica e Molecular, mas que hoje em dia, com o advento das redes ópticas, tornaram-se um laboratório de simulação de sistemas de matéria condensada sólida. Devido ao enorme desafio de sua descrição, esses sistemas são fonte constante de produção de conhecimento fundamental em matéria condensada, tendo dado origem a vários prêmios Nobel de Física ao longo da história: para os líquidos quânticos (1962), para a supercondutividade (1913, 1972, 1973, 1987, 2003), para a transição metal-isolante (1973), para o efeito Hall quântico fracionário (1998) e para a superfluidade (1978, 1996, 2003). Além disso, devido à enorme diversidade de comportamentos encontrada nesses sistemas, que vão de supercondutores e metais a isolantes, de não-magnéticos a magnéticos, frequentemente sendo possível sintonizar entre essas diferentes fases, eles apresentam grande potencial para aplicações.

O diálogo entre físicos teóricos e experimentais, como em toda a Física da Matéria Condensada, é extremamente importante. Não só os experimentos fornecem ingredientes fundamentais para a elaboração dos modelos teóricos, como também a teoria orienta os esforços experimentais. Além disso, os métodos empregados na análise desses sistemas são frequentemente idênticos àqueles empregados em física de altas energias, o que justifica o diálogo entre físicos de matéria condensada e de partículas.

Um dos sub-grupos mais importantes dos sistemas correlacionados são os supercondutores. O estudo da supercondutividade vem despertando interesse ao longo dos últimos anos, por diversas razões. Primeiramente, novos materiais supercondutores vêm sendo descobertos, desde que os cupratos vieram à tona no final da década de 1980. Estes novos supercon-

dutores são usualmente agrupados em “classes”, como cupratos, férmions pesados, carbetos de Boro, e as recém-descobertas pnictitas de Ferro. Mais recentemente, evidências experimentais têm se acumulado para indicar que muitos destes materiais exibem coexistência entre algum ordenamento magnético e a supercondutividade, reforçando a idéia de que flutuações magnéticas devem desempenhar um papel fundamental. Sob o ponto de vista de aplicações, ímãs supercondutores resfriados a baixas temperaturas são vastamente utilizados, por exemplo, para produção de campos magnéticos em aceleradores, equipamentos de pesquisa e em tomógrafos de Ressonância Magnética Nuclear.

Com a possibilidade de descoberta de novos supercondutores com temperaturas e correntes críticas mais altas, há expectativas de que materiais supercondutores possam desempenhar papel importante em linhas de transmissão e em componentes para turbinas eólicas, assim como em bobinas geradores de campos magnéticos para aplicação mais ampla em medicina. Estima-se que o mercado mundial de ímãs para este último fim esteja na faixa de US\$ 4 bilhões, e várias indústrias estrangeiras vêm buscando aplicações tecnológicas alternativas que possam gerar um mercado equivalente.

Os desenvolvimentos nos tópicos acima citados, bem como muitos outros que aconteceram na FMC têm sido possível graças ao uso de métodos computacionais e algoritmos sofisticados e às técnicas de microscopias avançadas. Os modelos aumentam cada vez mais a capacidade de antecipar fenômenos bem como a precisão em descrever os resultados experimentais disponíveis.

## **Desafios e Perspectivas**

A Sociedade Americana de Física prospectou que os cientistas de Física da Matéria condensada continuarão a ter um campo de pesquisa amplo e rico na próxima década. As oportunidades de pesquisa contribuirão para responder uma ou mais questões gerais que norteiam a área. Como fenômenos complexos emergem a partir de ingredientes simples? Como aten-

der à demanda energética das futuras gerações? Qual é a física da vida? O que acontece em condições longe do equilíbrio termodinâmico e por quê? Que novas descobertas o nanomundo irá nos revelar? Como a revolução das tecnologias da informação evoluirá?

É difícil estimar o percentual de contribuição que os cientistas brasileiros darão na solução desses desafios, mas pode-se afirmar que existe potencial humano e de infraestrutura estabelecido no país para participar do desenvolvimento da área em nível mundial. Existem grupos de pesquisa trabalhando em áreas que estão inseridas em um ou mais dos tópicos listados acima, tanto atuando de forma isolada como organizados em redes nacionais e, em alguns casos, internacionais. Um dos maiores desafios da FMC é avançar no entendimento e elaborar modelos para os sistemas longe do equilíbrio. Os processos que ocorrem nessas condições necessitam de novas formulações e modelos com ingredientes bem diferentes do que aquele no qual está baseada a FMC tradicional. Entender os sistemas fora do equilíbrio não é fácil, tendo em vista uma série de propriedades que colocam obstáculos na rota.

Uma propriedade a ser considerada é a desordem, que introduz uma série de dificuldades no tratamento destes materiais, como a perda de simetria de translação e a necessidade de estender o ensemble estatístico. Diversos materiais, inclusive alguns vitais para o setor industrial, pertencem a essa classe de materiais, tais como os vidros, plásticos, espumas, materiais granulares e suspensões coloidais. São inúmeros os fenômenos que acontecem nessas condições, cobrindo várias ordens de grandeza no tempo e no espaço, indo desde transporte eletrônico em sistemas nanométricos, aspectos relacionados à vida, ao clima, ambiente e à economia.

Desenvolvimentos nessa área terão impacto amplo em várias ciências e têm a chance de gerar o maior dos impactos, em termos de amplitude, que a FMC já pôde dar à construção da ciência. Além dos fenômenos fundamentais, desenvolvimentos nessa área são importantes para aplicações e desenvolvimento do País.

Áreas como o transporte e armazenagem de grãos podem se beneficiar tremendamente dessa Física: o movimento das dunas em nossa extensa

área costeira frente às mudanças climáticas poderão ser melhor previstos e descritos. Um dos maiores desafios da humanidade nas próximas décadas é o desenvolvimento de novas formas de energia que não tenham um impacto negativo sobre o meio ambiente.

A matriz energética brasileira é hoje concentrada em fontes não renováveis de energia, como o petróleo e o carvão natural, que contribuem para agravar o efeito estufa, ou a energia nuclear que pode ter efeitos maléficos sobre a saúde humana e o meio ambiente. As atuais fontes “limpas” de energia têm ainda eficiências baixas, como os dispositivos fotovoltaicos e as células de hidrogênio, e um dos grandes desafios da Física da Matéria Condensada e de Materiais será o desenvolvimento de novos materiais capazes de tornar as fontes renováveis e “limpas” de energia mais eficiente e barata. A área de pesquisa relacionada aos nanomateriais pode levar a grandes contribuições nessa área.

Outra área onde os avanços da FMC podem levar a contribuições significativas é o desenvolvimento de novos materiais com propriedades mecânicas, elétricas ou térmicas superiores aos atuais. A adição de nanomateriais em materiais convencionais como, por exemplo, os plásticos, vidros e cerâmicas, dando origem aos chamados nanocompósitos, deverá levar ao desenvolvimento de novos tipos de materiais que se aproveitem das boas e desejáveis propriedades de cada constituinte da mistura, com aplicações diversas. Esses novos materiais poderão substituir outros usados atualmente e que são pouco abundantes na natureza.

Na área dos materiais magnéticos as demandas são por materiais caracterizados por uma ou mais características excepcionais, como por exemplo alta permeabilidade, alta coercividade ou alta remanência. No entanto, para que os materiais sejam candidatos a aplicações de alta tecnologia no futuro, eles devem possuir um amplo espectro de propriedades magnéticas, elétricas, mecânicas, anticorrosivas e térmicas.

O processamento de novos materiais magnéticos com a otimização de múltiplas propriedades exige atividades de pesquisas interdisciplinares que levam ao desenvolvimento de propriedades intrínsecas e extrínsecas. Na área de spintrônica, um dos grandes desafios é a fabricação de sistemas

integrados de GMR com a tecnologia do silício. Na área de materiais com índices de refração negativo, os maiores desafios fundamentais envolvem a minimização das perdas e desenvolvimento de estruturas eficientes nas frequências mais altas.

Em termos da minimização das perdas, o uso de meios com ganho apresenta uma possibilidade.

Um outro tipo de metamaterial, feito de guias de ondas coaxiais embutidas numa chapa de metal, poderá também ser uma boa opção. É importante não somente mostrar a refração negativa com eficiência, mas também incorporá-la em estruturas semelhantes às superlentes propostas por Pendry. Outro tipo de estrutura de importância pode ser a “hiperlente” feita de material com dispersão hiperbólica, dobrado para formar uma casca ao redor do objeto.

Na área de multiferrícos, existem diversos desafios a serem superados. Mesmo no sistema que tem sido usado como referência, o  $\text{BiFeO}_3$ , multiferríco à temperatura ambiente, ainda não foi obtido um bom entendimento do mecanismo responsável pelo forte acoplamento da polarização com o ciclóide incomensurável de ordem de spin. Entender esse fenômeno terá um forte impacto no desenvolvimento de outros sistemas multiferrícos à temperatura ambiente.

O mecanismo de ferroeletricidade nas manganitas ainda precisa ser melhor entendido. Um dos grandes desafios dessa área é encontrar materiais ou sistemas nos quais o acoplamento entre magnetismo e ferroeletricidade seja efetivo e que ambos fenômenos se manifestem com intensidade suficiente para serem explorados em aplicações.

Na área de sistemas fortemente correlacionados, vários fenômenos ainda aguardam um melhor entendimento. Podemos citar a descrição completa das transições metal-isolante induzidas pela interação eletrônica (transição de Mott) e pela desordem (transição de Anderson), o entendimento de propriedades anômalas encontradas nas proximidades dos vários pontos críticos quânticos, a descrição e descoberta de mais compostos que sejam isolantes topológicos, a descrição e caracterização de fases eletrônicas com

ordem não convencional como nemáticos, fases de faixas (“stripes”) ou ordenamento vítreo.

Todos esses fenômenos têm o potencial de impactar de forma marcante o entendimento fundamental de Física da Matéria Condensada ou até de outras áreas da Física.

## **Brasil na Área**

A FMC é a sub-área da Física que, possivelmente, está mais presente em todo o território nacional. Vários grupos de pesquisa estão espalhados por universidades e institutos de pesquisa e a área vem crescendo em termos de publicações científicas, como na *Physical Review B* e na seção de Física da Matéria Condensada da *Physical Review Letters*, as duas principais revistas da área. Houve um crescimento de 300% das publicações na PRL na última década, indicando claramente o aumento qualitativo da pesquisa realizada em FMC no Brasil. O aumento dos investimentos em ciência no Brasil permitiu uma expansão e consolidação de infraestrutura de pesquisa na área de FMC. O país possui um parque de equipamentos competitivo no que diz respeito às técnicas de caracterização estrutural, ótica e eletrônica, além de que equipamentos de médio e grande porte estão espalhados pelo país tanto em laboratórios associados a grupos de pesquisa como em facilidades multiusuários. Em algumas áreas, como espectroscopia ótica, o país tem infraestrutura de pesquisa que atrai pesquisadores de outros países.

Com a melhoria dos laboratórios da Física Experimental no país e o aumento da maturidade dos físicos, a interação entre teóricos e experimentais tem crescido gradualmente. Pode-se verificar também um aumento da interação dos físicos com engenheiros, químicos e biólogos, através de projetos temáticos na estrutura de redes de pesquisa, o que contribui para o amadurecimento não apenas da FMC, mas também da ciência como um todo no país. Essa integração com outras áreas constitui um dos fatores que podem contribuir para o aumento da relevância do Brasil na área de Física da Matéria Condensada. A internacionalização da pós-graduação e



a participação em projetos de parceria com outros países também é uma estratégia que pode ser utilizada para aumentar a relevância da área em nível internacional.

No Brasil há vários grupos trabalhando em sistemas fortemente correlacionados, em geral, e em supercondutores, em particular, tanto sob o ponto de vista teórico como experimental, mas em número ainda reduzido face ao potencial da área e quando comparado, mesmo em termos proporcionais, com seus similares nos países mais desenvolvidos. Há grupos de pesquisa em supercondutividade nas seguintes instituições: UFRGS, IFUSP, UFSCar, UNESP/Bauru, UNICAMP, UFRJ, UFF, CBPE, PUC/Rio, UFES, UFPE, UFRN, e UFAM. Quanto às aplicações industriais, há muito o que avançar: não se tem notícia de empresas brasileiras interessadas no desenvolvimento de inovações tecnológicas baseadas em materiais supercondutores.

A área de Física computacional, principalmente no que diz respeito à estrutura eletrônica é bem desenvolvida no Brasil, contando com grupos ativos em diversas instituições: USP, Unicamp, UFABC, UFRJ, UFF, UFMG, UFU, UFJF, UFSM, UFC, UNIFRA e UFPA. A comunidade brasileira na área publica em revistas de alto nível e participa ativamente de congressos internacionais. Por outro lado, a estrutura computacional precisa ser melhorada no país: os laboratórios de computação de alto desempenho já estão no limite operacional e, muitas vezes, cálculos que nos países mais desenvolvidos consomem poucos dias de máquina, no Brasil pode levar meses.

## **Relevância para a Sociedade**

A área de física da matéria condensada é importante para a sociedade por conta de seu amplo espectro de atuação e influência sobre várias disciplinas, bem como pelo potencial de gerar produtos com alto valor agregado. Com efeito, no século passado essa disciplina esteve na gênese da revolução na microeletrônica e, no próximo século, estará ocupando posição importante por meio de seus modelos e técnicas para contribuir com

os grandes desafios no que diz respeito a energias renováveis, mudanças climáticas, aplicações biomédicas e desenvolvimentos de novos materiais.

É extremamente importante, ainda, educar a nova geração com ênfase no papel que a FMC desempenha na vida cotidiana. Apenas um número muito limitado de pessoas é capaz de perceber que diversas funções, como as executadas por um computador ou por uma câmera fotográfica, resultam do conhecimento adquirido ao longo de vários anos, onde a contribuição da FMC foi decisiva. A área é responsável por um bom percentual dos pesquisadores formados no país, apesar de que, em termos absolutos, é preciso aumentar o número de pesquisadores formados e incentivar esses pesquisadores para atuar no setor produtivo. Se compararmos com outros países que investem o mesmo percentual do PIB que investimos em ciência e tecnologia, precisamos multiplicar o número de cientistas por cinco.

A FMC é uma das áreas com maior potencial para interagir com outras áreas do conhecimento, pois trata da ciência do mundo material que está à nossa volta: quase tudo com que interagimos corresponde à matéria no estado condensado.

Entender como a matéria responde às variações de temperatura, pressão e aos campos eletromagnéticos, fornece respostas a questões práticas da sociedade moderna e permite avançar o conhecimento da Física por trás dos fenômenos, além de servir como base para uma gama de aplicações tecnológicas em áreas como ciência dos materiais, eletrônica e tecnologias da informação.

### *Formação de Pessoal*

O Brasil tem carência de pessoal em todas as áreas do conhecimento e na FMC não é diferente. Uma das causas reside no fato da carreira científica não ser atrativa para jovens em idade universitária, um fenômeno mundial que será muito difícil de ser revertido em um curto prazo, apesar de o Brasil estar se destacado em olimpíadas internacionais de física, química e matemática. Um dos grandes desafios, no entanto, é criar um currículo que seja ao mesmo tempo denso, como é a física tradicional, mas que também incorpore conceitos de outras áreas para permitir que a nova

geração de pesquisadores possa atuar e ocupar espaço nas interfaces com outras ciências.

A área de Estrutura Eletrônica, por exemplo, tem se mostrado bastante ativa na formação de recursos humanos em todos os níveis. Existe constante fluxo de pesquisadores para colaborações no exterior e a comunidade organiza periodicamente a Escola Brasileira de Estrutura Eletrônica (EBEE), com contribuições importantes na formação de recursos humanos e disseminação da área pelos grupos emergentes no país.

Existe iniciativa similar na área de magnetismo, cujas escolas, periódicas e itinerantes, vêm sendo realizadas com o apoio da SBF. A formação e capacitação de recursos humanos nas áreas da microscopia eletrônica são fundamentais para o desenvolvimento científico e tecnológico no país. Apesar de haver um grande investimento na criação e fortalecimento de centros de microscopia no país, há um consenso quanto à escassez de recursos humanos especializados nesta área.

### *Inovação tecnológica*

A FMC é uma área fortemente dependente do desenvolvimento de instrumentação. Os grandes avanços do conhecimento nessa área foram realizados utilizando condições extremas, sendo três exemplos emblemáticos: o fenômeno da supercondutividade, descoberto por Kammerlingh-Onnes há um século e possível graças ao desenvolvimento do liquefator de Hélio, que permitiu explorar os metais em temperaturas próximas do zero absoluto; a descoberta do efeito Hall quântico fracionário, que foi descoberto quando Tsui, Störmer and Gossard examinavam a condução elétrica de amostras de semicondutores ultrapuros submetidos a altos campos magnéticos; o desenvolvimento do microscópio de varredura por sonda por pesquisadores da IBM no início da década de 80, considerado o marco inicial das nanociências e nanotecnologias.

O país precisa estimular o desenvolvimento da instrumentação científica, pois os problemas ficarão cada vez mais específicos, limitando o papel dos instrumentos comerciais. Além disso, o desenvolvimento de instrumentação científica passará necessariamente pelo trabalho cooperativo

com as engenharias. Nos Estados Unidos, cerca de 6% do investimento em pesquisa é voltado para a instrumentação científica, enquanto no Brasil essa é uma área pouco desenvolvida. Na área de desenvolvimento de novos materiais e dispositivos, o país necessita fomentar pesquisa em temas competitivos, tanto cientificamente quanto tecnologicamente, para não perder oportunidades.

O desenvolvimento de novos materiais, dispositivos e equipamentos deve ser acompanhado de instrumentação científica adequada, além do desenvolvimento de projetos interdisciplinares que envolvam setores da iniciativa privada.

### *Impacto na economia*

A ciência e a tecnologia determinaram o crescimento da economia no passado e vão ser ainda mais relevantes no futuro. Para exemplificar, a indústria da eletrônica, que teve como base a FMC, possui um mercado mundial de 1,5 trilhões de dólares. Energia é uma área que oferece grandes oportunidades de pesquisa para a comunidade de FMC, como na caracterização, desenvolvimento e modelagem de materiais para armazenamento de hidrogênio e no desenvolvimento de novos catalisadores. Na área ambiental, materiais para o sequestro de CO<sub>2</sub> são outro nicho no qual a FMC terá participação decisiva, enquanto na área médica é esperada grande contribuição da FMC em áreas ligadas à diagnóstico e terapêutica. Destacam-se aqui as atividades ligadas à nanotecnologia, onde novos materiais para sensores, marcadores, implantes e fármacos nanoestruturados precisam ser melhores caracterizados e modelados usando as técnicas da FMC.

A realidade brasileira e o atual estágio de desenvolvimento econômico oferecem algumas oportunidades para a comunidade de FMC contribuir com soluções relevantes para a economia do país. Os pesquisadores podem contribuir nas áreas de energia estudando os novos materiais, novos sistemas e realizando simulações computacionais para materiais ligados à cadeia de biocombustíveis e petroquímica. Outra área de oportunidades passa pelo desenvolvimento de materiais avançados à base de carbono usando como fonte a biomassa.

A FMC pode contribuir com o conhecimento experimental e teórico adquirido nos materiais carbonosos para explorar e melhor caracterizar esses novos materiais baseados em tecnologia sustentável. Esses desenvolvimentos impactarão a economia ligada à indústria de polímeros, que será largamente afetada pelo uso de nanotubos de carbono como agente anti-estático ou como reforço estrutural e mecânico.

Dispositivos baseados em materiais multiferróicos, principalmente magnetoelétricos, deverão se tornar comerciais nos próximos anos, com grandes vantagens técnicas e econômicas. Na área de materiais magnéticos para gravação, muito pouco está sendo feito pelas indústrias. Há apenas uma única empresa multinacional (Samsung) montando discos rígidos de computadores no pólo eletro-eletrônico de Manaus. A percepção por parte do setor industrial de que precisa de maior domínio tecnológico e de que a comunidade científico-tecnológica pode contribuir para isto gradualmente tende a mudar este quadro, fazendo-se necessária, portanto, uma maior aproximação entre as instituições de pesquisa e o setor produtivo.

### *Infraestrutura*

O Brasil implementou, nos últimos anos, uma considerável infraestrutura de pesquisa devido ao aumento de investimento em ciência através de grandes projetos, como as redes temáticas, os Institutos do Milênio e, mais recentemente, os Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs). O país conta também com facilidades de maior porte, tais como o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), que disponibiliza para todo o país as facilidades de luz síncrotron e microscopia eletrônica. Existem também facilidades multiusuárias modernas de Microscopia Eletrônica na UFMG, na UFRGS, na UFPR, no CBPF e no INMETRO, entre outras.

Facilidades laboratoriais nas áreas de microscopia eletrônica e espectroscopias óticas são disponibilizadas pelo CETENE, em Recife. Uma das áreas que o Brasil precisa estabelecer com rapidez, no entanto, é a estruturação e o desenvolvimento de laboratórios na área de varredura por sonda, tais como *Near Field Scanning Optical Microscope* (NSOM), que permitirão o

acesso a novos fenômenos, descobertas em nanomateriais e aplicações em outras áreas, como biotecnologia. O país também possui grupos estabelecidos em microscopia e em ótica: a combinação das potencialidades dessas duas áreas são fundamentais para se manter competitivo na área de FMC, principalmente na área de nanomateriais.

A infraestrutura computacional usada pelos pesquisadores da área está dividida em três diferentes níveis: computadores ou pequenos clusters computacionais de uso restrito do grupo ou de seus colaboradores; clusters computacionais de tamanho médio compartilhados por redes de usuários em projetos temáticos; parques computacionais de alto desempenho, como os CENAPAD's. A infraestrutura computacional deve ser ampliada em todos estes níveis, através de projetos de fomento à pesquisa e ampliação do sistema CENAPAD. No âmbito internacional, nos últimos dez anos observaram-se mudanças significativas nas instrumentações dedicadas a microscopia eletrônica, que ocorreram principalmente a partir do uso comercial de corretores de aberração esférica nas lentes eletromagnéticas, monocromadores, dispositivos para o estudo in situ de processos dinâmicos e desenvolvimento de equipamentos com alta resolução espacial em baixa tensão. Estes desenvolvimentos instrumentais estabeleceram um novo patamar para o estado da arte em microscopia eletrônica, impondo novos níveis às capacidades analíticas.

Neste cenário, o Brasil se posiciona em uma situação de relativa desvantagem: o parque de equipamentos dedicados a microscopia eletrônica no país sofreu, nos últimos anos, uma grande renovação e crescimento através do fortalecimento e criação de inúmeros centros de microscopia. Entretanto, muitos desses equipamentos são baseados em tecnologias de quase uma década, com raríssimas exceções, apesar de essa desvantagem instrumental não impor uma perda significativa na qualidade da ciência realizada. Para que esta questão instrumental não seja crítica na qualidade das pesquisas, são necessários investimentos tanto para a aquisição de instrumentos na vanguarda da tecnologia, particularmente para a instalação em centros multiusuários, como na formação de recursos humanos capacitados para seu uso e operação.

## *Inclusão social*

A atividade científica pode ser mais explorada como instrumento de inclusão social no país. As dificuldades estruturais na área social e econômica têm consequências para o desenvolvimento das áreas de ciências exatas. O desinteresse dos estudantes pelas áreas científicas faz com que a área não se desenvolva num patamar alto o suficiente para gerar dividendos à economia.

No modelo econômico vigente no país, a inclusão social depende da força da economia, mas, por outro lado, tanto sua robustez como a riqueza gerada atingem patamares mais elevados quando o conhecimento científico acumulado é agregado ao processo produtivo através de inovações.

O maior contingente de jovens está na escola pública, cuja formação em ciências é muito precária. São inúmeras as avaliações que indicam que a formação científica dos nossos estudantes está muito abaixo do desejado. Os resultados do programa internacional de avaliação de estudantes, realizado em 43 países, colocou o Brasil na 42ª posição nas aptidões científicas. No ensino básico, apenas 0,2% de nossas escolas atingem o perfil daquelas dos países desenvolvidos. Esse cenário é preocupante e contrasta com a 13ª posição em produção científica e a 10ª economia do mundo. Um dos responsáveis pelo aumento da produção científica foi a política adotada pelo país para a pós-graduação, desde a década de 70. O panorama do ensino médio e básico é um grande entrave para continuar o desempenho do país na pós-graduação e representa um grande risco caso medidas não forem tomadas para recrutar jovens na idade universitária para os currículos de ciências duras.

As áreas de ciências duras atraem pouco estudantes talentosos e a baixa procura desses estudantes pela área de Física se deve, em parte, ao fato de que o ensino das ciências exatas em geral não é atrativo, começando pela falta de ênfase sobre o papel dessas áreas no mundo contemporâneo. As ações para sanar esses problemas passam por questões políticas mais complexas, mas a comunidade pode exercer seu papel fazendo a sua parte e sugerindo aos gestores ações simples que podem catalisar iniciativas mais

duradoras e de sucesso. A realização de palestras em escolas de nível fundamental e médio da rede pública e privada, visando a mostrar as conexões entre os conhecimentos gerados pela física e o papel da ciência no desenvolvimento das tecnologias que compramos da prateleira, é uma atividade que a comunidade não pode deixar de fazer. A área de FMC, em particular, está permeada dessas conexões que podem ser exploradas para atrair a atenção e despertar o interesse dos estudantes para a área científica.

Programas de recrutamento de estudantes em escolas públicas e privadas através de bolsas e engajamento da comunidade científica podem ser ações a serem implementadas para incluir cada vez mais jovens, principalmente da escola pública, nas áreas de ciências exatas.

## Recomendações

Sem investimentos para pesquisa básica em FMC e sem expansão do contingente de pesquisadores, o Brasil não irá acompanhar o desenvolvimento da área em relação ao mundo. Alguns setores de estudos possuem lideranças em nível internacional, mas, se não houver investimentos significativos para manutenção desse padrão, esses setores rapidamente perderão competitividade. Diversos pontos merecem ser apontados para garantir o aumento da competitividade da ciência brasileira na área de FMC e para atrair mais jovens para a carreira científica, entre eles:

- Investimento em pequenos grupos de pesquisadores. Na história da FMC, as grandes inovações dessa área têm sido feitas por grupos reduzidos.
- Maior aproximação dos pesquisadores da área com grupos da química de síntese de materiais. Não se pode fazer grandes avanços sem novos materiais.
- Aumento dos laboratórios especializados em fabricação de amostras e dispositivos no país. A matéria condensada não avança sem novos materiais e/ou novos dispositivos.
- Criação, pelas agências de fomento, de métodos mais efetivos para julgar projetos em áreas emergentes e interdisciplinares, para os



quais ainda não existe um quadro de consultores ad hoc estabelecidos na temática.

As agências precisam apostar mais em projetos inovadores e de risco. Apesar do risco, alguns desses projetos podem levar a desenvolvimentos importantes na área.

- Lançamento de editais para fomentar a instalação de novos laboratórios em áreas que ainda precisam se desenvolver com maior rapidez, com ênfase, por exemplo, em fabricação dos metamateriais.
- Ampliação do parque computacional dedicado a estudos por simulações, tanto através de projetos individuais ou temáticos, como na ampliação dos centros de alto desempenho.
- Aproximar a comunidade de FMC de grupos que trabalham na área de genômica estrutural. Essas duas áreas no Brasil estão maduras o suficiente para darem grandes contribuições, tais como na área de novas biomoléculas com potencial terapêutico.
- Atrair pesquisadores estrangeiros para a área de FMC: o Brasil vive uma situação que permite oferecer bolsas competitivas em relação a alguns países desenvolvidos.
- Estimular o aumento da visibilidade da ciência para o público em geral visando a atrair jovens para a carreira científica. A FMC tem a vantagem de ser uma disciplina que trata de problemas atrativos do cotidiano e que, em geral, são de interesse do público.



# Física Médica

*Oswaldo Baffa Filho*

*Denise Maria Zezell*

*Paulo Roberto Costa*

*Ana Maria Marques da Silva*

*Marcelo Baptista de Freitas*

## Sumário Executivo

A Física Médica tem uma longa tradição, que remonta a séculos antes da descoberta dos raios X, por Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895. O profissional físico médico é hoje figura indispensável para o sucesso e a segurança das mais diferentes aplicações das radiações, de lasers e de nanotecnologia em procedimentos da medicina, e os frutos de seu trabalho estão presentes em todos os grandes centros de saúde. Apesar disso, o Brasil se confronta com grandes dificuldades para formar esses profissionais. Não há graduação estruturada para essa carreira em particular, e as oportunidades de pós-graduação são escassas. Diante da falta de divulgação, há até mesmo entre os graduandos em física desinformação sobre as oportunidades de carreira como profissional de saúde. O resultado é o baixo número de físicos médicos atualmente empregados. Estima-se que existam cerca de 500, principalmente localizados no Sul-Sudeste, enquanto a demanda potencial do Brasil seria de 1.800. Além de estruturar a formação desses profissionais, um dos desafios para o futuro é descentralizar e democratizar a presença dos físicos médicos pelo território nacional, permitindo que as tecnologias de última geração em tratamento e diagnóstico possam beneficiar a população menos favorecida. Por fim, é preciso ambicionar o desenvolvimento de pesquisa e inovação com tecnologia nacional, uma vez que hoje esse segmento está todo concentrado no estrangeiro, fomentado por grandes multinacionais que preferem conduzir P&D em seus países de origem.

## Estado da Arte

Área do conhecimento que compreende a aplicação dos conceitos, leis, modelos, agentes e métodos da Física para o diagnóstico e tratamento de diversas doenças, a Física Médica desempenha importante função na assistência médica, na pesquisa biomédica e na proteção radiológica. Ela proporciona a base científica para a compreensão e desenvolvimento de tecnologias modernas que têm revolucionado o diagnóstico e a terapia, estabelecendo os critérios para assegurar a correta e efetiva utilização dos agentes físicos na medicina.

Em colaboração com a bioengenharia, a Física Médica fornece ainda as bases necessárias para a medida das variáveis biomédicas e aporta, ao lado da biofísica, os fundamentos necessários para o desenvolvimento de modelos que explicam o funcionamento do corpo humano.

O físico médico pode atuar como professor de instituição de ensino superior; como pesquisador de centros e instituições, gerando novos conhecimentos e métodos para serem utilizados em diagnóstico, tratamento e processos relacionados à área médica; e trabalhando em centros médicos (clínicas e hospitais), onde atua ao lado de outros profissionais da área de saúde, ou ainda em empresas de desenvolvimento e comercialização de equipamentos médico-hospitalares. Pode trabalhar também em empresas especializadas na prestação de serviços de controle da qualidade de equipamentos de alto teor tecnológico, em projetos de controle da radiação (transporte de material radioativo, cálculo de barreira/proteção radiológica), em institutos controladores e reguladores de radiação ionizante, em órgãos de vigilância sanitária e na indústria de equipamentos de diagnóstico e terapia. Pode ainda ministrar cursos de formação de pessoal técnico qualificado, como técnicos e tecnólogos em radiologia.

O físico médico é indispensável no planejamento radioterápico, no desenvolvimento, controle e emprego de equipamentos como mamógrafos, tomógrafos de raios X, aparelhos de ressonância magnética nuclear, cintilografia e no uso de técnicas que empregam laser, podendo atuar ainda na proteção radiológica de trabalhadores da área de saúde e do público em

geral. O físico médico é responsável pela otimização dos protocolos de aquisição de imagens e dosimetria, garantindo a segurança radiológica dos pacientes e a qualidade diagnóstica das imagens. Ele é capacitado a avaliar, por exemplo, a eficiência de blindagens em setores que utilizam equipamentos com fontes de radiação e, com pós-graduação, pode trabalhar em universidades e centros de pesquisa.

Como o físico médico trabalha sempre com a interdisciplinaridade de áreas, ele necessita de conhecimentos sólidos em física, matemática, informática, química e nas áreas biológicas, principalmente anatomia, fisiologia, biologia celular e tecidual e farmacologia, entre outras disciplinas. No século 16, devido a seus estudos de biomecânica, como a locomoção humana e o movimento do coração e do sangue no sistema cardiovascular, Leonardo da Vinci pode ser considerado o primeiro físico médico em atuação no mundo. Os conhecimentos físicos de óptica possibilitaram a invenção do microscópio, que por sua vez ajudou os médicos a compreenderem melhor as estruturas biológicas, assim como a descobrir a existência dos microorganismos no século 17.

No século 18, o cientista e médico italiano Luigi Galvani descobriu que músculos e células nervosas eram capazes de produzir eletricidade. A partir dessa relação entre eletricidade e corpo humano, e também com o avanço da ciência do eletromagnetismo no século 19, novas contribuições para o tratamento e diagnóstico médico puderam ser feitas por cientistas como D'Arsonval.

Outro exemplo de cientista cujos trabalhos em física e em medicina se confundiam é Hermann von Helmholtz: seu primeiro trabalho foi sobre a conservação de energia, inspirado em seus estudos sobre o metabolismo muscular. Ele também revolucionou o campo da oftalmologia quando inventou o oftalmoscópio e realizou estudos sobre acústica e audição. Um dos últimos objetos de estudo de Helmholtz foi o eletromagnetismo, sendo ele o primeiro a demonstrar a radiação eletromagnética. A descoberta dos raios X pelo alemão Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, é um marco da Física que também teve grande impacto na Medicina.

Além de render-lhe o primeiro Prêmio Nobel de Física, o trabalho de Röntgen abriu caminho para estudos que renderiam o terceiro prêmio, dado a Antoine Henri Becquerel, Pierre e Marie Curie pelas interpretações de resultados sobre as emissões de partículas provenientes de corpos radioativos (radioatividade). Em 1908, por formular hipóteses sobre substâncias radioativas, Ernest Rutherford recebeu o Nobel de Química.

Muitos outros cientistas receberam, em seguida, o prêmio Nobel pelos seus trabalhos com a radioatividade. Apesar de sua utilização na Medicina ser datada desde sua descoberta, com a utilização da substância rádio no tratamento de câncer de pele, os perigos de uma utilização não controlada foram rapidamente evidenciados, com a doença e morte de alguns profissionais da área.

A partir dessa preocupação, foram criadas as primeiras organizações internacionais responsáveis pelas recomendações de proteção radiológica. A utilização de raios X e radioatividade no diagnóstico e na terapia foram responsáveis pela introdução dos físicos em hospitais. Por razões de treinamento médico, o físico e matemático suíço Theophil Friedrich Christen visitou importantes hospitais em Londres e nos Estados Unidos.

Depois de retornar dos EUA, Christen abriu em Berna uma clínica médica, onde se ocupou principalmente da recente Radiologia e se preparou para o exame de habilitação em fisioterapia. Em 1908, diante da Faculdade de Medicina de Berna, na área de Física Médica, defendeu uma tese não convencional para a época: “A Clareza das Chapas Médicas como Problema de Absorção”. Em um hospital em Boston, nos EUA, em 1913, o físico William Duane iniciou um trabalho com fontes de radônio para o tratamento de câncer.

No mesmo ano, outro físico, Sydney Russ, começou a trabalhar no Middlesex Hospital em Londres. Em 1915, por sua vez, Gioacchino Failla, em Nova York, trabalhava no uso de radiações em terapia. Em 1958 com a invenção do MASER (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) por Arthur L. Schawlow e Charles H. Townes, nos laboratórios da empresa Bell, e o conseqüente desenvolvimento do LASER (*light amplification by stimulated emission of radiation*) em 1960 por Theodore H.

Maiman, nos laboratórios da empresa Hughes, um novo campo na ciência se abriu com imensas possibilidades de aplicações nas áreas de saúde.

Diante desses acontecimentos e descobertas estava criada, como área de atuação, a Física Médica. Na década de 50, médicos e profissionais de Física Médica já atuavam em conjunto. Nas décadas de 60 e 70 foram criadas legislações que estabeleceram a presença desse profissional em algumas áreas médicas, como em radioterapia e medicina nuclear. No Brasil, essa área foi mais bem estruturada com a criação, em 1969, da Associação Brasileira de Física Médica (ABFM).

Isso fez com que, atualmente, a Física Médica seja desenvolvida principalmente nas áreas de radiologia diagnóstica e intervencionista, medicina nuclear, radioterapia, radiocirurgia, proteção radiológica, metrologia das radiações, biomagnetismo, radiobiologia, processamento de sinais e imagens biomédicas, clínica e epidemiológica.

A crescente contribuição da Física Médica é uma consequência natural da evolução da ciência moderna e da tecnologia, com grande impacto na saúde da população.

## **Desafios e Perspectivas**

Existem poucos cursos de graduação em Física ou áreas correlatas com currículos enfocando as necessidades dessa especialidade e, para dificultar, um número significativo de profissionais tem atuado em estabelecimentos de saúde sem o treinamento e capacitação prévios adequados em ambiente clínico nessa especialidade.

Por outro lado, a Física Médica é uma área multi e interdisciplinar, sendo essencial que os físicos que nela atuam tenham uma formação voltada para essas características. Esse panorama identifica o primeiro desafio geral a ser vencido: a formação de físicos qualificados para atuarem nessas diferentes áreas e funções.

Os cursos de graduação com essa finalidade devem ter, além de uma base sólida 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 com um treinamento dado sob a supervisão, em um hospital ou clínica, por um ou mais físicos médicos experientes já atuantes na área.

É também importante o estabelecimento de centros de referência e programas de intercâmbio para treinamento de profissionais provenientes de regiões nas quais as novas tecnologias não tenham sido implementadas. Não podemos esquecer a formação de físicos egressos de cursos tradicionais que queiram entrar na área, o que pode ser feito com programas de especialização e treinamento sistematizados em centros clínicos bem equipados e com equipes com profissionais qualificados de várias áreas. Nesse sentido, é imprescindível a abertura de programas de residência multiprofissional em Física Médica, nas suas modalidades tradicionais e nas diversas regiões do país.

Um segundo desafio para os físicos médicos é a educação, principalmente dos diferentes profissionais de saúde como técnicos e tecnólogos em radiologia, 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 procedimentos sempre voltam e há necessidade de uma contínua atenção na educação dos profissionais para que seja garantida a segurança do atendimento aos pacientes e dos próprios trabalhadores expostos à radiação. Se faz necessária, ainda, a divulgação à população em geral 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 associados à radiação.

Quando se consideram os resultados de grupos de pesquisas 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 amplie a formação dos físicos médicos? Como mencionado, essa parceria tem duas vias e ambas devem ser aproveitadas completamente. Em 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. A criação de espaços acadêmicos congregando profissionais, pesquisadores e estudantes de diversas áreas do conhecimento para a troca de experiências profissionais e científicas, seja através de programas de pós-graduação interdisciplinares *stricto* e *lato sensu* nas universidades ou de residência multiprofissional em hospitais, pode contribuir para aumentar a massa crítica em Física Médica e fomentar a geração de conhecimento de vanguarda com vistas a aplicações clínicas.

O quarto desafio envolve a implementação de parcerias entre grupos de pesquisa e fabricantes de equipamentos e/ou empresas de *software* da área da saúde, 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 - principalmente, nas áreas de imagens, proteção radiológica e controle da qualidade - é a instalação de microempresas de desenvolvimento de *software* e de prestação de serviços ou, ainda, fabricantes de equipamentos de menor custo, como os medidores de sinais elétricos e fisiológicos, simuladores e dispositivos para controle de qualidade. Essa alternativa exige outras habilidades que fogem do escopo da formação tradicional dos físicos, necessitando de parcerias com outros profissionais, como engenheiros e administradores.

O quinto desafio é o pequeno número de egressos do ensino médio que optam pela carreira de física e, conseqüentemente, optam pela carreira de físico médico. A carreira de físico médico é ignorada pela maior parte da população, e ainda existe um grande desconhecimento sobre suas áreas de atuação, mesmo entre os físicos.

A lista de desafios não se limita a esses cinco, que são os mais presentes e que requerem reflexões por parte dos físicos. O desenvolvimento desta área é fundamental para o progresso da tecnologia e atendimento em saú-

de no país. Para isso, precisamos fortalecer a profissão de físico médico através do estabelecimento de definições precisas das qualificações de um especialista nessa área; criação de programas de graduação, especialização e pós-graduação na área; estabelecimento de comitês de supervisão de atividades de treinamento. Os objetivos futuros incluem estabelecer a profissão de físico médico como uma das especialidades de uma carreira de física independente, como ocorre com enfermeiros, dentistas, fonoaudiólogos, fisioterapeutas e outros profissionais da área de saúde; definir de forma clara tarefas e responsabilidades do físico médico; estabelecer regulamentos que evitem a atuação de indivíduos sem qualificação.

Do ponto de vista científico, existe um fluxo constante de inovação advinda do desenvolvimento de novos princípios e técnicas na ciência em geral e, em particular, da física, possibilitando que com novas técnicas haja diminuição de custos de tratamento e redução da taxa de mortalidade. Existe uma preocupação constante de diminuir os níveis de exposição às radiações ionizantes nos procedimentos radiológicos, particularmente nos sistemas com captura digital de imagens. O desenvolvimento e uso de equipamentos e modalidades de diagnóstico que possibilitam a obtenção simultânea de imagens anatômicas e funcionais vem crescendo, exigindo novas competências na área. A radioterapia vem passando por uma grande revolução com técnicas conformacionais, terapias guiadas por imagem e futuramente pela fisiopatologia celular.

Medidas ultra-sensíveis de campos magnéticos na ordem de um bilhão de vezes mais fracos que o campo magnético da Terra permite que se estude a atividade cerebral de forma não invasiva. De forma análoga a utilização de métodos ópticos não invasivos vem sendo utilizado no diagnóstico de várias patologias, seja por métodos de imagens, seja por métodos espectroscópicos de fluorescência ou vibracional.

O laser é cada vez mais utilizado em procedimentos médicos e em algumas situações é a única opção de tratamento. Atualmente a remoção de cáries já deixou de ser um procedimento desconfortável e desagradável com o advento de lasers ablativos em tecidos mineralizados. A terapia fotodinâmica antimicrobiana tem sido uma excelente alternativa de tratamento

em medicina bucal e na pele, assim como nos últimos anos lasers ou LEDs de baixa potência têm prevenido e tratado a mucosite (efeito colateral da radioterapia ou quimioterapia), sendo o Brasil líder nessas aplicações clínicas. Além disso, técnicas de dois fótons poderão levar a terapia fotodinâmica para o interior do corpo humano permitindo o tratamento de tumores mais profundos.

As nanopartículas estão na ordem do dia através de agentes de contraste para o trato gastrointestinal e como possíveis carregadores de agentes para o aumento da eficácia da radioterapia, da terapia fotodinâmica antimicrobiana, ou ainda no aumento dos sinais ópticos de espectroscopia Raman ou FTIR para diagnóstico diferencial de microorganismos, células ou neoplasias. A medida de pequenos fluxos sanguíneos só é possível com o laser Doppler, indicando de forma rápida e não invasiva se um tecido está em processo de necrose. As ondas acústicas, através do ultra-som, começam a ser utilizadas para o tratamento de células cancerígenas. A lista é extensa e para que possamos nos manter atualizados, investimentos contínuos e substanciais se fazem necessários.

## **Brasil na Área**

Acredita-se que o mercado de trabalho potencial em Física Médica no Brasil, considerando apenas as áreas tradicionais, está disponível através de aproximadamente: 200 serviços de Medicina Nuclear; 18.000 equipamentos de radiodiagnóstico médico; Milhares de equipamentos de raios X odontológicos; e 215 centros de Radioterapia no país. Estão sendo implementadas por órgãos municipais, estaduais e federais novas normas de operação e controle desses serviços, resultando na abertura de mais oportunidades de trabalho para físicos médicos atuando em empresas e como profissionais liberais. Em Radioterapia há carência de físicos por falta de um número maior de cursos de especialização na área. Os programas de especialização ou residência são praticamente inexistentes em Radiologia e Medicina Nuclear. A Associação Brasileira de Física Médica (ABFM) vem estimulando a formação e execução de programas de residência mé-

dica em Física Médica em hospitais. Foi criado o Título de Especialista da ABFM nas três especialidades tradicionais de atuação do físico médico (Radioterapia, Medicina Nuclear e Radiodiagnóstico), como uma maneira de se avaliar a qualificação de profissionais da área. Até 2009, 324 profissionais já haviam obtido o Título de Especialista da ABFM, sendo 233 em Radioterapia, 61 em Radiodiagnóstico e 30 em Medicina Nuclear.

Esses profissionais exercem suas atividades profissionais em diversos estabelecimentos de saúde, distribuídos por todas as regiões do país, colaborando para manter a qualidade dos serviços de saúde de apoio diagnóstico e terapêutico prestados à população brasileira. Na área de dosimetria pessoal, estima-se que 12 empresas e centros de dosimetria atendem cerca de 50.000 usuários/ano.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (OMS), existe a necessidade de 5 a 20 profissionais de Física Médica por milhão de habitantes. Tomando por base o número médio de 13 profissionais/milhão, necessitamos de aproximadamente 400 profissionais no estado de São Paulo e, no Brasil, um total de 1.800 profissionais na área.

## **Relevância para a Sociedade**

### *Formação de Pessoal*

O Físico Médico deve ser um profissional com sólida formação em Física, conhecedor do método científico, com desenvolvimento da atitude científica como hábito para a busca da verdade científica, de postura ética e preparado para enfrentar novos desafios e buscar soluções de problemas de forma criativa.

O Físico Médico utiliza prioritariamente o instrumental (teórico e/ou experimental) da Física em conexão com outras áreas do saber, como a Biofísica, Medicina, Biologia, Química, Comunicação, Economia, Administração e incontáveis outros campos. Em quaisquer dessas situações, o físico médico passa a atuar de forma conjunta e harmônica com especialistas de outras áreas, tais como químicos, médicos, matemáticos, biólogos, engenheiros e administradores.

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 a indicar futuras patologias causadas por anormalidades em nível molecular. Assim, a colaboração entre biofísicos e físicos médicos pode ser bastante enriquecedora para ambos.

### *Desenvolvimento científico e tecnológico*

A demanda por profissionais qualificados em Física Médica é devida, principalmente, ao avanço tecnológico crescente dos equipamentos utilizados pelo setor da saúde. Tomografia computadorizada, aplicação de laser em tratamentos dermatológicos e estéticos, medicina nuclear e o tratamento radioterápico do câncer, entre outros, são exemplos de áreas que necessitam de um profissional qualificado para sua operacionalização e desenvolvimento. Segundo dados de 2007 da Associação Brasileira de Física Médica, o Brasil tem da ordem de 500 físicos médicos atuantes no mercado de trabalho, principalmente nas grandes capitais do Sul-Sudeste, o que mostra uma carência muito grande de profissionais nas regiões menos demográficas do Brasil. A necessidade da formação de pessoal qualificado é devido à expansão da tecnologia e da instrumentalização dos hospitais e clínicas especializadas, crescente necessidade de formação de físicos com uma visão interdisciplinar, expansão dos cargos de Professores nas IES e IFETS, promoção de uma formação de Física Aplicada a Físicos com capacidade de absorver e desenvolver novas tecnologias.

### *Impacto na economia*

Além das já conhecidas atuações dos físicos médicos em Radiodiagnóstico, Medicina Nuclear, Radioterapia e Radioproteção, existe ainda um número reduzido de profissionais da Física Médica contratados por fabricantes de equipamentos e acessórios em setores de assistência, treinamento e vendas.

Grupos de físicos médicos também formam empresas de consultoria em informática médica, proteção radiológica, bem como controle da qualidade em diversas áreas, e realizam atendimento nas diversas regiões do país.

O desenvolvimento de equipamentos de diagnóstico e terapia com tecnologia nacional, além de dispositivos de controle de qualidade, a preços competitivos internacionalmente, pode gerar divisas ao país e facilitar o acesso da população a procedimentos que hoje têm alto custo para o Sistema Único de Saúde (SUS). A tendência mundial tem sido a de acompanhar a sofisticação das técnicas de diagnóstico e tratamento com o uso de métodos dosimétricos mais precisos, simulações computacionais de feixe e de paciente, desenvolvimento de algoritmos de cálculo mais fiéis à anatomia do paciente e a verificação individual da dose no paciente.

### *Infraestrutura*

A comunidade de físicos médicos brasileiros tem contribuído principalmente na elaboração e execução de programas de controle e garantia da qualidade e de proteção radiológica. Grupos em universidades estão também desenvolvendo pesquisas em processamento de imagens para fins de diagnósticos mais precisos em reconstrução tomográfica, com a inclusão de fatores instrumentais físicos que não são considerados em sistemas comerciais. A ultrassonografia tem tido pesquisas associadas há várias décadas. Porém, devido aos equipamentos clínicos de ultrassonografia serem relativamente inócuos, e bastante fechados pelos fabricantes, quase não se encontram físicos atuando na rotina clínica no Brasil. Existem grupos no país, principalmente em universidades, realizando pesquisas de 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.

Os grupos de ressonância magnética do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (campus São Carlos) e da Universidade Federal de Pernambuco foram pioneiros ao construir seus próprios tomógrafos de baixo campo magnético. Com isso, eles mostraram que é possível desenvolver tecnologia própria nessa área em que dominam os fabrican-

tes multinacionais. Atualmente, esses e outros grupos associados têm se dedicado à melhoria dos tomógrafos e à construção de bobinas específicas, assim como à sequência de pulsos para a extração de informações que não são fornecidas pelos sistemas comerciais, dentro de um ambiente mais acadêmico do que clínico. O físico na área de radioterapia no Brasil não costuma atuar como pesquisador, pois a pesquisa continua atrelada a empresas estrangeiras. Porém, dentro de um serviço de radioterapia, sua tarefa é de 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 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 de tratamento, o controle da qualidade deve ser muito rígido, e a verificação da entrega da dose aos pacientes tem papel de destaque.

Das rotinas das radioterapias, no Brasil, realizam-se somente a dosimetria do feixe no ar e em simuladores homogêneos. Há situações ainda raras em que a parceria de clínicas de radioterapia com universidades e institutos de pesquisa resulta em desenvolvimento de novas técnicas radioterápicas ou dosimétricas, por iniciativa individual de algum físico médico ou médico que deseja avaliar um novo tratamento ou equipamento. Muitas pesquisas extremamente cuidadosas devem ser realizadas para verificar a existência de uma correlação entre as radiações não ionizantes e os efeitos carcinogênicos. No caso da radiação ultravioleta, é preciso estabelecer metas de esclarecimento do público para evitar exposições excessivas ou mesmo artificiais com propósitos de bronzeamento.

No Brasil, existem pesquisadores estudando os efeitos das radiações não ionizantes e diversos grupos se dedicando ao desenvolvimento de equipamentos e novos processos diagnósticos e terapêuticos para aplicações de lasers em odontologia, oftalmologia, dermatologia e em terapia fotodinâmica.

## *Inclusão social*

A inclusão social no contexto da Física Médica pode ser definida como “universalizar o acesso de toda a população aos bens e serviços que garantam qualidade de vida ao cidadão”.

Nesse contexto, o desenvolvimento da Física Médica no Brasil possibilitaria a propagação de técnicas de terapia e diagnóstico por todas as regiões do território nacional e classes sociais, atingindo inclusive as regiões e classes menos favorecidas, com a garantia da qualidade e da segurança a todos os envolvidos no processo.

Os programas de residência, aprimoramento ou especialização em andamento na área, caracterizados pelo treinamento em serviço com supervisão de profissionais capacitados, reforçam a vocação do físico médico como profissional da área da saúde.

Hoje, somente grandes hospitais possuem tecnologia suficiente para oferecer a seus pacientes um melhor tratamento e técnicas de diagnóstico por imagens de maior complexidade. A maioria dos grandes hospitais é particular e somente as classes altas da sociedade usufruem dos benefícios oriundos das novas tecnologias em Física Médica. Os hospitais públicos possuem um grande número de pacientes a serem tratados, o que acaba por gerar uma sobrecarga na execução de tratamentos.

O aumento de Físicos Médicos no mercado de trabalho brasileiro poderia então facilitar o desenvolvimento de tecnologias nacionais mais baratas em relação às importadas, além de fornecer mão de obra qualificada para o monitoramento dos equipamentos, terapias e diagnósticos, garantindo assim que os benefícios da tecnologia na saúde alcancem a todos, com segurança e qualidade.

## **Recomendações**

- Qualificar os cursos de graduação em Física Médica no Brasil, garantindo a realização de estágios em hospitais e clínicas com profissionais qualificados.
- Capacitar os físicos médicos através de cursos de pós-graduação.



- Ampliar o número de cursos de pós-graduação em Física Médica nas diversas áreas.
- Estabelecer metas para o cumprimento das normas e leis que determinam a presença de físicos médicos qualificados em hospitais e clínicas.
- Ampliar a divulgação das áreas de atuação do físico médico e sua importância na segurança dos pacientes e trabalhadores da saúde, assim como a garantia da qualidade dos serviços.
- Integrar o físico médico às profissões da área da saúde.
- Reconhecer a Física Médica como área do conhecimento em saúde.
- Aumentar os esforços para a descentralização das atividades de Física Médica.



# Física Nuclear e Aplicações

*Alinka Lépine-Szilý*

*Carlos Roberto Appoloni*

*Alexandre Alarcon dos Passos Suaide*

*Brett Vern Carlson*

*Paulo Roberto Silveira Gomes*

## Sumário Executivo

A Física Nuclear tem por objetivo compreender as propriedades dos núcleos atômicos e de seus componentes. Nesse contexto, ela é importante desde os esforços para elucidar as partículas mais fundamentais, como os quarks, até as tentativas de descrever alguns dos eventos mais marcantes da história do Universo, como as supernovas. Mas igualmente relevante é o papel que a Física Nuclear exerce hoje na vida cotidiana, com imenso potencial para a inovação tecnológica.

Esforços mundiais de grande magnitude têm sido feitos no sentido de elucidar esses problemas, inclusive no LHC (*Large Hadron Collider*), acelerador do CERN que conta com experimentos envolvendo grupos brasileiros.

No Brasil, a referência em termos de instalações é o Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN), localizado no IFUSP. Por essa razão, a maior parte dos pesquisadores teóricos e experimentais da área está localizada na região Sudeste. Mas ainda faltam investimentos para a conclusão do LINAC, um pós-acelerador a ser instalado no LAFN.

Além disso, os atuais grupos de pesquisa precisam de novos recursos para a expansão de suas equipes. Estima-se que a área exija de 10 a 15 contratos novos por ano, durante os próximos cinco anos. Cerca de 70% dessas vagas devem ir para a área experimental.

## Estado da Arte

O papel original da Física Nuclear, que tem como objetivo a investigação da origem, evolução, estrutura e fases da matéria nuclear de interação forte, é buscar a compreensão das propriedades dos núcleos e de seus componentes. A Física Nuclear tem ampliado tanto seus horizontes que hoje seu alcance se estende desde as partículas mais fundamentais, como os quarks, até gigantescas estruturas do universo, como as supernovas.

Os fenômenos nucleares estão relacionados a um enorme intervalo de energia e às mais diversas escalas de comprimento. Para responder a essas e outras diversas questões-chave, a comunidade internacional de Física Nuclear desenvolve um amplo programa de esforço experimental e teórico por meio de um consenso internacional sobre a importância dessas questões. Um dos objetivos primordiais da Física Nuclear é desenvolver uma teoria completa e preditiva dos núcleos complexos. Isto levou, em todo mundo, ao desenvolvimento de feixes radioativos de alta qualidade que permitem passar da imagem unidimensional, onde somente a massa do núcleo variava, à imagem bidimensional, onde tanto o número de prótons como de nêutrons pode variar sobre uma grande extensão. Feixes radioativos podem ser obtidos pela fragmentação em voo ou pelo processo “*Isotope Separation On-Line*” (ISOL). Existem hoje várias instalações dos dois tipos operando em vários países, como Alemanha, França, Estados Unidos, Japão, Suíça e Canadá. Na Universidade de São Paulo (USP), no Brasil, está em funcionamento, desde 2004, o sistema de duplo solenóide supercondutor RIBRAS (*Radioactive Ion Beams in Brazil*), que é a primeira instalação experimental no Hemisfério Sul a permitir a produção de feixes radioativos leves e de baixa energia.

Outro objetivo central da Física Nuclear é explicar a origem e a abundância da matéria no Universo. A astrofísica nuclear, por outro lado, responde às questões fundamentais, tais como a origem dos elementos; o mecanismo do colapso do caroço nas supernovas; a estrutura e esfriamento de estrelas de nêutrons e a presença de matéria estranha; a origem, aceleração e interações dos raios cósmicos mais energéticos; e a natureza de fontes de

raios gama galácticos e extragalácticos. A astrofísica nuclear teve enorme progresso com as observações e modelagens astronômicas. A comunidade de Física Nuclear tem contribuído diretamente para um melhor entendimento da astrofísica, tanto com relação à nucleossíntese, como com relação ao processo de evolução estelar. A descoberta de que os nucleons são, na realidade, sistemas compostos redirecionou o interesse de muitos físicos nucleares para a investigação dos graus de liberdade de quarks e, com isso, atualmente os domínios da pesquisa da física nuclear e da física das partículas elementares se tornaram interligados, dando origem à Física de Hádrons. Lev Landau propôs a existência de estrelas de nêutrons depois que os nêutrons foram descobertos por Sir James Chadwick, em 1932. Em 1934 sugeriu-se que as estrelas de nêutrons eram formadas depois de uma explosão de supernova, o que acontece quando o caroço de uma estrela muito massiva sofre um colapso gravitacional.

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 10 vezes a observada em núcleos comuns. Nessas densidades, os efeitos relativísticos são certamente importantes e é interessante observar que, na área de Física de Hádrons, 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, uma vez que os parâmetros livres da teoria sejam convenientemente ajustados. Muito trabalho tem sido realizado na direção de entender melhor a evolução e as propriedades estelares e sua direta correlação com propriedades nucleares, como, por exemplo, a pele de nêutrons e a fase pasta, possivelmente existente na crosta dos objetos compactos.

Cabe mencionar ainda que uma nova era se abriu na astrofísica nuclear com o advento das instalações produtoras de feixes radioativos, pois esses núcleos de vida média curta podem ter enorme importância em reações relevantes à astrofísica. As medidas relevantes incluem processos de captura, a determinação de massas, vidas médias e estrutura de núcleos exóticos que ocorrem em ambientes estelares cataclísmicos. O Brasil também tem um programa de pesquisa em astrofísica nuclear com o uso de feixes radio-

ativos do RIBRAS. Nessa área de estrutura, dinâmica e astrofísica nuclear, mesmo laboratórios de baixa energia como o Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN), situado na USP, podem contribuir significativamente, e existem vários exemplos de laboratórios muito ativos e reconhecidos na área com alcance de energia comparável a esse.

## Desafios e Perspectivas

Atualmente existem respostas parciais sobre a distribuição e movimento de quarks nos nucleons, que são partículas compostas de quarks e glúons, e o Prêmio Nobel de Física de 2004 foi concedido pela descoberta da liberdade assintótica no contexto de cromodinâmica quântica (QCD) perturbativa. No entanto, a QCD permanece não solúvel no regime de confinamento onde o acoplamento é demasiadamente intenso para permitir o uso de métodos perturbativos. Experiências estão sendo realizadas para fazer comparações com previsões da QCD em instalações nos EUA, no Japão e na Europa, em particular os laboratórios ainda em construção de J-PARC em KEK (Japão), FAIR em GSI (Alemanha) e o “*upgrade*” para 12 GeV do *Jefferson Lab* (EUA). Eles foram todos desenhados para responder essas questões em detalhe. No Brasil, vários grupos teóricos ativos estão trabalhando nesta área (IFUSP, IFT-UNESP, ITA, UFSC).

Núcleos são a manifestação mais importante da matéria nuclear, pois eles representam 99,9% da matéria visível no universo. Hoje sabemos que a matéria escura e a energia escura são preponderantes no cosmos. A matéria nuclear também pode ser aquecida, absorvendo energia em colisões relativísticas. Nesse caso, temperaturas similares àquelas dos primeiros momentos após o *Big Bang* podem ser atingidas, e a matéria nuclear, nesse regime, estudada. A principal motivação no estudo de colisões entre íons pesados relativísticos é a de entender a equação de estado da matéria nuclear. Em energias de excitação mais elevadas, os nucleons são excitados em estados ressonantes bariônicos, seguindo de produção de partículas e formação de ressonâncias hadrônicas. Em colisões de íons-pesados, espera-se que essas excitações sejam capazes de criar matéria hadrônica. Em algumas

dessas colisões ocorre uma transição de fase para o estado nos quais quarks e glúons encontram-se desconfinados. Esse estado é chamado de plasma de quarks e glúons (QGP, do Inglês, *Quark Gluon Plasma*). A formação desse plasma é o objetivo principal de experimentos envolvendo íons-pesados relativísticos e, para esse propósito, foram construídos o colisor RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), que está em operação desde o ano 2000, e o LHC (*Large Hadron Colider*), no Cern, que iniciou sua operação em 2008.

No LHC, o experimento ALICE possui seu foco principal no estudo do plasma de quarks e glúons. O RHIC, além de explorar a fundo as propriedades da matéria nuclear em temperaturas extremas, possui um amplo programa dedicado ao estudo da origem do spin dos nucleons. Há grupos ativos no IFUSP e na UNICAMP que participam de experiências no RHIC (experimentos STAR e PHENIX) e que estão também envolvidos com experimentos no LHC. Também há diversos grupos teóricos trabalhando nesta área (IFUSP, IFT-UNESP) e, apesar do grande interesse na observação e no estudo aprofundado do QGP, a caracterização das várias fases do material nuclear que sucedem as colisões é igualmente importante. Essa caracterização é feita através de um grande número de diferentes análises que se complementam e fornecem a base para a compreensão desse cenário.

O Modelo Padrão foi testado com muitas experiências de precisão, mas ainda é considerado incompleto. Ele é incapaz de explicar a predominância de matéria sobre a antimatéria existente no universo. Existe uma grande atividade experimental à procura de sinais de violação de Invariância de Reversão Temporal (TRI) nas propriedades de mésons, nêutrons e átomos. O Modelo Padrão também não explica a massa de neutrinos indicada pela sua oscilação. Laboratórios subterrâneos, que procuram o decaimento do próton, o decaimento beta duplo sem neutrino, e a matéria escura, têm uma importância enorme na solução desses problemas.

A natureza de forças “super-fracas” desapareceu quando o universo esfriou. Tanto experiências de Física de Partículas Elementares como de Física Nuclear estão à procura de indicações da existência dessas forças nos

momentos iniciais do *Big Bang*. Medidas de violação de paridade atômica em experimentos com armadilhas usando feixes de núcleos radioativos constituem outra opção nuclear para testar o Modelo Padrão. Essas medidas necessitam de grande precisão e demandam grande tempo de uso de feixe acelerado.

O Laboratório Aberto de Física Nuclear possui feixes radioativos de baixa energia e bastante tempo disponível de utilização de feixe. Se os feixes forem freados, poderiam ser armazenados em armadilha, permitindo seu uso para medidas de alta precisão de violação de paridade e outros fins. Essa linha de pesquisa está sendo planejada em colaboração com pesquisadores do Laboratório TRIUMF. O Modelo Padrão também não explica a existência da matéria escura e energia escura e não incorpora a força da gravidade.

## **Brasil na Área**

A comunidade de Física Nuclear no Brasil atualmente é constituída de 107 doutores experimentais, dos quais 89 com emprego permanente e 18 pós-docs; 127 estudantes de pós-graduação experimentais e 38 técnicos e engenheiros. Conta ainda com 107 doutores teóricos, dos quais 89 com emprego permanente, 18 pós-docs e 111 estudantes de pós-graduação teóricos.

A maior parte dessa comunidade científica encontra-se no Estado de São Paulo (80% da pesquisa experimental e 35% da teórica), em razão da localização dos aceleradores. No Instituto de Física da USP são 42 doutores, dos quais 31 experimentais, e 80 estudantes de pós-graduação (58 experimentais). São 16 pós-docs, sendo 8 experimentais e 8 teóricos. No Instituto de Física Teórica da UNESP existem 6 pesquisadores doutores teóricos, 3 pós-docs e 12 estudantes de pós-graduação.

No ITA, em São José dos Campos, trabalham 4 doutores teóricos e 9 estudantes de pós-graduação. Na UNICAMP, trabalham 15 doutores com posição fixa, dos quais 10 experimentais e 14 estudantes de pós-graduação. A Universidade de Sorocaba (UNISO) possui um doutor experimental e



um aluno de pós-graduação trabalhando em física nuclear e suas aplicações na área de ensaios não destrutivos. No Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da UNESP, em Botucatu, existem 3 docentes doutores que trabalham com física nuclear e suas aplicações a medicina.

Além dos números citados, todos correspondentes a universidades, existe o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), onde há atividades de pesquisa básica, aplicada e de instrumentação executadas por 15 pesquisadores doutores experimentais, 37 estudantes de pós-graduação (experimentais) e 6 pós-docs, também experimentais.

## **Relevância para a Sociedade**

### *Formação de Pessoal*

A formação de recursos humanos na área de Física Nuclear é de grande importância para que o país continue a dominar a tecnologia nuclear. Assim sendo, a parte educacional desempenha um papel importantíssimo dentro das atividades em Física Nuclear, cuja área apresenta características que a distingue das outras áreas da física: um forte componente experimental, aplicado e tecnológico, que requer uma sólida formação em física básica. O papel da Física Nuclear teórica nas nossas instituições deve ser também enfatizado, tanto na formação dos estudantes como na contribuição para a formulação de questões de fronteira, que por sua vez realimentam, em uma cooperação saudável, as atividades experimentais. É importante mencionar que a busca por novas tecnologias só pode ocorrer desde que a capacitação dos alunos esteja amparada nos fundamentos acima mencionados e, portanto, naturalmente inserida em programas de pós-graduação em Física Nuclear.

### *Desenvolvimento científico e tecnológico*

Os estudantes que trabalham dentro de um laboratório de Física Nuclear podem se envolver com o projeto, a construção e a manutenção de equipamentos experimentais sofisticados, além de utilizá-los para a pesquisa, tendo contato com a tomada de dados experimentais e interpretação dos

resultados. Os estudantes aprendem técnicas modernas e fazem contribuições significativas para os programas de pesquisa. A excelente formação adquirida com essas atividades garante a geração dos futuros líderes científicos das ciências nucleares e de outras atividades de importância para o desenvolvimento tecnológico. Para os próximos cinco anos há uma intensa necessidade de contratação dos pós-doutores atualmente existentes e de um número apreciável de novos doutores. Em face do número grande de instituições e do tamanho variado dos grupos de pesquisa estimamos que a área necessita de 10 a 15 contratos novos por ano (70% deles na área experimental).

### *Produtos e serviços*

Os vários desenvolvimentos tecnológicos que têm origem na pesquisa em Física Nuclear desempenham um papel importante em um número imenso de aplicações práticas. A energia nuclear constitui-se numa fundamental componente da política energética, sendo que o desenvolvimento de novos conceitos em reatores de fissão poderá resultar em reatores ainda mais eficientes e seguros. Técnicas nucleares vêm sendo largamente aplicadas em diagnóstico e tratamento de doenças, por meio da Radiologia Diagnóstica, Radioterapia e Medicina Nuclear. Para citar apenas alguns dentre os muitos exemplos: terapia de câncer com prótons ou com feixes de íons pesados ( $^{12}\text{C}$ , por exemplo), imagens por ressonância magnética, tomografia por emissão de pósitrons (PET) para gerar imagens de funções do cérebro, uso de iodo radioativo como traçador do funcionamento da tireóide.

Os radioisótopos também são utilizados como traçadores em pesquisas relacionadas aos mais variados campos como Genética, Fisiologia, Botânica etc. Na agricultura, novas variedades de plantas com características melhoradas vêm sendo criadas por meio do processo de mutação induzida pela radiação. A excepcional sensibilidade das técnicas nucleares analíticas tem sido utilizada para o estudo estratégico do meio ambiente, como em pesquisas de poluição do ar, bem como em Arqueologia, por exemplo, na datação de objetos, em Biologia, Química e Odontologia.

O uso de aceleradores nucleares também encontra importantes aplicações na indústria. Feixes de partículas carregadas e raios gama, por exemplo, são utilizados na esterilização de alimentos, na determinação da composição e das propriedades de materiais etc. Além disso, o desenvolvimento da pesquisa em Física Nuclear, por meio de novas e sofisticadas técnicas experimentais, também propicia inovações tecnológicas não propriamente na área de Física Nuclear. Assim, inovações em tecnologia do vácuo ou em criogenia muitas vezes decorrem da pesquisa em Física Nuclear. Com o crescente desenvolvimento de tecnologias, espera-se que novas e importantes aplicações continuem surgindo, consolidando cada vez mais a contribuição da Física Nuclear para o desenvolvimento e bem estar da sociedade.

### *Inovação tecnológica*

Para o desenvolvimento de projetos experimentais em Física Nuclear é necessário o projeto e a construção de equipamentos de ponta, que serão os embriões que contribuirão significativamente para o desenvolvimento do parque de instrumentação científica do país, desde avanços significativos em áreas como eletrônica e novos materiais, chegando a equipamentos supercondutores. O desenvolvimento da informática nacional teve início em um laboratório de Física Nuclear Básica. Claramente, a importância da área para o conhecimento básico da natureza, sua relevância na produção de energia, sua abrangência interdisciplinar e a ampla gama de aplicações práticas em tão diferentes áreas, a torna uma área de extrema importância estratégica para o país.

### *Infraestrutura*

O Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) é o único laboratório no Brasil com acelerador voltado à pesquisa básica em Física Nuclear e produzindo feixes estáveis e

radioativos com energias maiores que a barreira Coulombiana, tornando possível o estudo dos efeitos da interação nuclear. Na área de estrutura e dinâmica nuclear e astrofísica nuclear, mesmo laboratórios de baixa energia, como o nosso LAFN, podem contribuir significativamente.

Existem atualmente, em todo o mundo, 30 laboratórios em atividade com aceleradores de energia comparável a nossa, mas destes apenas 10 possuem feixes radioativos. O LAFN é localizado no Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da USP e tem como principal equipamento o Acelerador eletrostático Tandem Pelletron 8UD, que permite produzir feixes de íons leves e pesados com energias até 3-5 MeV/nucleon e conta com um grande complexo de instalações que atende a um expressivo conjunto de pesquisadores e estudantes de mestrado, doutorado e pós-doutorado, além de programas de iniciação científica.

A Física Nuclear sempre fez uso intenso de sistemas computacionais de alto desempenho e tradicionalmente vem desempenhando um papel pioneiro no uso de novas tecnologias no Brasil, tanto no que se refere a sistemas de aquisição de dados como em ferramentas para processamento e análise dos mesmos.

No início dos anos de 1990, com a popularização e barateamento de computadores pessoais, tanto a aquisição quanto análise de dados em baixas energias migraram dos mainframes centralizados para essa nova arquitetura, propiciando maior eficiência e capacidade de atualização.

O Departamento de Física Nuclear (DFN) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) sempre foi uma das referências no Brasil para sistemas de aquisição e análise de dados em Física Nuclear de baixas energias e vem continuamente desenvolvendo novas ferramentas para esses fins.

Por outro lado, reações nucleares de altas energias, com o início de operação dos grandes laboratórios, é uma área que demanda elevado poder de processamento e capacidade de armazenamento de dados. Para suprir essas necessidades, está instalado no DFN o SAMPA (Sistema de Análise e Multi-Processamento Avançado), que consiste de um cluster de computadores.

Esse sistema é dedicado para análise e processamento de dados dos experimentos STAR (RHIC) e ALICE (LHC). A comunicação com o LHC ocorre por meio de tecnologia de GRID computacional, colocando a Física Nuclear, mais uma vez, na vanguarda da tecnologia de informação.

Sistemas similares, de menor porte, estão sendo montados na UNICAMP, na UFSC, no CBPF e na UERJ.

Alem de contribuir para o processamento e análise de dados de grandes experimentos, sistemas desse tipo permitem o treinamento em nível elevado de uma nova geração de profissionais de informação e físicos, que usarão esses conhecimentos para agregar novas tecnologias na iniciativa privada. Isso porque os desenvolvimentos tecnológicos atuais e futuros exigem cada vez mais uma população bem informada e com uma razoável base científica.

A sociedade tende a aceitar e incentivar as pesquisas básicas quando há uma expectativa dos benefícios que elas podem trazer. É, portanto, importante que se trabalhe para divulgar a ciência e em particular a Física Nuclear, atuando em maior proximidade da população, como, por exemplo, por meio da promoção de palestras de divulgação científica e atividades para professores de ensino médio.

### *Inclusão social*

As diversas aplicações da Física Nuclear já descritas anteriormente, como nas áreas da Produção de Energia, Saúde, Meio Ambiente, Tecnologia de Alimentos e Caracterização de Materiais, tornam essa área uma das que mais podem melhorar o perfil da inclusão social no Brasil. A área de Física Nuclear no país é bem diversificada e várias das sub-áreas específicas são desenvolvidas.

Existem diversos projetos importantes em andamento e a prioridade para os próximos anos deve ser a conclusão de projetos em andamento e a manutenção de infra-estrutura existente. A comunidade científica brasileira atuante nas áreas relacionadas ao tema astrofísica nuclear tem grande interesse em formar uma Rede de Estrelas Compactas no Brasil e, para tal, precisará do apoio financeiro das agências de fomento brasileiras. Atualmente, essa comunidade faz parte da CompStar apenas como participante externa, mas pretende integrá-la de forma oficial para ter direito ao envio de estudantes a Europa com apoio contínuo e não esporádico, como acontece no momento.

## Recomendações

- Conclusão do acelerador LINAC da USP, a ser utilizado como um pós-acelerador do atual Pelletron. Esse projeto foi iniciado pelo professor Oscar Sala no fim dos anos 1980. O prédio foi construído no fim dos anos 1990 e a maior parte das componentes comprada e entregue na mesma época. No entanto, sua montagem avança muito lentamente, provocando descrença na comunidade de físicos nucleares, principalmente os diretamente interessados em sua utilização. Uma renovação na gestão motivaria mais pessoas a participar de forma mais ativa na instalação e finalização desse projeto. Isso poderia também renovar o entusiasmo da comunidade científica, motivando assim as entidades financiadoras a dar o apoio final que esse projeto necessita. Com o LINAC em funcionamento poderemos aumentar a energia e as massas dos feixes acelerados, permitindo produzir um maior número de reações nucleares de interesse. Também poderemos produzir feixes radioativos secundários mais energéticos e com maior variedade de isótopos. A maioria dos Laboratórios de Física Nuclear de baixas energias tem projetos já concretizados, ou em andamento, de aumento de energia através da construção de pós-aceleradores lineares (Legnaro, Canberra, Florida State, TRIUMF-Vancouver, REX-Isolde no CERN). A finalização desse pós-acelerador é um passo absolutamente necessário e dentro das tendências atuais da Física Nuclear. A conjugação das duas instalações, LINAC e RIBRAS, abrirão perspectivas excelentes de pesquisa para o laboratório, tornando o LAFN mais competitivo no cenário mundial e permitindo o desenvolvimento de uma produção científica de excelente qualidade com um custo relativamente baixo.
- Conclusão do acelerador Microton da USP. A conclusão da Acelerador Microtron é fundamental para manter viva uma linha de pesquisa (processos de interação de elétrons e fótons com a matéria) que já deu muitos frutos e que tem longa tradição no Brasil e que, além do interesse acadêmico, é fundamental em áreas como radioterapia, diagnóstico médico e em certas aplicações ao estudo de materiais. Assim, o plano integra aspectos instrumentais, que

garantirão a caracterização do feixe e boas condições experimentais, com estudos acerca dos processos de interação de elétrons e fótons com a matéria, tanto nos seus aspectos nucleares quanto atômicos.

- Continuidade e ampliação da participação brasileira nas grandes colaborações em Física Nuclear e Altas Energias. Vários grupos de pesquisa experimental no Brasil participam de colaborações em aceleradores de íons-relativísticos como RHIC e LHC com foco no estudo da matéria nuclear em condições extremas. Esses grupos estabeleceram, na última década, importante reconhecimento internacional para o Brasil nessa área de pesquisa, participando ativamente do desenvolvimento de infraestrutura para execução desses experimentos. Recentemente, o MCT criou a RENAFEA (Rede Nacional de Física de Altas Energias) visando, principalmente, a manutenção desses grupos de pesquisa nesses experimentos e maior inserção da comunidade científica no cenário internacional de física de altas energias. É importante a manutenção dessa rede e sua expansão, tanto no aspecto orçamentário quanto logístico, propiciando o surgimento de novos grupos experimentais e teóricos nessa área. Além disso, seria interessante a criação de mecanismos mais dinâmicos para o estabelecimento de convênios bi-laterais entre centros de excelência no Brasil e exterior, propiciando um maior intercâmbio científico e tecnológico. É importante, também, a criação de infra-estrutura local, como laboratórios dedicados à instrumentação em física nuclear de altas energias e ampliação e criação de centros de processamento de dados de alto desempenho são fundamentais para consolidar o Brasil como participante importante desses grandes empreendimentos.
- Continuidade, ampliação e financiamento de atividades em Física Nuclear Aplicada desenvolvidas por diversos grupos brasileiros, com interesse tecnológico e em diversos outros ramos da ciência básica. Dentre as técnicas a serem desenvolvidas destacam-se a de Espectrometria de Massa com Aceleradores, com o laboratório que está sendo implantado na UFF, Espectrometria de Raios Gama nos laboratórios LFNA da UEL, LARA da UFF e do CENA/ USP, transmissão e espalhamento de raios X e gama para análise de ma-

teriais como no LFNA da UEL e LIN da COPPE/UFRJ. As metodologias não destrutivas e não invasivas atômico-nucleares, em especial as portáteis, são muito importantes, inclusive pelo enorme potencial de aplicação na área industrial e tecnológica, amplamente exploradas nos países desenvolvidos, mas ainda incipientes no Brasil. Existem duas grandes categorias de metodologias, aquelas com aceleradores e aquelas que não empregam aceleradores nucleares. Mesmo dentre aquelas técnicas que não usam aceleradores, existem instalações que são ordens de grandeza mais caras que outras. Desta forma, sugere-se que editais específicos para projetos de Física Nuclear Aplicada sejam anualmente abertos pela FINEP ou CNPq, contemplando duas magnitudes de valores, uma de até uma centena de milhares de reais e outra de até muitas centenas de milhares de reais, para que os vários grupos de pesquisa ou rede de grupos de pesquisa na área aplicada possam criar ou atualizar a infraestrutura de equipamentos e materiais necessários.

- Ampliação de cursos de extensão em todo o país para formação de recursos humanos e capacitação de pessoal para trabalhar em diversas das aplicações da Física Nuclear, como para subsidiar o novo desenvolvimento do programa brasileiro de energia nuclear que visualiza-se ser estratégico para o país e, atualmente, é encarada por ficologistas como a solução mais viável para produção em larga escala de energia, sem agressão ao meio ambiente; aplicações médicas, cada vez mais difundidas na vida cotidiana de nossos cidadãos; aplicações em agricultura; testes não destrutivos em várias áreas, etc. O país tem enorme carência de formação adequada do pessoal que trabalha nestas áreas e a comunidade de Física Nuclear tem condições de suprir esta carência através de engajamento em projetos bem estruturados.
- Ampliação e financiamento de atividades computacionais ligadas aos grupos teóricos, principalmente as simulações de evolução estelar na área de astrofísica nuclear e cálculos de Monte Carlo para estudar colisões de íons pesados e modelos hidrodinâmicos. A contratação de técnicos de informática para uma gestão eficiente de clusters tornou-se uma necessidade prioritária.



- Estabelecimento de colaborações multilaterais com outros países da América Latina em Física Nuclear. Na recente conferência “*VIII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications*” em Santiago, Chile, Dez. 15-19, 2009, foi fundada a Associação Latinoamericana de Física Nuclear e suas Aplicações (ALAFNA) cujos objetivos são: Fortalecer vínculos entre as comunidades latinas americanas que realizam pesquisa em física nuclear e suas aplicações para fomentar a colaboração e promoção de suas atividades; Contribuir à educação da comunidade científica e do público através da promoção da física nuclear e os usos pacíficos da tecnologia nuclear; Avaliar periodicamente o desenvolvimento das ciências nucleares na América Latina dentro do contexto de atividades a nível mundial; e Discutir a nível multinacional a planificação futura de atividades relacionadas com as ciências nucleares na América Latina.
- Estabelecimento de colaborações internacionais com a CompStar, uma rede européia mantida pela “*European Science Foundation*”, que teve início em 2008 (<http://compstaresf.org>). Essa rede congrega cientistas de vários grupos e de dez países da Europa, envolvidos em áreas correlacionadas com física da matéria hadrônica em condições extremas, astrofísica e relatividade geral. Os principais objetivos da rede são: Coordenar esforços para se avançar no entendimento de objetos estelares compactos em todos os estágios de sua evolução, desde a sua formação a partir de uma explosão de supernova até o momento do seu completo resfriamento e evolução de objetos compactos; e Promover eventos com a participação de cientistas de renome na área e atividades voltadas à formação de jovens cientistas, aberta aos campos interdisciplinares das comunidades envolvidas.



# Pesquisa em Ensino de Física

*Anna Maria Pessoa de Carvalho*

*Roberto Nardi*

*Deise Miranda Vianna*

*Maria Jose P. Monteiro de Almeida*

*Laércio Ferracioli*

## Sumário Executivo

A Pesquisa em Ensino de Física nasceu no Brasil de instituições que, num primeiro momento, tinham como objetivo implementar o uso de recursos didáticos desenvolvidos no exterior para o Ensino Básico de Ciências. Na década de 1960, foram criados os Centros de Treinamento de Professores de Ciências em Porto Alegre, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador e Recife.

Alguns anos depois, vários desses órgãos tiveram suas atividades encerradas, e muitos professores migraram para as universidades, dando origem a grupos de pesquisa em ensino e formação de professores. Na década de 1970, esses esforços geraram a criação dos primeiros programas de pós-graduação, inicialmente na UFRGS e na USP.

Aos poucos, esses esforços se espalharam por outros centros de pesquisa. No período entre 1996 e 2006, foram defendidas 618 teses na área de Ensino de Física, distribuídas entre mestrado (465), doutorado (106), livre-docência (3) e mestrado profissional (44).

Uma meta importante da área é aumentar a articulação entre as universidades e as escolas de ensino básico, promovendo pesquisas conjuntas, o que depende substancialmente de políticas públicas que possibilitem maior envolvimento do professor em atividades dessa natureza.

## Estado da Arte

No Brasil, a Pesquisa em Ensino de Física tem sua origem em órgãos e projetos educacionais que se preocupavam com a melhoria do ensino de ciências. Entre eles estão o Instituto Brasileiro de Educação, Cultura e Ciências (IBECC) e a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento do Ensino de Ciências (FUNBEC), o primeiro órgão da UNESCO criado para implementar o desenvolvimento da Educação, da Ciência e da Cultura e que, durante vários anos, se dedicou à elaboração e produção de recursos didáticos destinados ao que hoje chamamos de Ensino Básico. Incluídos nessa produção se encontram os projetos de ensino de Física, Química e Biologia criados nos exterior. Visando a divulgação de uma nova visão no ensino de Ciências, foram estabelecidos na década de 60 os Centros de Treinamento de Professores de Ciências em Porto Alegre, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador e Recife.

No final da década de 60, quando alguns desses órgãos tiveram suas atividades encerradas, muitos profissionais migraram para as universidades, dando origem a grupos de pesquisa em ensino e formação de professores de Ciência que buscaram, por meio da pesquisa, maior produtividade em seus trabalhos. Nessa mesma época, no primeiro Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), em 1970, além de inúmeras discussões sobre projetos de ensino de outros países e propostas de novos estudos brasileiros, também foi proposta uma moção, aprovada por unanimidade, sobre a necessidade da pesquisa em ensino de física. Apresentamos abaixo esta moção que consta nas atas do simpósio:

*“Que a Sociedade Brasileira de Física, em colaboração com as Sociedades de Física de outros países, elabore projeto de cooperação latinoamericano para coordenar os esforços que se fazem em pesquisa sobre ensino de Física.” p. 334*

No final da década de 60, com a reforma universitária brasileira e a criação dos cursos de pós-graduação, dois deles, o mestrado do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o doutorado em

Educação da Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, passaram a aceitar temas de Ensino de Física nas pesquisas de seus alunos. Logo em seguida, no início da década de 70, foram instituídos grupos brasileiros para a elaboração de projetos de ensino de Física visando à introdução de inovações curriculares e metodológicas.

Quase todos os profissionais desses grupos se transformaram em pesquisadores da área de Ensino de Física, motivados pela necessidade do desenvolvimento de pesquisas que avaliassem o impacto dos projetos implantados na realidade escolar.

Em 1973 foi criado o Programa de Mestrado em Ensino de Ciências (Modalidade Física) no Instituto de Física e na Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. Outros mestrados foram criados, como a área de concentração junto aos Institutos de Física ou Faculdades de Educação, congregando doutores de áreas afins para o estabelecimento de Pós-Graduações em Ensino de Ciências. Na década de 80, o Programa SPEC/PADCT/CAPES, que visava à melhoria do ensino de Ciências na escola básica, apoiou institucional e financeiramente vários eventos e grupos de pesquisa e/ou desenvolvimento.

Alguns grupos de pesquisa transformaram as investigações que realizavam em material instrucional para os professores. Outros utilizaram a verba para intercâmbio com grupos internacionais de Pesquisa em Ensino de Física, enquanto outros fizeram seus doutorados no exterior e, quando retornaram, muitos estabeleceram novos grupos de pesquisas que deram origem a novos programas de Pós-Graduação em Ensino de Ciências.

Em 2000 foi estabelecida a área de Ensino de Ciências e Matemática na CAPES, mas vários grupos de pesquisa em Ensino de Física estabelecidos nas Faculdades de Educação continuaram dentro da área de Educação. Atualmente, a área de Ensino de Ciências e Matemática da CAPES é constituída por 67 programas de Pós-Graduação, responsáveis por 86 cursos, 32 deles de mestrado, 20 de doutorado e 34 de mestrado profissional.

Dissertações e teses na área de Ensino de Física vêm sendo produzidas em diversos desses programas, sendo cinco delas específicas sobre o Ensino de Física. No período de 1996 a 2006, foram defendidos na área

de Ensino de Física, nos diversos Programas de Pós-Graduação do país, 618 trabalhos, sendo 465 em nível de mestrado, 106 de doutorado, 3 de livre-docência e 44 em nível de mestrado profissional.

Se na CAPES a Pesquisa em Ensino de Ciências tem uma área especial para a discussão dos seus cursos de Pós-Graduação, os projetos de pesquisa do CNPq são direcionados para a área de Educação, ainda que haja, no Comitê Assessor da Educação do CNPq, um representante dos pesquisadores da área de Ensino de Ciências eleito entre os pares.

## **Desafios e Perspectivas**

As políticas de estado para Ciência, Tecnologia e Inovação com vista ao desenvolvimento sustentável passam pela melhoria do ensino básico no Brasil e pela formação de professores. As mudanças exigidas nacional e internacionalmente para o Ensino de Física estão sendo investigadas pelos nossos pesquisadores, quer em relação ao ensino e aprendizagem em suas diferentes subáreas, quer em relação à formação de professores para esse ensino. O grande desafio da área de Pesquisa em Ensino de Física é tornar conhecidos os resultados dessas pesquisas pelos grupos que organizam as Políticas de Estado para a formação de recursos humanos para a área, pois, a educação, e principalmente o ensino dentro da área educacional, sempre foi visto como um problema somente de conhecimento de conteúdo, sem levar em conta a estrita relação entre o ensinar e o aprender. Entretanto, as pesquisas têm mostrado que tanto o ensino como a aprendizagem de Física vão muito além da produção da simples transposição de conteúdos de um nível a outro.

## **Brasil na Área**

Os periódicos nacionais que publicam artigos sobre a Pesquisa de Ensino de Física são avaliados pelo Qualis/CAPES. A Revista Brasileira de Ensino de Física, publicação da Sociedade Brasileira de Física desde 1979, e o Caderno Catarinense de Ensino de Física, publicado pela UFSC desde 1984 e que, a partir de 2002, passou a ser denominado Caderno

Brasileiro de Ensino de Física, são direcionados tanto para o Ensino de Física como para a pesquisa em Ensino de Física. Com o crescimento da área surgiram outros periódicos dirigidos exclusivamente para a publicação de artigos referentes à Pesquisa no Ensino de Ciências. Em 1995 foi criada pela UNESP, campus de Bauru, a revista *Ciência & Educação*. A revista *Investigações em Ensino de Ciências* da UFRGS apareceu no ano seguinte, em 1996. Em 1997 foi criada a Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (Abrapec), que passou a editar a *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. Em 1999 a UFMG iniciou a publicação da revista *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*. Essas revistas publicam três números por ano e têm como objetivo disseminar resultados de investigações conduzidas na área de Educação em Ciências.

O Centro de Documentação em Ensino de Ciências (CEDOC), coordenado pelo FORMAR-Ciências (Grupo de Estudos e Pesquisas em Formação de Professores da Área de Ciências), da Faculdade de Educação da UNICAMP, desde 1987 desenvolve no Brasil um serviço de identificação, classificação e divulgação da pesquisa educacional na área de Ciências, em especial aquela traduzida sob a forma de teses e dissertações. Como resultado desses estudos foi editado, em 1998, o catálogo *O Ensino de Ciências no Brasil: Catálogo Analítico de Teses e Dissertações (1972-1995)*, que reúne resumos de 572 teses e dissertações defendidas até 1995, bem como a classificação dos documentos e índice remissivo por área de conteúdo, nível escolar, assunto, instituição, ano de defesa e orientador, permitindo a fácil recuperação de informações, estudos de revisão bibliográfica e pesquisa sobre o estado da arte da produção acadêmica e científica na área.

O grupo PROFIS – Espaço de Apoio, Pesquisa e Cooperação de Professores de Física, vinculado ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo, publicou três volumes do *Catálogo Analítico de Ensino de Física no Brasil: dissertações e teses*, abrangendo os períodos de 1972-1992, 1992-1995 e 1995-2006. Os três volumes (disponíveis em [http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/Vol.3\\_TUDO.pdf](http://fep.if.usp.br/~profis/arquivos/Vol.3_TUDO.pdf)) totalizam 891 referências de dissertações de mestrado, teses de doutorado e livre-docência da

área de Ensino de Física, visando contribuir para a divulgação e o acompanhamento da pesquisa, particularmente na área de Ensino de Física, desde o início de sua institucionalização na década de 70 até os dias atuais. O Catálogo é dirigido aos investigadores da área de Pesquisa em Ensino de Ciências/Física, a professores de Física em todos os níveis e aos formadores de professores. Além disso, pode ser de interesse para profissionais e educadores de outras áreas, dado a abrangência dos conteúdos tratados, que, em muitos casos extrapolam as especificidades do Ensino de Física.

O primeiro Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF) foi realizado em Curitiba, em 1986. Esses eventos têm sido realizados sistematicamente a cada dois anos, sendo que o mais recente foi realizado em Águas de Lindóia, em 2010.

## **Relevância para a Sociedade**

Levando em conta os encontros de 2002, 2004, 2006, 2008 e 2010, pode-se concluir que a Pesquisa em Ensino de Física apresenta um crescimento linear neste período: as subáreas com maior número de trabalhos são “Ensino e Aprendizagem” e “Formação de Professores”, reforçando a interação entre a pesquisa em Ensino de Física e os problemas do ensino e formação de professores nos níveis fundamental, médio e superior. Outro ponto importante é a subárea de pesquisa em “Ensino e Aprendizagem” que, apesar de variar entre 36 e 51 trabalhos apresentados, vai se subdividindo e fortalecendo subáreas mais específicas. Nos parágrafos seguintes é apresentada uma descrição sucinta das grandes subáreas de Pesquisa em Ensino de Física a partir dos dados do EPEF.

As pesquisas sobre os processos de ensino e aprendizagem em ciências no Brasil foram mais bem sistematizadas nos anos 70 com as investigações das concepções alternativas de estudantes em várias áreas da Física, tais como mecânica, eletricidade e magnetismo, ótica e termodinâmica. Resultados de estudos nestas últimas três décadas revelam dois resultados básicos: o primeiro, que estudantes não iniciam o ensino formal sem um conhecimento pré-instrucional ou crenças sobre fenômenos e conceitos a



serem ensinados, revelando que sempre sustentam concepções profundamente enraizadas e idéias que não estão, muitas vezes, fortemente contrárias à visão da Ciência. O segundo resultado de grande importância é que essas concepções se mostram extremamente resistentes à instrução formal, ou seja, os estudantes as mantêm após o estudo de tópicos de Física. Até hoje temos um número razoável de estudos em ensino e aprendizagem de estudantes em Física que iniciam seus trabalhos investigando as concepções dos estudantes no conteúdo específico.

Entretanto, desde meados dos anos 80, considerável atenção foi dada às pesquisas das concepções dos estudantes e dos professores sobre a natureza das ciências. Estas pesquisas mostram que, tal como as concepções sobre os conteúdos específicos, essas também são limitadas e, algumas vezes, ingênuas. A partir do final dos anos 90 as discussões sobre ensino e aprendizagem foram alimentadas pelos resultados dos programas de avaliação internacional (PISA) e nacional (ENEM) que mostraram um desempenho dos alunos muito abaixo do esperado, sem diferenciar as escolas oficiais das particulares. Esses resultados deram novo ímpeto para as pesquisas sobre ensino e aprendizagem de ciências levando as discussões para a introdução nesse campo dos conceitos das áreas de “Letramento Científico” e “Ciência, Tecnologia e Sociedade” (CTS) no esforço para a melhoria do ensino de ciências. A pesquisa em CTS tem o enfoque preferencial em mudanças na estrutura curricular e a pesquisa em Letramento Científico tem abordado aspectos das linguagens nos materiais didáticos e da interação dos professores e alunos em sala de aula.

### *Linguagem e Letramento Científico*

Uma revisão das pesquisas já realizadas revela uma mudança teórica no papel da linguagem no ensino de ciências e nos delineamentos utilizados para estudar a linguagem oral e escrita no ensino e aprendizagem de ciências. Inicialmente essa área de pesquisa foi dominada pela visão comportamentalista de aprendizagem (behaviorismo), na qual os processos de falar, ouvir, ler ou escrever mostravam um processo unidirecional: de quem fala para o ouvinte, do texto para o leitor e da memória para o texto.

O advento das ciências cognitivas, de aportes de filósofos e lingüistas, o reconhecimento da limitação da perspectiva ‘estímulo – resposta – reforço’, a ênfase na transmissão/construção social e também o entendimento do papel da linguagem nesse processo têm ampliado a compreensão dos processos de ensino e de aprendizagem em ciências. Também tem contribuído a exploração das conexões entre modelos mentais, linguagem e aprendizagem em ciências que tem sido influenciada pela história e filosofia das ciências, pelos estudos de cognição humana e aplicação das informações e comunicação tecnológica.

As linguagens falada e escrita são os sistemas simbólicos mais frequentemente utilizados na construção da própria ciência e para construir, descrever e apresentar os processos e argumentos científicos. Para fazer ciência, para falar ciência, para ler e escrever ciência é necessária a articulação de distintas maneiras do discurso verbal, das expressões matemáticas e representações gráficas. Essas habilidades e competências também devem ser desenvolvidas no ensino de ciências. É buscando o ‘como’ conseguir essas relações que as pesquisas nessa área estão sendo desenvolvidas.

Na passagem dos resultados destas investigações para o ensino distinguimos dois focos: os processos científicos e as competências curriculares.

Sobre o processo científico podemos distinguir vários pontos, tais como: (1) reconhecimento das questões científicas a serem investigadas; (2) identificação das evidências necessárias na investigação científica; (3) proposição e avaliação das conclusões; (4) demonstração do entendimento dos conceitos científicos e (5) comunicação com validade o processo do produto dos conhecimentos científicos.

Sobre as competências curriculares, pode-se citar: (a) aprendizagem auto-reguladora; (b) habilidade para resolver problemas; (c) comunicação e cooperação.

### *Tecnologia e Ensino de Física*

A pesquisa nesta área foi motivada pela busca da integração de ferramental da tecnologia da informação e comunicação aos processos de ensino e aprendizagem. O que se observa, na prática, é que esse ferramental

ficou restrito à utilização do computador e de outros recursos da informática, incluindo facilidades e aplicativos para Internet. Como o enfoque da investigação tem sido na utilização desse ferramental (ensino) e não no conteúdo da Física abordado (aprendizagem), os resultados ainda são limitados, mas muito promissores na medida em que o enfoque seja voltado para a aprendizagem. O principal aspecto da investigação, não somente para o ensino de Física, mas para todas as áreas que venham investigar essa temática, é que esse ferramental tem provocado a redefinição do espaço da sala de aula, que foi ampliado para além dos muros da escola e para além da condução única do professor.

Dessa forma, essa área está intrinsecamente articulada às demais áreas de investigação, seja à formação de professores, linguagem e letramento científico, divulgação e comunicação em ciências, questões metodológicas ou políticas públicas. As pesquisas nesse campo foram reformuladas à medida que o computador ganhou poder, as ferramentas tecnológicas foram refinadas e o entendimento da aprendizagem modificou-se. Outra vertente de trabalho é a integração da modelagem computacional e visualização científica na abordagem de tópicos de Física, seja na perspectiva teórica ou experimental.

Essa perspectiva tem abordado tanto o processo de construção do conhecimento científico através de modelos como o processo de corroboração ou refutação dos modelos, construídos através da visualização e análise de saídas gráficas de previsão de comportamento esperado. Muitas comissões nacionais e também internacionais em ensino de ciências têm chamado atenção para esses novos objetivos e o crescimento do papel da tecnologia no ensino das ciências.

### *Formação de Professores*

Pesquisadores do ensino sempre consideraram a relevância do professor como mediador nas condições de produção em sala de aula. Nos dias atuais, uma consequência quase que natural da pesquisa em ensino e aprendizagem, letramento científico e tecnologia em ensino de Física é a pesquisa em formação de professores, seja na formação inicial ou na for-

mação continuada. A partir de resultados alcançados que mostraram que o ensino diretivo e unidirecional, onde o professor fala e o aluno escuta, tem sucesso quase que somente com estudantes que apresentam facilidade em aprender física, foi proposta uma importante questão: como preparar professores para o ensino básico que não fosse dirigido a uma elite e sim a todos os cidadãos?

Por outro lado, a pesquisa também mostra que, para alcançar os objetivos propostos pelos atuais direcionamentos curriculares nacionais e internacionais, é necessária uma grande diversificação de estratégias de ensino e, principalmente, a criação de ambientes de aprendizagem que propiciem a argumentação dos alunos em aulas, uma vez que as interações professor/aluno e aluno/aluno são condições essenciais para o aprendizado das diversas linguagens científicas: oral, gráfica, simbólica, matemática, visual e computacional.

A pesquisa em formação de professores mostrou uma grande discrepância entre as atitudes e comportamentos nas aulas dos cursos de formação e em suas aulas nas escolas. Um dos fatores de resistências às mudanças é a força das concepções epistemológicas dos professores sobre a natureza da ciência que ensinam, de suas concepções alternativas sobre ensino e da forma como os alunos aprendem, além da influência dessas representações nas práticas docentes e nas decisões sobre o ensino.

Outro problema dessas pesquisas diz respeito à dificuldade do professor em realizar mudanças na sua prática. O ensino exigido pelas novas diretrizes curriculares, visando à formação de cidadãos cientificamente letrados, exige novas práticas docentes e discentes, diferindo das práticas usuais na nossa cultura escolar. A pesquisa evidencia que o professor precisa sentir e tomar consciência desse novo contexto e do novo papel que deverá exercer na classe.

Essas transformações não são tranquilas e nem fáceis de obter nos cursos de formação inicial e/ou continuada. São necessárias modificações estruturais nestes cursos ampliando as estratégias de ensino e criando situações para que os professores sintam os benefícios na aprendizagem, mas também as dificuldades das novas metodologias.

Pesquisas têm mostrado que as mudanças conceituais, atitudinais e metodológicas dos professores só acontecem quando esses tomam consciência do seu importante papel como transformador de uma sociedade. Vale destacar ainda que grande parte do que já se aprendeu com a pesquisa não atingiu a maioria das disciplinas dos currículos de ensino superior, o que certamente aumenta as dificuldades de mudanças futuras.

### *Divulgação e Comunicação de Ciências, Políticas Públicas e Questões Metodológicas*

Paralelamente ao crescimento da área de Divulgação e Comunicação de Ciências, tem crescido na área de pesquisa em ensino de Física a preocupação sobre como essa divulgação se processa e qual a relação desses espaços, caracterizados de educação não formal, com a educação formal representada pela escola. Os pesquisadores também se preocupam com as Políticas Públicas dos diferentes governos: federal, estaduais e municipais.

O desenvolvimento dos alunos e seus professores, diante de implantações de diretrizes oficiais, tanto de materiais como de estruturas curriculares, também são acompanhados pelos pesquisadores. Tanto propostas de aumento de número de vagas nos cursos de formação de professores, como também sobre o abandono depois de formados, proporcionam inquietações quando se sabe sobre os salários dos professores nas diferentes regiões do país.

Esses estudos nos fazem crer que, sem a seriedade governamental de investir em boas condições de trabalho, bons salários e estrutura física nas escolas, os resultados das pesquisas em ensino de Física não poderão contribuir de forma adequada para o ensino de Física da população brasileira.

### **Recomendações**

- Maiores investimentos em projetos conjuntos nas universidades e escola públicas.
- Apoio aos grupos de pesquisas em ensino de física visando à formação continuada de professores.

- Bolsas para professores da escola fundamental e média para participarem das pesquisas em Ensino de Física. Seria interessante que suas aulas sejam laboratórios de pesquisa para o estudo do ensino, com suas observações e avaliações de seus processos didáticos.
- Financiamento para a produção de material didático para a escola básica proveniente dos resultados de pesquisa na área.
- Incentivo direcionado aos grupos de Pesquisa em Ensino de Física para intercâmbio com semelhantes no exterior.
- Projeto PIBID com parte subvencionada para obtenção de dados e resultados de pesquisa.
- Integração dos grupos de pesquisa com os que estão na Prodocência (formação de licenciados), de modo que os futuros professores já se formem conhecendo a área de pesquisa em ensino de Física.

# Ótica e Fotônica

*Jaime Frejlich*

*Sandra Vianna*

*Luiz Davidovich*

*Antonio Zelaquett Khoury*

*Niklaus Ursus Wetter*

## Sumário Executivo

Disciplina fundamental no desenvolvimento progresso da ciência, a Ótica se coloca ainda hoje na fronteira do conhecimento. Para constatar o fato, basta verificar a grande quantidade de prêmios Nobel oferecidos, nas últimas duas décadas, a pesquisadores que usaram técnicas da Ótica em seus trabalhos.

No Brasil, há bom número de cientistas envolvidos em trabalhos da área. De acordo com dados da Plataforma Lattes, do CNPq, há hoje 162 pesquisadores listados sob a categoria “Física com especialização em Ótica” e outros 652 sob “Propriedades Óticas, Espectroscopia e Matéria Condensada”. Vale também destacar que, dos 123 Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia em funcionamento, quatro são diretamente ligados à área: “Fotônica”, “Fotônica para telecomunicações”, “Informação quântica” e “Ótica e fotônica”. Uma das razões para isso é o enorme potencial que a Ótica oferece em termos de inovação tecnológica, tanto no desenvolvimento de instrumental científico como para a geração de produtos para a sociedade, sobretudo no setor de telecomunicações.

Para o futuro, é preciso investir na ampliação do número de cursos de formação em Ótica nas universidades brasileiras. Além disso, os membros da comunidade envolvidos nessas linhas de pesquisa precisam se engajar mais na participação em encontros científicos e comissões.

## Estado da Arte

Área da Física de grande importância para o desenvolvimento científico e tecnológico do Brasil, a Ótica vem se desenvolvendo rapidamente nas últimas décadas. No que diz respeito aos aspectos científicos, o aprimoramento da área pode ser mensurado pela quantidade de prêmios Nobel oferecidos, nos últimos 20 anos, para pesquisadores que utilizaram técnicas da Ótica em suas pesquisas.

No aspecto tecnológico, a Ótica está muito ligada às técnicas de instrumentação e de controle de produção na indústria, em especial na área de sensores. Também está diretamente ligada às modernas técnicas de comunicações via fibra óptica e, provavelmente, será decisiva no desenvolvimento de novas tecnologias de computação, tanto clássica como quântica.

Em geral, as indústrias são altamente dependentes de instrumentação óptica, apesar de a área ainda ser pouco explorada no Brasil.

Atualmente, no país, as pesquisas na área de Ótica estão fortemente concentradas nos temas de ótica quântica e informação quântica; física atômica e molecular; matéria condensada; telecomunicações e sensores óticos; medicina/biologia com ênfase em fototerapias, odontologia e oftalmologia; e instrumentação ótica, instrumentação de lasers e dinâmica de lasers.

Em ótica quântica e informação quântica, o interesse tem se voltado para o desenvolvimento de métodos para caracterizar, transmitir, processar, armazenar, compactar e utilizar a informação contida em sistemas quânticos.

Os sistemas quânticos explorados em laboratórios compreendem: átomos frios (UFPE, USP-SP e SC, Unicamp), fótons emaranhados (UFMG, UFAL, UFRJ, UFF), pinças óticas (UFMG, Unicamp, UFRJ), poços quânticos (LNLS) e ressonância magnética nuclear (CBPF, UFPE, USP-SC).

Na parte teórica, outros grupos brasileiros investigam propriedades de estados emaranhados, efeitos do ambiente em sistemas quânticos e propostas de realização de operações elementares de computação quântica em diversos sistemas físicos e algoritmos computacionais.



As pesquisas de ótica ligadas à área de física atômica e molecular têm como tema central o estudo da interação desses sistemas com a radiação eletromagnética, visando obter informações tanto com relação à estrutura quântica como à manipulação e ao controle quântico desses sistemas.

Em particular, os experimentos que vêm sendo realizados em átomos e moléculas frias visam o estudo de sistemas quânticos macroscópicos, com fluídos quânticos fermiônicos (USP-SC), correlações quânticas em sistemas atômicos (UFPE, USP-SP, Unicamp), produção e controle da interação entre átomos de Rydberg e entre átomos e superfícies (USP-SC, UFPE, UFPB).

Outro interesse é o desenvolvimento e uso de padrões de tempo e frequência baseados em átomos frios e no uso de pentes de frequência (Unicamp, USP-SC). Em matéria condensada, grande parte dos experimentos envolve a espectroscopia não linear de materiais híbridos, micro e nanoestruturados, vitro-cerâmicas e vidros dopados com íons de metal de transição.

Um interesse atual vem se concentrando em magneto-ótica, spintrônica, materiais fotônicos micro e nanoestruturados e dispositivos fotônicos (Unicamp, UFPE, USP-SC, UFAL).

A linha de Telecomunicações e sensores óticos tem mostrado crescente interesse em dispositivos e no desenvolvimento de técnicas óticas, responsáveis pela amplificação, detecção e modulação em sistemas de comunicação ótica, visando um significativo avanço na capacidade de transmissão (Unicamp, UFCE, PUC Campinas).

No que diz respeito à medicina e biologia com ênfase em fototerapias, odontologia e oftalmologia, estão sendo desenvolvidos estudos básicos na terapia fotodinâmica com relação à dosimetria e seletividade de células tumorais (USP-SC, UFPE, IPEN), além de métodos óticos para detecção de diversas alterações teciduais e para diagnóstico ótico de tumores.

## Brasil na Área

Em 2009, 252 sócios da SBF estavam inscritos na Comissão de área “Ótica e Fotônica” e muitos doutores cadastrados na Plataforma Lattes, do CNPq, se registraram na subárea “Física” com especialização em Ótica (162 pesquisadores) e Propriedades Óticas, Espectroscopia e Matéria Condensada (652).

Em termos mais amplos, encontramos doutores trabalhando nos seguintes tópicos: Instrumentação ótica (424); Telecomunicações óticas (196); Ótica geométrica (142) e Computação ótica (222). Existe, ainda, interesse crescente em áreas como Ótica quântica, Ótica/física atômica e Ótica aplicada à medicina ou biologia, com ênfase em fototerapias, odontologia e oftalmologia.

Por outro lado, de um total de 695 participantes, apenas 71 brasileiros tiveram interesse em participar, em 2007, da 6ª Conferência Iberoamericana de Ótica (RIO) e do 9º Encontro Latino-americano de Ótica, Lasers e Aplicações (OPTILAS), ambos eventos realizados em Campinas.

Os “*students chapters-OSA*” também foram criados em sete universidades brasileiras (UFPE, São Carlos, UFAL, Unicamp, Mackenzie, PUC-Rio e UFGS), indicando o interesse crescente de estudantes na área. Vale destacar, ainda, que dos 123 Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia em funcionamento, quatro são diretamente ligados à Ótica: “Fotônica” (UFPE); “Fotônica para telecomunicações” (UNICAMP); “Informação quântica” (UNICAMP); e “Ótica e fotônica” (USP/São Carlos).

## Desafios e Perspectivas

Dentro da Física, a Ótica é uma das áreas mais promissoras em termos de desenvolvimento tecnológico por conta da facilidade com que os assuntos investigados nas universidades podem ser transformados em produtos à disposição da sociedade.

Essa é também uma área de grande interesse da indústria por causa da grande quantidade de técnicas de controle e de instrumentação que utilizam técnicas Óticas. Existe um número significativo de indústrias na área

da Óptica que foram geradas ou iniciadas nas universidades, tanto para produção e fabricação de produtos como para a prestação de serviços:

### **Opto-Eletrônica (São Carlos-SP)**

Fundada em 1985 e originada no IFSC/USP, a empresa participa do programa CBERS no qual é responsável por fabricar a câmera MUX para o satélite CBERS-3, capaz de gerar imagens de 20 metros de resolução, e do desenvolvimento de óculos de visão noturna (OVN) para o Exército Brasileiro, além de lentes, espelhos e espoleta de proximidade para o míssil MAA-1 Piranha, MAA-1B e MAR-1, produzidos pela Mectron de São José dos Campos (SP), e que hoje equipa caças da Força Aérea Brasileira (FAB).

### **Optovac (Osasco-SP)**

Fundada em 1986 com o propósito de desenvolver tecnologia genuinamente brasileira em áreas específicas. A empresa desenvolveu e fabricou, pela primeira vez no Brasil, câmeras no infravermelho termal. Possui todas as autorizações legais para desenvolver, fabricar e comercializar equipamentos optrônicos para aplicações militares.

### **Br Labs (Campinas-SP)**

É uma empresa “spin-off” do Instituto de Física da Unicamp, localizada na incubadora CIATEC do pólo de tecnologia de Campinas. Possui um laboratório de óptica e eletrônica e conta com uma equipe de físicos, engenheiros e técnicos em eletro-eletrônica. A empresa desenvolve equipamentos ópticos para aplicações científicas, industriais e de segurança pública, incluindo sistemas de lasers de estado sólido e semicondutores; espectrômetros, lasers e filtros de terahertz; sistemas de gravação e microfabricação a laser; e módulos eletrônicos tais como fotodetetores, controladores de temperatura e fontes de corrente. Recebeu suporte financeiro da FAPESP e FINEP.

### **Laserlab (Campinas-SP)**

Empresa de manutenção de lasers e de equipamentos oftalmológicos. Desde 1978 presta suporte e assistência técnica para aparelhos de Laser *Nidek*, *Trimedyn*, *Soflight*, *Spectra Physics*, *Coherent Radiation*, *Lexel*, *Sharplan*, *HGM*, *Laservall* etc.

**Bonavision (São Paulo-SP)**

Sediada no CIETEC, entre os produtos da empresa estão: lente para ampliar escalas (lupa) de mão; lente para ampliar escalas (lupa) de apoio, pré-focada; e prancha de leitura acoplada a lupa.

**Innovatech (São Paulo-SP)**

Também sediada no CIETEC, a empresa fabrica materiais com alta precisão utilizando o laser como ferramenta de produção, dirigida para a área de medicina e saúde.

**Lasertools (Rio Pequeno-SP)**

Empresa de base tecnológica que executa serviços de processamento de materiais com o emprego de lasers de NeodímioYAG. Executam principalmente os seguintes serviços: corte de chapas metálicas e de laminados híbridos; marcação industrial e de código de barras; furação de metais e cerâmicas; usinagem em simetria cilíndrica; soldagem sem propagação de calor; e tratamento térmico superficial.

**Optolink (Campinas-SP)**

A empresa, fundada em 1998, tem a comunicação por fibra óptica seu principal foco de atuação. Fornece produtos e serviços para redes de fibras ópticas, telecomunicações, TV a cabo, automação industrial e indústria de sensores. Sua base de clientes inclui fabricantes de equipamentos, operadoras de Telecom, indústria petrolífera, empresas de energia elétrica, operadores de serviços, universidades e centros de pesquisas. A gama de produtos da Optolink inclui componentes passivos à fibra óptica, instrumentação óptica tanto para bancada, como para laboratórios e uso portátil no campo. A empresa também desenvolve e fabrica sistemas especiais para monitoramento, proteção e supervisão de redes ópticas.

**Optron (Campinas-SP)**

Fundada em 1983, a empresa atende às necessidades da pesquisa na área de óptica no Brasil com a produção de componentes mecânicos, necessários para a manipulação do laser e de outras fontes de luz. São projetados e produzidos posicionadores especiais, equipamentos eletromecânicos para posicionamento (como mesas de coordenadas XY),

equipamentos para laboratórios de análises clínicas, kit de ensino de física e os mais diversos produtos relacionados à óptica e posicionamento.

### **Luxsens (Campinas-SP)**

Gerada no IFGW/UNICAMP, a empresa funcionou inicialmente na incubadora da UNESP/Rio Claro, em 2009, e em 2011 foi transferida para o CIATEC (incubadora da cidade de Campinas). Desenvolve sensores ópticos e sua especialização reside na produção de velocímetros de efeito doppler para medida de vibrações mecânicas.

### **Photonita - Metrologia Óptica (Florianópolis-SC)**

Fundada em 2002 e formada por ex-colaboradores do Laboratório de Metrologia e Automatização da UFSC, hoje a empresa está na incubadora CELTA e atua no desenvolvimento e comercialização de sistemas ópticos de medição e na prestação de serviços especializados usando equipamentos desenvolvidos em conjunto com a UFSC.

## **Recomendações**

- Em termos de ensino de Ótica, existem poucas universidades no Brasil com cursos de formação em Ótica no sentido mais amplo, fora a inclusão de tópicos específicos ligados a áreas de atuação de alguns professores. Um levantamento detalhado deste assunto se faz necessário para a recomendação de políticas específicas na área.
- Existe um número expressivo de pesquisadores trabalhando em Ótica e áreas correlatas, mas com pouco envolvimento dentro da comunidade nacional em termos de participação em comissões, encontros científicos etc.
- Existem poucos cursos de formação básica e ampla em Ótica nas universidades brasileiras, tanto nas Engenharias como na Física, o que ainda representa um obstáculo ao crescimento da área no Brasil.



# Física de Plasmas

*Iberê Luiz Caldas*

*Maria Virginia Alves*

*Marisa Roberto*

*Munemasa Machida*

*Edson del Bosco*

## Sumário Executivo

O estudo dos plasmas tem contornos tanto práticos como acadêmicos. De um lado, estamos falando do estado mais comum da matéria no Universo, que caracteriza a composição das estrelas e do meio interestelar. Compreendê-los, portanto, é importante não só por responder perguntas básicas sobre a natureza mas também por ajudar a caracterizar o Clima Espacial ao redor da Terra e mitigar potenciais efeitos de tempestades solares sobre nossa infra-estrutura tecnológica, entre outros impactos que a atividade do Sol pode ter sobre nosso planeta.

Além desse aspecto de prevenção e mitigação, a Física de Plasmas reserva ao futuro aplicações tecnológicas potencialmente revolucionárias, como o desenvolvimento de processos de fusão termonuclear controlada, que permitiriam gerar energia de forma limpa pelo mesmo princípio de operação do Sol. Investimentos vultosos em nível internacional estão sendo feitos nessa direção, mas no Brasil a deficiência ainda é grande, a começar pela formação de recursos humanos.

Hoje são cerca de 200 pesquisadores envolvidos, mas o número precisa aumentar significativamente nos próximos cinco anos para nos colocar em condição de competir e cooperar em termos justos com outros países. Nas três sub-áreas identificadas da Física de Plasmas (Tecnológicos, de Fusão, e Espaciais e Básicos) há falta de pessoal, de modo que é preciso investir na formação de novos pesquisadores, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste,

onde a carência de grupos de pesquisa desenvolvidos é mais notável (exceção feita ao grupo de plasma tecnológico na UFRN).

Em termos de estrutura, será muito importante a construção do Laboratório Nacional de Fusão, em Cachoeira Paulista (SP), com inauguração prevista para 2014. E o Brasil precisa colaborar com os países mais avançados na área, de forma a acelerar seu desenvolvimento.

## **Estado da Arte**

O físico-químico norte-americano Irving Langmuir começou a usar o termo plasma para um gás ionizado em 1927, durante seu trabalho na *General Electric Co.* Por conta desses estudos feitos com plasmas relativamente densos e frios, hoje se fala em ondas de Langmuir, e as sondas de Langmuir são colocadas a bordo de satélites. A partir daí as pesquisas sobre plasmas se expandiram em várias direções.

O desenvolvimento do rádio, por exemplo, levou à descoberta da ionosfera, uma camada natural de plasma acima da atmosfera que reflete as ondas de rádio e também, algumas vezes, as absorve. Essa descoberta levou ao estudo da propagação de ondas de rádio em plasmas e ao conhecimento de uma grande variedade de ondas de plasmas que podem se propagar ao longo das linhas de campo magnético e também de forma perpendicular a elas.

Sabe-se, há muitos anos, que a maior parte do Universo conhecido é composta por plasmas. Assim, o entendimento de vários processos requer um bom conhecimento da física dos plasmas, o que é particularmente verdade para o Sol, cuja atividade determina as condições do clima espacial, essencial para uma sociedade cada vez mais dependente de sistemas tecnológicos. A criação da bomba atômica de hidrogênio despertou um grande interesse sobre a energia nuclear como uma possível fonte de energia para o futuro. A liberação de energia que ocorre no Sol é resultante da combinação de núcleos de hidrogênio para formar hélio, num processo conhecido como fusão termonuclear, que demanda temperatura e pressão extremamente altas.



O esforço para produzir fusão termonuclear controlada teve início no início da década de 1950, com o projeto Sherwood, e hoje envolve um grande número de cientistas e engenheiros da comunidade internacional em torno de máquinas cada vez maiores, complexas e mais sofisticadas. Embora bons resultados tenham sido obtidos, ainda há um longo caminho a ser percorrido até que seja viável o uso comercial desse tipo de energia.

Quando os satélites descobriram os cinturões de radiação e começaram a explorar a magnetosfera da Terra, o termo “física de plasmas espaciais” passou a ser usado com mais frequência. Da pesquisa em fusão, os cientistas espaciais emprestaram a teoria de aprisionamento de plasma por campo magnético e, da ionosfera, a teoria das ondas. A astrofísica forneceu, entre outras coisas, noções de processos magnéticos para liberação de energia e aceleração de partículas.

Atualmente, a física de plasmas espaciais é uma área ativa que contribui não apenas para o entendimento das observações feitas pelos satélites, mas também para os plasmas em geral. A comunidade de físicos de plasmas é relativamente pequena no Brasil, com aproximadamente 200 pessoas, estimativa feita a partir dos participantes do Encontro Brasileiro de Física dos Plasmas (EBFP), um evento bianual que faz parte do calendário da Sociedade Brasileira de Física (SBF). De acordo com o estatuto da comissão de Física dos Plasmas da SBF, a área de plasmas é dividida em três sub-áreas de atuação: Plasmas Tecnológicos, Plasmas de Fusão e Plasmas Espacial e Básico.

Plasmas Tecnológicos. Essa área é a que apresenta o maior crescimento nos últimos cinco anos. A física de plasma aplicada a novos processos de materiais tem como foco principal a investigação sobre plasmas frios, incluindo desde estudos fundamentais até aplicações desses plasmas em processos de deposição, corrosão, ativação ou tratamento de superfícies de materiais. As atividades de pesquisa nessa sub-área têm um caráter multidisciplinar, próprio de um setor de pesquisa e desenvolvimento (P&D) conhecido hoje como Tecnologia de Plasmas, cuja importância da área pode ser aferida pela constatação da existência, atualmente, de modernos laboratórios de Ciência e Tecnologia de Plasmas.

Os projetos em andamento envolvem pesquisas em processamento de materiais de interesse aeroespacial, de materiais elétricos e de materiais biocompatíveis. Envolvem ainda processamento de materiais metálicos submetidos a tratamento de superfícies para melhoramento de suas propriedades tribológicas, tais como nitretação, carbonetação e oxidação iônica em materiais ferrosos, chapas aços ferramentas, titânio e suas ligas, alumínio cromo e suas ligas.

São também realizados estudos sobre deposição de filmes resistentes ao desgaste e à corrosão em peças, ferramentas, chapas e moldes utilizando processo PVD (*triode-magnetron-sputtering*), e obtenção de filmes metálicos por deposição reativa, modificação de superfícies poliméricas e processos metalúrgicos auxiliados por plasma.

Merecem destaque os trabalhos em desenvolvimento e caracterização de maçaricos de plasma para aplicações em aquecimento, corte e plasma spray envolvendo vários tipos de gases, além da utilização de plasma térmico e não térmico para a produção de hidrogênio gasoso e compostos de carbono a partir de gás natural ou insumos orgânicos.

Destacam-se ainda, pela alta importância do ponto de vista tecnológico, as atividades em reatores a barreira dielétrica (descarga silente) e plasma a pressão alta (próxima a uma atmosfera), onde ocorre a geração de ozônio, insumo importante para variados processos como tratamento de efluentes, purificação de água e uso na medicina, bem como na destruição de bactérias e células cancerígenas que levou ao aparecimento de novo setor de P&D, unindo plasma e biologia.

O caráter multidisciplinar dessa sub-área fica evidente nas pesquisas em superfícies e nanoestruturas que reúnem pesquisadores com objetivos comuns na modificação física, química e óptica de superfícies, visando à caracterização de novos materiais nanoestruturados em filmes finos e recobrimentos de biomateriais, biocerâmicas, óxidos metálicos, materiais supercondutores e magnéticos.

Esses novos materiais são aplicados em recobrimentos de biomateriais para a medicina, no controle da corrosão em metais e ligas e também em dispositivos nanomagnéticos.

Todos esses trabalhos na área de plasmas tecnológicos, devido ao seu forte apelo inovador, garantem a formação de recursos humanos especializados, o reforço da pós-graduação acadêmica e o mestrado profissional, além de promover a criação de novos cursos aplicados à Ciência e Engenharia de Materiais, à produção de patentes e à interação com o setor produtivo.

Plasmas de Fusão. Após passar por uma fase crítica na década de 1990, as pesquisas em fusão termonuclear controlada iniciaram sua nova etapa em fusão por confinamento magnético, em 2005, com a definição do local de construção do Tokamak Internacional ITER, em Cadarache, na França. O Tokamak ITER, em construção por um consórcio entre a Comunidade Européia (EURATOM) e outros seis países (Japão, Rússia, EUA, China, Coreia do Sul e Índia), deve ser inaugurado em 2016. A previsão do ITER é produzir 500 MW por um tempo superior a 400 segundos, com fator Q (potência extraída/gasta) maior que 10.

Uma experiência após a realizada com o ITER já está sendo planejada. Ela é denominada reator nuclear por fusão magnética controlada de demonstração (DEMO), já está em fase de projetos e deve avaliar o uso da energia elétrica produzida por um reator de fusão nuclear controlada. Atualmente o Tokamak JET (*Joint European Torus*), na Inglaterra, é o maior em operação no mundo e vários testes e parâmetros de operação serão diretamente utilizados no Tokamak ITER.

Dentro do acordo de cooperação entre Brasil e EURATOM, recentemente assinado, estão previstos intercâmbios de cientistas brasileiros tanto no JET como em outros Tokamaks da Comunidade Européia.

Outra tendência para fusão termonuclear controlada é a fusão inercial, representada principalmente pelo NIF (*National Ignition Facility*), nos Estados Unidos. Por se tratar de tecnologia baseada em laser de alta potência, existem vários trabalhos relacionados de uso militar. A conquista mais recente é a operação simultânea do arranjo de 192 lasers, atingindo uma potência de 1 MJ, abrindo caminho para um reator híbrido de fusão fissão LIFE (*Laser Inertial Fusion-Fission Energy*).

Um fator positivo desse reator é a utilização dos materiais radioativos que sobram dos reatores de fissão (lixo atômico), oferecendo assim pela

primeira vez um modo seguro de eliminar os restos radioativos, gerando novas energias. O reator LIFE poderia produzir, sem realimentação, gigawatts de potência 24 horas por dia num período superior a 50 anos. A previsão do primeiro reator piloto é para 2020, e o reator de demonstração, por sua vez, em 2030.

Existem atualmente três Tokamaks em operação no Brasil: o Tokamak esférico ETE, no INPE, o NOVA-UNICAMP e o TCABR, na USP. O Tokamak ETE é uma máquina conceitual onde se busca uma nova configuração magnética de alto desempenho. O Tokamak NOVA-UNICAMP, o mais antigo dos três, é utilizado para treinamento e formação de alunos de pós-graduação na área.

O Tokamak TCABR, o maior e mais completo, foi construído para os estudos de aquecimento auxiliar, novo regime de operação de alto confinamento e formação de pesquisadores qualificados na área. Existem também trabalhos e grupos em setores muito importantes na área de fusão, como as pesquisas de sistemas fusão-fissão para transmutação de rejeitos altamente radioativos (UFMG), estudos da interação plasma-parede em máquinas de plasmas termonucleares (UnB, UFF, UESC e ITA), análise do surgimento de turbulência em plasmas de fusão (UFPA, USP) e medidas de choque e ionização de moléculas por elétrons relevantes para reatores de fusão termonuclear (UFRJ e UFJF).

Há de se reconhecer que o Brasil ainda não atingiu um patamar de excelência nessa área, quer seja em número de pesquisadores ou em avanços tecnológicos, a ponto de participar diretamente em consórcios do tipo ITER ou projeto NIF. Por outro lado, o Ministério de Ciência e Tecnologia criou a Rede Nacional de Fusão (RNF) para impulsionar as pesquisas na área de fusão termonuclear controlada. A RNF conta com aproximadamente 90 pesquisadores brasileiros, em 15 instituições de pesquisa e ensino, tem seu comitê técnico científico representado por seis pesquisadores eleitos da comunidade e um representante da CNEN.

Dentro do acordo de Cooperação Científica e Tecnológica entre o Governo da República Federativa do Brasil e a Comunidade Européia, a RNF iniciou várias atividades de intercâmbio com a Europa.

Um dos projetos de cooperação mais significantes é a participação brasileira em campanhas no novo regime de operação do Tokamak JET, na Inglaterra, que produzirá base de informações para o Tokamak ITER. Para centralizar futuros trabalhos em fusão termonuclear controlada brasileira, está sendo criado o Laboratório Nacional de Fusão (LNF), em Cachoeira Paulista (SP), para onde deverá ser deslocado o experimento ETE.

Outro ramo da pesquisa em fusão que tem destaque é conduzido pelos grupos atuantes na área de Caos em Plasmas, constituídos por sete instituições de pesquisas (UEPG, USP, UFPa, UFRGS, UFPel, ITA, UFRN), com participação de 14 pesquisadores. Entre os trabalhos estão turbulência e transporte caótico de partículas, campos magnéticos caóticos, origem da turbulência, caos espacial e temporal, acoplamento de ondas não lineares, dinâmica não linear em eletrônica de vácuo e geradores de microondas, ilhas de ressonância e relaxação em feixes densos e coerência e incoerência na interação não linear de ondas em plasmas e feixes.

Há que se registrar ainda a existência de muitos pesquisadores brasileiros da área de Plasmas que hoje trabalham em centros de pesquisa no exterior, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. Manter comunicação e possibilitar colocações desses pesquisadores nos laboratórios locais, em conjunto com produção de recursos humanos nacional, e incentivar a cooperação internacional, elevando a pesquisa nacional em fusão termonuclear controlada, será uma necessidade para acompanharmos o progresso internacional no uso desta energia limpa, segura, abundante, ecologicamente correta e disponível igualmente em nosso planeta.

Plasma Espacial e Básico. A maior parte do Universo observável está no estado de plasma. O regime dos plasmas varia desde os densos núcleos das estrelas até o plasma elétron-pósitron relativístico em torno de pulsares e inclui o vasto plasma difuso que preenche os espaços entre as galáxias.

O objetivo desta área é aproximar especialistas envolvidos com Astrofísica, Plasmas Espaciais e Plasmas em Laboratório no sentido de promover ampla troca de novos resultados e recentes progressos nessas áreas de pesquisa.

Além disso, muitas das questões fundamentais, espaciais e astrofísicas, requerem a física de plasma para as suas respostas. Algumas dessas questões são: Como o Universo começou? Como a Terra e os planetas foram formados? Qual é a natureza do ambiente extremo do plasma em torno dos buracos negros? Como a atividade solar interfere no espaço próximo à Terra e aos demais planetas?

No Brasil existem vários grupos (UNESP, INPE, MACKENZIE, UNIVAP, UFF, UFRGS e USP) e pesquisadores envolvidos no estudo teórico, observacional e numérico sobre a importância de campos magnéticos e processos MHD na origem, estrutura e evolução dinâmica de fontes astrofísicas como o Sol, estrelas jovens, nuvens interestelares, sistemas estelares binários e buracos negros galácticos.

Outros pesquisadores têm concentrado esforços na investigação dos efeitos do campo magnético no meio interplanetário difuso, nos meios interestelar, inter-galáctico e intra-aglomerado. Fenômenos relacionados envolvendo a produção de partículas astrofísicas e sua aceleração, explosões de raios gama, instabilidades em plasmas e processos de dínamo também são estudados. A interação Sol-Terra, determinante do que se convencionou chamar de Clima Espacial, é também objeto de estudo de vários pesquisadores do INPE.

O Clima Espacial pode ser entendido como o conhecimento e predição da resposta do ambiente espacial às contínuas mudanças dos fenômenos solares. Dessa forma, os efeitos do Clima Espacial sobre a Terra são consequências de diversos fatores, como o comportamento do Sol, o espaço interplanetário, o campo magnético terrestre e a natureza da atmosfera.

Explosões e ejeções solares injetam grande quantidade da massa e energia solar no meio interplanetário, formando o vento solar e seus transientes, alcançando a Terra e provocando tempestades geomagnéticas e uma série de fenômenos geofísicos que afetam desde o funcionamento de satélites em órbita da Terra, até o uso de receptores GPS na superfície. Além do vento solar, o aumento intenso da radiação UV, até o raio X, altera o comportamento da atmosfera neutra, destruindo o ozônio e modificando a camada ionosférica, entre outros efeitos.

O plasma astrofísico, por outro lado, coexiste com partículas de poeira em muitas situações. Essas partículas estão carregadas tanto negativamente como positivamente dependendo do meio do plasma ao seu redor. Esse sistema de partículas carregadas, elétrons e íons, forma o chamado plasma empoeirado.

Recentemente o interesse por plasma empoeirado tem crescido significativamente por ter sido reconhecida sua importância em um grande número de aplicações astrofísicas e de física planetária, física de sistemas fortemente acoplados, problemas em laboratório, incluindo o processamento de plasma, aparelhos de fusão etc.

A área de aceleradores baseados em plasmas também tem despertado muito interesse recentemente. Nesses aceleradores, pulsos eletromagnéticos ou feixes de partículas carregadas são injetados em um plasma, gerando separação de cargas e excitando ondas de densidade de grande amplitude, cujos campos elétricos são capazes de acelerar elétrons a altas energias.

Tem-se demonstrado que é possível a obtenção de gradientes de aceleração várias ordens de grandeza maiores que os obtidos em aceleradores convencionais baseados em estruturas metálicas (os chamados LINAC). Porém, aspectos tais como instabilidades no plasma e efeitos não lineares na propagação do pulso gerador podem afetar fortemente a qualidade do feixe obtido, exigindo um entendimento maior dos vários processos que ocorrem ao longo da aceleração.

Embora não existam arranjos experimentais de aceleração de partículas em plasma no Brasil, há grupos teóricos envolvidos no seu estudo. Métodos aplicados ao estudo de plasmas também são largamente utilizados na investigação do transporte de feixes intensos de partículas carregadas eletricamente.

O estudo de feixes tem grande relevância no desenvolvimento de aceleradores de partículas e de dispositivos geradores de radiofrequência capazes de atender às necessidades exigidas em áreas como comunicação, fusão inercial com íons pesados, transmutação de lixo nuclear e fontes de nêutrons.

Dada a alta intensidade do feixe, a densidade de carga e a força eletrostática entre as partículas são extremamente grandes, sendo necessária a utilização de campos eletromagnéticos intensos para confiná-lo.

Devido à grande amplitude das forças envolvidas no sistema, efeitos não lineares passam a ser determinantes na dinâmica das partículas. Isso leva ao aparecimento de complicados fenômenos na propagação do feixe que podem afetar sensivelmente a eficiência do dispositivo em questão. Há um grupo de pesquisa importante nessa área na UFRGS.

## **Desafios e Perspectivas**

### *Plasmas Tecnológicos*

As aplicações tecnológicas de plasmas já existem em abundância nos países com tecnologias de ponta. No Brasil, ainda carecem de incentivos à inovação junto à indústria para aumentar as parcerias com as empresas e as universidades.

Deve-se também incentivar a criação de novos núcleos ou centros de pesquisa que atuem diretamente no desenvolvimento e na transferência de tecnologia da universidade para a empresa, com contratação de pessoal qualificado. As escolas de engenharia, em geral, poderiam dar maior enfoque nesta área, a exemplo do que já acontece fora do Brasil, onde a expansão da abrangência do plasma tecnológico aos diversos setores produtivos tem motivado a criação de curso de engenharia de plasma em instituições européias.

### *Plasmas de Fusão*

A existência de uma fonte de energia inesgotável, limpa, segura, ecologicamente e economicamente viável está se tornando cada vez mais próxima. Alta é a probabilidade de nos próximos 10 a 20 anos termos acontecimentos importantes nessa área, e cada país deve estar preparado para essa nova era, desenvolvendo sua capacidade humana e material, gradativamente. Neste momento, o grande desafio é a criação do Laboratório Nacional de Fusão, com o apoio do MCT.



Como consequência, as perspectivas de trabalhos em cooperação internacional e nacional, o engajamento do país nessa corrida para a energia do futuro com envolvimento de universidades, empresas e centros de pesquisa seria algo viável e possível. Ainda se faz necessário o investimento em recursos humanos especializados nessa área.

### *Plasmas Espacial, Astrofísico e Básico*

Tanto em países com programas espaciais consolidados (EUA, Comunidade Européia, Japão, Rússia e Canadá), como nos países em desenvolvimento (Índia e China), uma parcela importante dos investimentos é feita em satélites científicos. Assim, é extremamente importante que as universidades e outros institutos com grupos de pesquisa na área insiram-se de forma efetiva no setor espacial.

Outro desafio que se faz presente é o de tornar o programa de Clima Espacial, recém-criado no INPE, operacional em moldes internacionais. A operacionalidade desse programa passa por grandes investimentos para monitoramento, tanto em solo quanto via satélite, da ionosfera, do campo magnético terrestre, da atividade solar, entre outros.

## **Brasil na Área**

No Brasil existem 22 instituições de pesquisa e ensino distribuídas em 11 estados, com um total aproximado de 200 pesquisadores atuantes na área de física de plasmas. Existem ainda sete empresas que utilizam plasma para tratamento de materiais. Como em outras áreas da física, a predominância das instituições é no Sudeste e Sul do país, exceção feita ao grupo de plasma tecnológico na UFRN.

O país conta com um pequeno número (11%) de pesquisadores na sub-área de plasmas astrofísico, espacial e básico. Entretanto, a comunidade astronômica conta hoje com mais de 500 pessoas e realiza pesquisa em diversos ramos: seu fórum de discussão e apresentação dos trabalhos é a reunião anual da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB).

A reunião da SAB não faz parte do calendário de reuniões da SBF. Assim, é reduzido o número de astrônomos que participam na sub-área plasmas astrofísico, espacial e básico.

### *Infraestrutura Experimental e Computacional.*

A infra-estrutura em física de plasmas pode ser dividida de acordo com as três sub-áreas, em concordância aos tamanhos dos equipamentos, máquinas e do tipo de investimentos que são distintos para cada sub-área.

#### **Plasmas Tecnológicos**

Essa área se caracteriza pela grande diversidade de equipamentos e dispositivos necessários para utilização do plasma em diferentes formas de processamento de materiais e outras aplicações. Em geral são máquinas de pequeno porte quando comparadas àquelas voltadas à fusão termo-nuclear controlada, possíveis de serem manuseadas em laboratórios de pequeno e médio porte. Entretanto, os instrumentos de medições e análises são bastante onerosos e sofisticados.

#### **Plasmas de Fusão**

Em cada um dos três Tokamak em operação no Brasil existem sistemas de diagnósticos, como espalhamento Thomson, interferometria por microondas, espectroscopia no visível e ultravioleta do vácuo, bolometria, reflectometria, feixes de lítio, sondas eletromagnéticas, sistemas de comando e controle, aquisição e processamento de dados computadorizados em forma de clusters. É prevista para os próximos três anos a construção do Laboratório Nacional de Fusão na cidade de Cachoeira Paulista, no interior paulista.

#### **Plasmas Astrofísico, Espacial e Básico**

Para esta sub-área existem tanto pesquisadores teóricos como observacionais. Para os teóricos, a infraestrutura básica são computadores e “clusters” de alto desempenho para realização de suas pesquisas. Simulações numéricas para o entendimento dos fenômenos astrofísicos são feitas por vários pesquisadores. Já para os pesquisadores observacionais, além da infra-estrutura computacional é necessário também acesso a equipamentos de observação, tanto a partir do solo como do espaço.

Uma articulação conjunta entre agências de fomento estaduais e federais permitiu a participação do Brasil nos telescópios Gemini e SOAR. Temos também participação na missão *Convection Rotation and planetary Transits (COROT)*, que possui dois programas científicos principais operando simultaneamente em regiões adjacentes do céu. Programas adicionais envolvendo variabilidade fotométrica serão igualmente realizados. O Brasil participou da missão internacional HETE-2, liderada pelo *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* e pelo INPE. O HETE-2 foi o primeiro satélite dedicado ao estudo das explosões de raios gama e operou de 2000 a 2006, com resultados extremamente importantes na área.

O Brasil conta ainda com experimentos dedicados à observação solar: o *Brazilian Solar Spectroscope (BSS)*, em operação desde 1990, sendo o único espectrógrafo da América Latina e do hemisfério Sul que se destina à investigação em tempo real de fenômenos solares e ao monitoramento diário da atividade solar dentro da banda de ondas de rádio decimétricas.

A rede observacional voltada ao Clima Espacial conta ainda com ionossondas, uma rede de magnetômetros, de detectores de sinal GPS e de detector de múons.

## Relevância para a Sociedade

### *Formação de pessoal*

O plasma tecnológico é uma área que ainda precisa de muitos pesquisadores, principalmente em novos materiais, semicondutores, aplicação na biologia, medicina e setor aeroespacial.

Deveríamos ter como meta um aumento de 50% no número de profissionais da área nos próximos cinco anos, o que nos permitiria acompanhar as tendências mundiais na área.

A área de fusão termonuclear controlada, para acompanhar os esforços mundiais, deve ter um aumento considerável nos próximos cinco anos, principalmente com a construção do Laboratório Nacional de Fusão, em

Cachoeira Paulista, e início de projetos de cooperação internacional com EURATOM e outros países como Estados Unidos e Japão.

Para atender a essa demanda, a meta deveria ser dobrar o número de profissionais dedicados à sub-área. Para os próximos cinco anos a área espacial, astrofísica e básica necessitará de pessoal não só acadêmico, mas também técnico, como analistas de sistemas, técnicos de laboratório para a operação de equipamentos, engenheiros para construção de equipamentos de ponta para observatórios e satélites.

### *Inovação tecnológica*

O avanço da tecnologia em plasmas certamente é uma área que pode trazer grandes impactos nos processos de inovação no país, desde as TVs a plasma, endurecimento e resistência superior em materiais, materiais biologicamente compatíveis, aplicação do plasma em medicina, tratamento de escórias e resíduos industriais ou líquidos, tratamento de lixo hospitalares e muitas outras utilidades que influenciam o cotidiano.

Cada uma dessas utilidades pode ser acompanhada de uma inovação tecnológica que possibilite a inserção do processo na sociedade, gerando novos mercados e possibilidades de empregos. No setor de microeletrônica, a fabricação de dispositivos, a exemplo dos microprocessadores presentes em nossos celulares e computadores, é hoje fortemente alicerçada em processos de deposição e corrosão a plasmas.

No entanto, é muito pequeno o grupo de pesquisadores e laboratórios engajados nessa linha de pesquisa. Plasmas também têm encontrado aplicação em processos de combustão, possibilitando alteração das rotas termodinâmicas de processos energéticos, como em turbinas a gás. A combustão assistida a plasma é uma fronteira de pesquisa que pode render inovações tecnológicas relevantes para a ainda incipiente indústria nacional de queimadores e turbinas a gás.

De interesse do setor aeroespacial, existem grupos nacionais com linhas de P&D consolidadas sobre propulsão a plasma para satélites e simulação de condições de reentrada atmosférica usando túnel de plasma.

Na tecnologia de fusão termonuclear controlada já são conhecidas as inovações tecnológicas que essa área proporcionou nas indústrias de Japão, China, Coreia do Sul, Alemanha, França e Estados Unidos.

As técnicas de materiais supercondutores para produção de campos magnéticos elevados, necessidade de materiais de primeira superfície em contato com plasma nos reatores, desenvolvimento de parque computacional para simulação e controle dos reatores, materiais especiais para proteção contra partículas energéticas como nêutrons de 14 MeV, sistemas de monitoramento e diagnósticos de plasmas termonucleares, faz com que as tecnologias acompanhem a necessidade da área.

No Brasil, essas tecnologias ainda estão incipientes. Embora seja um dos maiores produtores mundiais de nióbio, material principal para a produção de bobinas supercondutoras, não existe ainda uma indústria nacional no ramo.

### *Indústrias/empresas parceiras e os projetos associados*

Para o desenvolvimento da área espacial deve-se contar com a participação de toda a comunidade, além de representantes do setor aeroespacial como a Embraer, a AIAB (Associação das Indústrias Aeroespaciais Brasileiras) e AAB (Associação Aeroespacial Brasileira). Na área de plasma tecnológico já existem várias empresas parceiras e projetos associados em execução.

Entretanto, de acordo com níveis de pesquisa, número de grupos e participantes nessa área, é possível maior investimento e incentivo para criar novos empreendimentos.

Na área de plasmas de fusão, ainda não existem empresas formalmente envolvidas em parcerias e projetos associados, mas o desenvolvimento acentuado na pesquisa e construção de novas máquinas de fusão termonuclear controlada deverá incentivar parcerias com empresas de materiais nucleares, supercondutores, geradores de onda de potência, materiais de primeira superfície interação plasma, sistemas de computação de alto desempenho, e redes neurais, além de sistemas de diagnósticos óticos e eletromagnéticos de uso industrial.

## *Desenvolvimento científico e tecnológico*

### **Plasma Tecnológico**

O aporte de recursos financeiros para as pesquisas em plasmas tecnológicos cresceu nos últimos anos. Entretanto, faltam profissionais, principalmente em novos materiais, semicondutores e aplicações na biologia e medicina, que poderiam trazer rapidamente benefícios para a sociedade. A área de tecnologia de plasmas está trazendo e deverá trazer grandes impactos nos processos de inovação tecnológica do país, desde televisões a plasma, endurecimento e resistência superior em materiais, materiais biologicamente compatíveis, aplicação do plasma em medicina, tratamento de escórias e resíduos industriais ou líquidos, tratamento de lixos hospitalares, combustão assistida a plasma e muitas outras aplicações tecnológicas que influenciam o cotidiano.

No setor aeroespacial a propulsão a plasma e também a simulação de ambiente de reentrada atmosférica usando túnel de plasma são linhas de P&D bem consolidadas de alguns grupos nacionais.

Faz-se necessária uma maior articulação entre os profissionais, na forma de comissões e reuniões específicas de modo a incentivar e acompanhar de perto o desenvolvimento científico e tecnológico desta sub-área.

### **Plasma de Fusão**

A construção do Laboratório Nacional de Fusão, na cidade de Cachoeira Paulista, está prevista para os próximos três anos. Serão necessários investimentos para a formação de capacitação técnico-científica nessa área.

As técnicas para produção de materiais supercondutores resistentes a altíssimas temperaturas para geração de campos magnéticos elevados se fazem necessárias, já que esses materiais entram em contato com radiação do plasma nos reatores, recebendo impacto de nêutrons da ordem de 14 MeV. Há necessidade de sistemas de monitoramento e diagnósticos de plasmas termonucleares.

No Brasil, essas tecnologias ainda estão incipientes. Embora seja um dos maiores produtores mundiais de nióbio, material principal para produção de bobinas supercondutoras, não existe uma indústria nacional, sendo necessários, portanto, ainda grandes investimentos na área.

### **Plasma Espacial e Básico**

A astronomia observacional sempre estimulou a inovação tecnológica uma vez que a pesquisa de ponta só pode ser feita com tecnologia de última geração.

O avanço na área de instrumentação astronômica, tanto espacial como nos observatórios, demanda a formação de pessoal qualificado para o desenvolvimento de *hardware* e *software*. Deve-se criar condições para que, desde o ensino fundamental, a sociedade tenha conhecimento dessas necessidades, promovendo, assim, o interesse pela área espacial.

### *Impacto na Economia*

Como as tecnologias envolvidas nas áreas de plasma tecnológico e plasma de fusão têm ampla aplicabilidade, é de se esperar transferência de tecnologia aos setores industriais envolvidos com essas inovações.

Certamente a tecnologia de ponta desenvolvida, por exemplo, para tratamento de imagens astronômicas terá aplicabilidade a outras ciências, como a medicina. Os reatores de fusão termonuclear controlada trarão impactos sem precedentes na economia de qualquer país.

### *Inclusão Social*

#### **Plasma Tecnológico**

Como se trata de uma área com grandes aplicações, a inovação tecnológica irá possibilitar a inserção de pessoal altamente qualificado, gerando novos mercados e possibilidades de empregos.

#### **Plasma de Fusão**

A recente criação do Laboratório Nacional de Fusão, prevista para entrar em operação em três anos, possibilitará a formação de profissionais altamente qualificados nas áreas técnica e científica, com envolvimento de universidades e centros de pesquisas em todo o território nacional.

#### **Plasma Espacial e Básico**

A área espacial requer instrumentação de última geração e as confecções desse novo instrumental estão concentradas em poucas instituições, mas já contam com alta participação da indústria nacional. O aumento sig-

nificativo de investimento nessa área deverá gerar novos mercados de trabalho e empregos.

## **Recomendações**

### *Plasmas Astrofísico, Espacial e Básico*

- Articulação dos diversos grupos para o desenvolvimento de instrumentação espacial e a abertura de novas oportunidades na área espacial.
- Participação brasileira em missões internacionais com o objetivo de estudar o Clima Espacial e pequenos corpos do Sistema Solar.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação, como os Fundos Setoriais e a Lei da Inovação.

### *Plasma Tecnológico*

- Criação de centros tecnológicos de plasmas em vários estados, principalmente no Norte e Nordeste.
- Incentivar projetos de parcerias entre universidade, centros de pesquisa/indústria e empresas com financiamentos pontuais.
- Incentivar a criação de cursos de plasma tecnológico em universidades e centros de pesquisa.
- Incentivar indústrias nacionais que produzam equipamentos de plasma tecnológico e nuclear.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação, como Fundos Setoriais e Lei da Inovação.

### *Plasma de Fusão*

- Acelerar a construção e operação do Laboratório Nacional de Fusão.
- Incentivar a formação de recursos humanos na área de Plasma de Fusão.
- Intensificar as colaborações internacionais com EURATOM.



- Iniciar colaborações internacionais, com respaldo do MRE, com países como Estados Unidos, Japão, China, Coréia e Rússia.
- Incentivar a criação de cursos e grupos de física de plasmas e de altas temperaturas a nível nacional, com ênfase no Norte e Nordeste.
- Aproveitar as políticas públicas existentes para a inovação, como Fundos Setoriais e Lei da Inovação.



# Física de Partículas e Campos

*Ioav Waga*

*João Ramos Torres de Mello Neto*

*Orlando Luis Goulart Peres*

*Saulo Carneiro de Souza Silva*

*Dionísio Bazeia Filho*

## Sumário Executivo

A Física de Partículas e Campos abarca algumas das maiores questões confrontadas pelos físicos hoje. A constatação de que a matéria bariônica (composta por prótons, nêutrons e elétrons) representa na verdade uma parcela pequena na composição geral do Universo e que o cosmos é majoritariamente formado por matéria escura e energia escura, dois fenômenos ainda não compreendidos, se manifesta como uma imensa oportunidade para o avanço das pesquisas.

Não é exagero dizer que essas questões, que envolvem hoje os alicerces da física (diante da incompatibilidade entre dois de seus maiores pilares, a mecânica quântica e a relatividade geral), movimentam os maiores investimentos, com consórcios internacionais desenvolvendo instalações caríssimas, como o LHC (*Large Hadron Collider*), acelerador de partículas recém-inaugurado do CERN que deve produzir resultados potencialmente revolucionários para o setor nos próximos anos.

O Brasil está bem inserido nesse contexto, com formação de pesquisadores que competem em condição de igualdade pelas vagas mais cobiçadas de pós-doutorado nas melhores instituições do mundo e com o acesso garantido aos principais complexos de pesquisa de altas energias do planeta.

Entretanto, ainda é preciso trabalhar para melhorar a distribuição dos grupos de pesquisa nacionais, hoje fortemente concentrados na região Sudeste, a despeito de esforços recentes do governo federal de descentrali-

zar os recursos. Também é preciso atingir melhor equilíbrio entre pesquisa teórica e experimental no país, que hoje pende mais para a primeira que para a segunda, e ampliar os investimentos em infraestrutura para que o Brasil possa ampliar seu poder computacional no GRID, grande rede internacional de processamento de dados.

## Estado da Arte

Séculos de experimentos e observações têm revelado os blocos fundamentais da matéria e como eles interagem entre si, achados que formam a base da civilização tecnológica moderna, fundamentada na compreensão de átomos, elétrons, fótons e na teoria quântica.

Uma das principais descobertas dos últimos dez anos, no entanto, relaciona-se com a ausência de dados sobre a composição da maior parte do Universo. Isso porque a constatação de que a matéria escura (ME) e a energia escura (EE) dominam o Universo indica que a maior parte do cosmos não é constituída de matéria ordinária (prótons, nêutrons e elétrons).

A existência de ME já havia sido proposta, na década de 1930, por Fritz Zwicky.

Ao investigar o aglomerado de galáxias de Coma, ele notou que não seria possível mantê-lo gravitacionalmente ligado apenas com a matéria luminosa observada nas galáxias que o constituem. Sua relevância para a formação das grandes estruturas no Universo, seu caráter exótico (matéria não bariônica) e o fato de que ela contribui com aproximadamente 22% da massa e da energia total do Universo são descobertas mais recentes que se tornaram tema de diversas linhas de pesquisa.

Como discutiremos, a natureza da ME é um grande mistério e descobrir as partículas que a constituem é um dos grandes objetivos do *Large Hadron Collider (LHC)*, acelerador de 27 quilômetros de circunferência localizado na fronteira da França com a Suíça e mantido pela Organização Européia para a Pesquisa Nuclear (CERN).

Também é desconhecida a natureza da energia escura, uma componente uniformemente distribuída e gravitacionalmente repulsiva que contribui

com 73% da energia total do Universo e que pode ser a responsável por sua expansão acelerada.

Há ainda a possibilidade de que essa aceleração cósmica seja consequência de uma teoria de gravitação estendida ou ainda de teorias em que o espaço-tempo possui dimensões extras. Um dos maiores avanços científicos realizados no século 20 foi o desenvolvimento do Modelo Padrão da física das partículas elementares. Ele tem sido extremamente bem-sucedido e é uma excelente aproximação na descrição das partículas elementares conhecidas e de suas interações até a escala de energia de algumas centenas de GeV.

O Modelo Padrão, no entanto, é incapaz de conciliar a mecânica quântica com a gravitação, o que impede um conhecimento mais profundo da origem do próprio Universo. Além disso, algumas descobertas recentes, como a existência de uma pequena massa para os neutrinos, mostram que ele é incompleto e sugerem que uma nova física é necessária além do Modelo Padrão.

Há ainda outras questões como a geração das massas das partículas elementares, a origem da assimetria matéria-antimatéria ou ainda a existência de novas simetrias na natureza, como a super-simetria.

Para responder a essas e outras questões fundamentais sobre a natureza do Universo serão necessárias novas observações cosmológicas, além de aceleradores de partículas mais potentes.

Com o início da operação do LHC e os preparativos para o *International Linear Collider (ILC)*, a física das partículas elementares está ingressando em uma nova era. Com um significativo aumento tanto na escala de energia como na taxa de colisão, novos experimentos terão acesso direto a novos fenômenos em que estaremos explorando uma nova fronteira de energia, a escala do teraelétron-volt.

As descobertas e os desafios a serem enfrentados nas diversas frentes da física das partículas elementares criarão uma interdependência cada vez maior entre físicos, cosmólogos, astrofísicos e astrônomos, tanto experimentais como teóricos. Ampliando sua atuação no cenário internacional, a comunidade brasileira deve estar preparada para esses novos tempos.

## **Desafios e Perspectivas**

*Os Princípios da Natureza - Há novas leis físicas e novas simetrias a serem descobertas?*

A busca pelas leis fundamentais da Natureza tem mostrado que as leis da física, e também as partículas governadas por elas, existem devido às simetrias da natureza. Isto nos leva a questionar se existem ainda outras simetrias ainda não descobertas. Uma delas pode ser a supersimetria, que prevê a existência de uma companheira supersimétrica para cada partícula elementar conhecida.

Parte do forte apelo teórico da supersimetria, que é um ingrediente essencial da teoria de supercordas, é sua possível conexão com a matéria escura, já que ela fornece um candidato natural, o neutralino. A supersimetria pode ser descoberta em aceleradores de partículas e o LHC, o mais potente acelerador em atividade no mundo, tem alguns experimentos dedicados a esse tipo de investigação.

*As Forças Fundamentais - Existe uma teoria unificada das interações?*

Nossa compreensão sobre as leis básicas da Natureza indicam que, ao nível mais fundamental, partículas e forças convergem para formar estruturas unificadas através das simetrias. Propostas como a grande unificação, ou estudos mais radicais como a teoria de supercordas, que inclui a força gravitacional, são as grandes candidatas.

Além disso, a compreensão das propriedades fundamentais da teoria quântica de campos, como o confinamento dos quarks, ou o desenvolvimento de técnicas de cálculos não perturbativas necessárias para o com-puto de espectros de energia, ou ainda a relação de diversas teorias entre si, rotuladas genericamente como dualidades, fazem parte do grande esforço teórico para compreender as teorias que descrevem a natureza. Um dos sete problemas do milênio, elegidos pelo *Clay Mathematics Institute*, e para o qual existe um prêmio de um milhão de dólares, é precisamente o problema do confinamento nas teorias de Gauge.

## *Energia Escura - Qual a causa da aceleração cósmica?*

As evidências que indicam a aceleração da expansão cósmica se multiplicaram nos últimos dez anos, apesar de a fonte dessa aceleração ainda permanecer desconhecida. A explicação mais simples é associá-la à densidade de energia do vácuo (ou constante cosmológica), caracterizada pelo parâmetro da equação de estado na qual a razão entre pressão e densidade de energia é constante e igual a  $-1$ . Uma alternativa interessante à constante cosmológica é um campo escalar extremamente leve que se comporta efetivamente como um termo cosmológico variável.

Outra proposta explorada recentemente é que a aceleração cósmica pode ser explicada se a teoria da relatividade geral não for adequada para descrever o universo em suas maiores escalas. Outra possibilidade para a aceleração cósmica são as teorias com dimensões extras, nas quais a matéria ordinária estaria confinada a uma “brana” tridimensional, que por sua vez estaria contida em um espaço de dimensionalidade mais alta, chamado de “*bulk*”. Das interações fundamentais, somente a gravidade poderia se propagar nessa dimensão espacial extra. Qualquer uma das alternativas acima representa uma mudança radical no conhecimento sobre a matéria, a energia e o espaço-tempo.

Podem ser denominadas genericamente de energia escura toda possível explicação para a aceleração cósmica, independente de ela ser uma nova componente exótica com pressão negativa e gravitacionalmente repulsiva, ou uma modificação da gravitação de Albert Einstein. Grande esforço teórico e observacional tem sido dedicado ao entendimento da natureza da energia escura e novos experimentos estão sendo planejados e construídos.

O objetivo desses trabalhos é determinar as propriedades da energia escura utilizando dados de mapas e catálogos de galáxias e de outros objetos distantes que serão elaborados nos próximos 10 anos. É importante que esses levantamentos tenham uma estratégia de observação que permita a combinação de diversos testes cosmológicos, uma vez que diferentes testes usualmente apresentam uma distinta sensibilidade à energia escura e estão sujeitos a diferentes erros sistemáticos.

Para obtermos resultados robustos, portanto, essa combinação é fundamental. Além disso, é necessário considerar tanto testes que medem a história da expansão do Universo como aqueles sensíveis à taxa de crescimento de estruturas que, em geral, é suprimida quando a energia escura começa a dominar o conteúdo cósmico.

Considerar esses dois tipos de testes (cinemático e dinâmico) é crucial se desejamos descobrir se a aceleração cósmica é proveniente de uma componente exótica com pressão negativa ou de uma gravitação modificada. Em linhas gerais, os principais objetivos da pesquisa em energia escura são: a) determinar da melhor forma possível se a aceleração cósmica é consistente com a constante cosmológica, isto é, com uma equação na qual a razão entre pressão e densidade de energia é constante e igual a  $-1$ . b) caso essa razão não seja igual a  $-1$ , determinar da melhor forma possível sua dependência com o desvio para o vermelho. c) buscar uma possível falha da teoria da relatividade geral checando a consistência dos testes cinemáticos e dinâmicos.

### *As Partículas Elementares*

Atualmente são conhecidas 57 espécies distintas de partículas elementares e suas propriedades são compreendidas detalhadamente. Elas são agrupadas em três famílias de quarks e léptons, que diferem entre si apenas pela suas massas. Da mesma forma que a mecânica quântica levou à compreensão da tabela periódica dos elementos, necessitamos de uma nova teoria que explique os padrões que encontramos para as partículas elementares.

Ela deve levar a uma compreensão para a existência de três famílias e para as grandes diferenças de massas entre elas. Um estudo detalhado dos quarks e léptons nos aceleradores revelarão as pistas para a solução desses problemas.

### *Matéria Escura*

A maior parte da matéria do Universo é escura. Sem ela, galáxias e estrelas não se formariam e a vida não existiria. Observações recentes mostram



que ela é completamente diferente de qualquer forma de matéria descoberta ou medida em laboratório.

Do lado teórico, a supersimetria prevê a existência de partículas que interagem com a matéria ordinária, fornecendo candidatos à matéria escura. É necessário estudar a matéria escura através de sua detecção direta em detectores colocados em grande profundidade, como o *Cryogenic Dark Matter Search*, nos Estados Unidos, ou criando matéria escura nos aceleradores de partículas, onde podem ser estudadas em detalhes.

Há ainda a possibilidade de que a matéria escura seja detectada de forma indireta, isto é, identificando-se os produtos de sua aniquilação ou decaimento. O Observatório de Neutrinos *IceCube* e o Telescópio Espacial Fermi de Raios Gama são experimentos importantes que buscam detectar a matéria escura indiretamente.

## Neutrinos

Uma das partículas mais elusivas e surpreendentes da natureza, os neutrinos interagem tão fracamente que trilhões deles passam pelos nossos corpos a cada segundo sem qualquer interação. O Sol produz uma quantidade imensa de neutrinos por meio da fusão nuclear. Essas reações produzem um tipo de neutrino que se transmuta em dois outros tipos durante a viagem a Terra.

O neutrino tem uma massa muito pequena, menos que um milionésimo da massa do elétron. A existência de neutrinos com massa requer uma física nova, talvez relacionada com a unificação. Estudos detalhados das propriedades dos neutrinos estão em andamento em diversos experimentos, como o *Main Injector Neutrino Oscillation Search*, nos Estados Unidos, e são essenciais para a compreensão de seu comportamento.

## O Início do Universo

Segundo o Modelo Padrão da Cosmologia, o Universo originou-se há cerca de 13,7 bilhões de anos num evento conhecido como *Big Bang*. A seguir, sofreu um período extremamente curto de expansão acelerada, a inflação cósmica, após o qual houve uma fase de expansão desacelerada e

esfriamento. Várias transições de fase ocorreram moldando o Universo e deixando relíquias que podem ser observadas ainda hoje. A compreensão do *Big Bang* e da inflação requer novas propostas para a física fundamental, uma teoria de gravitação quântica.

A reconstrução da história cósmica está sendo feita através de telescópios e satélites dedicados e também através da recriação em laboratório das mesmas condições iniciais do Universo logo após o *Big Bang*. Através de colisões de núcleos pesados em energias ultra-relativísticas, como as que são efetuadas no acelerador RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), nos Estados Unidos, ou as que serão efetuadas no LHC com núcleos do elemento chumbo, é possível criar um estado similar ao estado primordial que irá evoluir e passar pelas várias transições de fase da matéria nuclear, como ocorreu no período de expansão inicial do nosso Universo.

### *Antimatéria*

Sabemos que para cada partícula fundamental existe uma antipartícula. No *Big Bang* é quase certo que a mesma quantidade de partículas e antipartículas foram produzidas. As observações atuais, entretanto, indicam que existe muito mais matéria do que antimatéria. Um pequeno desequilíbrio entre matéria e antimatéria deve ter ocorrido durante a evolução do Universo, caso contrário toda matéria e antimatéria teriam se aniquilado deixando um Universo apenas com fótons e sem matéria.

Assimetrias sutis entre matéria e antimatéria são conhecidas experimentalmente, apesar de não serem suficientes para explicar o grande domínio da matéria sobre a antimatéria. Mecanismos novos que fazem a matéria se comportar de forma diferente da antimatéria devem existir, podendo estar conectados com novas interações além das conhecidas. Experimentalmente, esse problema tem sido abordado de duas formas. A primeira é através do estudo da quebra de simetria que poderia ocasionar este desequilíbrio entre a matéria e a antimatéria. No LHC, o experimento LHCb é dedicado inteiramente a esse estudo.

A antimatéria é também estudada através da formação e observação de núcleos e átomos de antimatéria para determinar suas características físicas.

O experimento ALPHA estuda as características do átomo de anti-hidrogênio, formado por um núcleo de antipróton acoplado a um pósitron. No acelerador RHIC, foram descobertos e estão sendo estudados novos núcleos de antimatéria, como o anti-hipertrítio.

### *Ondas Gravitacionais*

Uma das previsões mais antigas da teoria da relatividade geral é a existência de ondas gravitacionais. Da mesma forma que cargas elétricas aceleradas geram ondas eletromagnéticas, massas em movimento produzem ondas gravitacionais. A intensidade dessas ondas é extremamente pequena e requer o uso de técnicas extremamente sofisticadas para a sua detecção. Existem várias antenas gravitacionais em operação, como o LIGO, *Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory*, nos Estados Unidos, que utiliza a interferência de lasers.

O Detector de Ondas Gravitacionais Mario Schenberg, no Brasil, por sua vez, utiliza uma esfera ressonante. O objetivo desses detectores é medir as polarizações, frequências e amplitudes de ondas gravitacionais dando início a um novo tipo de astronomia usando ondas gravitacionais.

### *Dimensões Extras*

A hipótese da existência de dimensões extras teve um grande impulso, nos últimos anos, porque testes clássicos do tipo Eotvos determinaram que modificações da lei gravitação de Newton só podem existir para distâncias menores do que alguns milímetros. Essa ordem de distâncias corresponde a uma energia de alguns TeV, que é próxima à energia do acelerador LHC.

Caso algum fenômeno exista nessas distâncias, poderíamos ter um sinal tanto em aceleradores como em experimentos do tipo Eotvos. Um conceito revolucionário da teoria de supercordas é a unificação de todas as forças e partículas fundamentais da natureza como diferentes formas de vibração de pequenas cordas.

A consistência matemática da teoria requer a existência da supersimetria e de dimensões extras. A existência de dimensões extras pode se manifestar

tanto na área de partículas elementares como na cosmologia e a detecção de sua existência, de seu número e de seu tamanho são essenciais.

### *Potencial Contribuição Brasileira*

A área da física das partículas elementares e teoria de campos está passando por um período de grande atividade, não só pelos avanços nas diversas teorias como também pelo conjunto de resultados científicos obtidos recentemente. Além disso, existe hoje uma integração maior entre as diferentes subáreas da física de altas energias onde, por exemplo, os conhecimentos obtidos dos experimentos de aceleradores contribuem para a análise de dados de raios cósmicos, ou os dados obtidos em experimentos de astrofísica e cosmologia abrem novos testes para serem efetuados em aceleradores.

Essa integração entre as diferentes áreas vem acelerando o processo de evolução do conhecimento, aumentando mais ainda as atividades dessa área de conhecimento. Com o início das operações do acelerador LHC e o amadurecimento das análises de dados de outros experimentos como o Pierre Auger e os experimentos do FERMILAB e do RHIC, espera-se um período de atividade ainda maior com novas descobertas e a abertura de novas fronteiras de estudos.

Nesse contexto, a participação efetiva de pesquisadores brasileiros é fundamental para a manutenção do programa científico nacional na fronteira do conhecimento. Também é de vital importância que se mantenha uma política científica que permita a participação contínua dos brasileiros nos grandes centros teóricos e experimentais, não só de pesquisadores doutores como também de alunos que irão formar a próxima geração de pesquisadores. Existe também a necessidade de uma flexibilidade maior nas formas de fomento e apoio à pesquisa para que se adaptem à nova realidade de participação nas grandes colaborações internacionais.

Além do apoio à atividade externa, para fixar e aumentar de forma efetiva a participação brasileira nessa área seria necessário desenvolver núcleos e centros de pesquisas especializados em instrumentação, transferência de tecnologia e gestão de TI.

## Brasil na Área

A física brasileira nasceu com os trabalhos pioneiros na área da física das partículas elementares na década de 1940. Nomes como Gleb Wataghin, Guido Beck e seus descendentes científicos, como César Lattes, Mário Schenberg, Marcelo Damy de Souza Santos e Leite Lopes, difundiram e sedimentaram a área no Brasil. Hoje temos uma grande comunidade cujo trabalho dá prosseguimento às linhas iniciadas pelos patriarcas da física brasileira. Em seguida descreveremos as atividades desenvolvidas nos anos recentes e as perspectivas para o futuro.

### *Atividades Teóricas*

Existem grupos de pesquisa espalhados pelo Brasil nas mais diversas áreas da pesquisa teórica. O grupo de teoria de cordas do IFT/UNESP tem destaque internacional graças à sua proposta de formulação da teoria de supercordas utilizando espinores puros. Existem outros grupos que estudam vários aspectos da teoria de cordas. O estudo da teoria quântica de campos também merece destaque.

Existem grupos na UERJ, IFT/Unesp e USP-São Carlos dedicados ao estudo de aspectos não perturbativos das teorias de Gauge que também tem recebido atenção internacional. Ainda no IFUSP, CBPF, UFRJ, UFBA e UFPA existem grupos que se dedicam ao estudo de várias propriedades da teoria quântica de campos, inclusive o problema do confinamento e o efeito Casimir.

Os grupos teóricos mantêm uma intensa atividade na organização de workshops, escolas com nível de pós-graduação e conferências tópicas, inclusive trazendo para o Brasil várias conferências internacionais tradicionais. As melhores contribuições brasileiras na fenomenologia da física de partículas nos últimos tempos foram os estudos dos mésons escalares envolvendo pesquisadores do CBPF; extensões do modelo padrão no IFT/Unesp e a fenomenologia de oscilações de neutrinos, na PUC-RJ, IFUSP e UNICAMP.

## Atividades Experimentais

Existem grupos de pesquisa no Brasil participando dos principais experimentos de fronteira da física de altas energias. Através da participação direta nas colaborações desses experimentos, pesquisadores brasileiros contribuem de forma efetiva tanto na área de desenvolvimento tecnológico de instrumentação, como também em *softwares* de análise e processamento de dados e estudos de problemas científicos de fronteira.

Os grupos brasileiros têm acesso direto aos principais centros de pesquisa e laboratórios mundiais, como o FERMILAB e o *Brookhaven National Laboratory*, nos Estados Unidos, o CERN na Europa e o Laboratório Pierre Auger na Argentina.

No Brasil, os grupos interagem com a iniciativa privada para a implementação de novos centros de excelência, como o laboratório aberto de instrumentação montado no CBPF e o centro de computação de alta performance do GRID, montado em várias instituições de São Paulo e do Rio de Janeiro. A interação com a iniciativa privada se estende também ao desenvolvimento de produtos, como o exemplo das lentes ópticas do experimento Pierre Auger, que foi projetado como parte de um programa de doutorado e fabricado por uma empresa da cidade de Indaiatuba, no interior paulista.

Além das lentes ópticas, o experimento Pierre Auger desenvolveu, em parceria com a indústria brasileira, os tanques detectores do experimento que estão operando na Argentina. Além do ganho científico da participação direta dos pesquisadores brasileiros nas análises de dados e nas descobertas científicas obtidas nestes experimentos, com a produção de artigos científicos nas principais revistas de grande impacto, como *Science and Nature*, as atividades dos grupos experimentais é também bastante ativa na área de divulgação científica, programas de extensão universitária e complementação dos programas de graduação e pós-graduação.

Além dos diversos workshops, escolas de aperfeiçoamento e seminários de divulgação, existem programas especiais de divulgação e extensão, como o programa Helen do laboratório CERN, que permitiu que alunos de gra-

duação efetuassem estágios prolongados no acelerador LHC e nos seus experimentos.

Para melhorar a interação entre os diversos grupos experimentais do Brasil e auxiliar na cooperação dos diversos programas em andamento, foi criada a Rede Nacional de Física de Altas Energias (RENAFAE), um instrumento do MCT, ancorada no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), para coordenar as atividades nessa área. Por proposta dessa rede foram iniciadas negociações com o CERN para que o Brasil venha a tornar-se um País Membro Associado àquela instituição.

Essa possibilidade abre novas perspectivas para a participação da comunidade científica brasileira nas atividades daquele laboratório e, também, cria oportunidades para as indústrias brasileiras de base tecnológica, além de novas alternativas para a formação de engenheiros em temas associados à instrumentação científica.

A detecção de ondas gravitacionais vem sendo desenvolvida no Brasil através do detector Mario Schenberg, que utiliza uma antena esférica, instalado no IFUSP. Esse detector, quando plenamente operacional, poderá determinar a direção e a polarização, além da amplitude das ondas detectadas na faixa de frequência em torno de 3,2 kHz. Uma ampla colaboração com grupos de matéria condensada, envolvendo criogenia, supercondutividade e nanotecnologia existe para o desenvolvimento dessa antena.

### *Números e perspectivas*

Existem cerca de 470 pesquisadores no país que orientam, pelo menos, 350 estudantes de doutorado e 50 pós-docs distribuídos entre suas quatro subáreas: “Teoria de Campos”, “Cosmologia e Gravitação”, “Fenomenologia” e “Experimental”. A distribuição geográfica dos pesquisadores é a seguinte: Norte (3%), Nordeste (13%), Centro-Oeste (3%), Sudeste (69%) e Sul (12%), sendo notável a grande concentração dos grupos de pesquisa na região Sudeste. Esses números melhoraram graças aos enormes esforços que o governo federal vem fazendo ao priorizar as regiões mais desprovidas. Por fim, a distribuição dos pesquisadores por tipo de instituição é a seguinte: Federal (71%), Estadual (22%) e Privada (7%).

O Brasil observou nos últimos anos um enorme avanço na formação de pessoal. Assim que concluem o doutorado, os estudantes podem competir com estudantes estrangeiros, em condições de igualdade, na obtenção de posições de pós-doutores em instituições renomadas, tanto nos Estados Unidos como na Europa. De uma forma geral, os grupos de teoria de campos têm mantido um nível de excelência e de competitividade muito bom, com publicações nas revistas de mais alto impacto na área. Uma agregação maior entre eles é desejável a fim de aumentar a visibilidade internacional. Isso pode ser obtido através da formação de redes ou de um instituto nacional.

Na área experimental, a estratégia para o aumento da relevância brasileira deve ser o de agrupamento dos experimentais de altas energias em poucos grupos e a formação de fenomenólogos atrelados exatamente aos experimentos em que esses grupos estarão atuando. A coordenação de uma política científica neste sentido já vem sendo iniciada pela formação da RENAFAE, a Rede Nacional de Física de Altas Energias, que coordena as atividades dos diferentes grupos experimentais para aumentar a cooperação e melhorar a difusão de recursos e resultados.

Outro ponto é a diversidade da participação brasileira nos experimentos de altas energias, com contribuições em todos os níveis desde contribuição na pesquisa e desenvolvimento (P&D) dos experimentos, construção e montagem de detectores e sistemas de eletrônica, participação em tomadas de dados, lideranças em análises de física e coordenação científica e operacional. Existe, portanto, espaço para o aumento da contribuição brasileira nas diversas áreas de engenharias técnicas e computação, não só na área da física.

## **Relevância para a Sociedade**

### *Formação de Pessoal*

Os desafios apresentados pela física do século 21 requerem soluções de longo prazo e a única maneira de enfrentá-los é com a preparação de jovens altamente qualificados. Devemos atraí-los para a ciência utilizando



uma das principais características do ser humano: a curiosidade. Foi isso que levou o homem à Lua, a explorar o sistema solar e o Universo, a compreender o funcionamento de nosso planeta e do nosso próprio corpo. Mergulhamos nos átomos e no núcleo atômico e fomos a distâncias cada vez menores. A formação de pessoal altamente qualificado sempre tem sido uma das principais preocupações da área. O Brasil tem formado jovens teóricos capazes de competir e ganhar posições de pós-doutor no exterior. Nos últimos cinco anos, o país formou 278 doutores, 501 mestres e investimos em 807 estudantes de iniciação científica.

Para os próximos cinco anos, com o funcionamento pleno do LHC, deve ser verificado um grande aumento na formação de recursos humanos na área experimental. A formação de alunos nos programas de altas energias permite o acesso às colaborações internacionais, onde o estudante faz um estágio nos grandes centros de referência e uma interação direta com os grandes pesquisadores da área. Permite, também, uma interação grande entre os teóricos, os experimentais e entre as áreas de conhecimento de ciência fundamental com as ciências aplicadas. Para que a formação de novos pesquisadores e de pessoal técnico especializado seja mais efetiva e ampliada, uma política continuada de apoio aos grupos brasileiros na manutenção das colaborações internacionais é necessária, com programas, projetos e editais que permitam maior intercâmbio e mobilidade com outras áreas e instituições.

### *Desenvolvimento científico e tecnológico*

A curiosidade científica é o principal motor da área de partículas e campos. Seu objetivo envolve a necessidade de compreender o Universo e o que ele contém. A utilização desse conhecimento e das técnicas desenvolvidas para esse fim é o que gera a inovação. A *World Wide Web*, o diagnóstico por imagens e a tecnologia genética são exemplos de aplicações que se tornaram realidade graças à ciência fundamental. A inovação sempre ocorre através da expansão do conhecimento das ciências básicas, aliada à pesquisa tecnológica a partir de programas de treinamento em instituições providas de infraestrutura adequada.

Os grandes avanços e desenvolvimentos da ciência do século 21 serão dominados pela nossa capacidade de manipular o que acontece na fronteira do conhecimento humano. Sem dúvida alguma, a complexidade dos experimentos de altas energias e ondas gravitacionais gera uma demanda para o desenvolvimento de novas tecnologias, tanto na área de instrumentação como em eletrônica e na área de computação.

Além da demanda gerada pelos grandes experimentos, a participação em colaborações permite o acesso a programas de pesquisa e desenvolvimento em andamento. Essa troca de conhecimento pode ser aproveitada de forma mais efetiva se houver a formação de centros de tecnologia onde se possa efetuar a consolidação e transferência do conhecimento para a indústria nacional.

### *Impacto na economia*

Apesar de o objetivo científico da área ser a compreensão dos mecanismos que a natureza utiliza no seu nível mais fundamental, existem vários impactos diretos que influenciam no desenvolvimento econômico.

Há grande espaço para interação da indústria nacional com os grandes experimentos de altas energias e de ondas gravitacionais, não só para o desenvolvimento de novas tecnologias, mas também para a fabricação e fornecimento dos componentes necessários para esses experimentos.

Um exemplo de necessidade imediata seria a formação de grandes centros de computação e processamento de dados, que poderiam ser montados com tecnologia já existente na indústria nacional. Outro fato é a existência de um banco de dados no laboratório CERN dos fornecedores de equipamentos e peças dos experimentos do LHC.

A participação da indústria nacional nos experimentos do LHC permite a inclusão destas empresas neste banco de dados, abrindo um novo mercado que não mais se restringe a experimentos com participação de cientistas brasileiros.

## Infraestrutura

A participação na rede mundial de computadores para processamento de dados (GRID) é fundamental para a área de altas energias. Já existem alguns centros no Brasil com sistemas de computadores que participam do GRID, na forma de centros secundários denominados de *Tier2*. Esses centros estão distribuídos apenas nas cidades de São Paulo (USP e UNESP) e do Rio de Janeiro (CBPF, UERJ e UFRJ). Será necessário aumentar a capacidade de processamento desses centros e ampliar a capacidade de armazenamento para que possamos ter um centro primário, denominado *Tier1*, do GRID. Em paralelo, será necessário expandir os centros de computação para além dessas duas grandes cidades, a fim de ampliar e melhorar o acesso da participação de mais pesquisadores brasileiros nos programas científicos desenvolvidos no GRID. Isso demanda uma melhoria na qualidade das redes de comunicação fora dos grandes centros.

O desenvolvimento de centros de instrumentação e transferência de tecnologia também é vital para o desenvolvimento da área de altas energias no Brasil. Existem alguns laboratórios nacionais com características de multiusuários, como o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas, e o laboratório de instrumentação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro. É necessário, no entanto, ampliar a capacidade de desenvolver projetos variados nesses centros já existentes e também criar novos centros com laboratórios multiusuários. Já os recursos humanos de alta qualidade para o desenvolvimento de *software* são abundantes no Brasil. No caso de detecção de ondas gravitacionais, porém, ocorre o inverso: as instalações laboratoriais são satisfatórias, mas existe a necessidade urgente de recursos humanos de qualidade.

## Inclusão Social

O ensino de ciências no Brasil, tanto no nível fundamental como no médio, é reconhecidamente precário. A formação dos professores é incompleta e inadequada e poucos são aqueles capazes de levar para as salas de aula as últimas descobertas da ciência.

Para isso, é necessária a contribuição dos pesquisadores na divulgação científica, quer ao nível de cursos para professores, na redação de artigos de divulgação para revistas e jornais ou colóquios para o público leigo. A comunidade de partículas e campos participa ativamente dessas atividades: uma iniciativa recente e bem sucedida é o projeto “Estrutura Elementar da Matéria: Um Cartaz em Cada Escola”. Seu objetivo foi levar ao Ensino Médio conhecimentos básicos sobre os constituintes elementares da matéria e as interações que regem o mundo subatômico. A distribuição de um cartaz contendo um apanhado de conhecimentos adquiridos após a proposta de Dimitri Mendeleev amplia o horizonte de conhecimento dos estudantes, aguçando sua curiosidade científica e, possivelmente, despertando vocações para o estudo das ciências.

O cartaz é acompanhado de um panfleto explicativo que permite ao professor ter acesso às informações necessárias para responder às questões levantadas pelos alunos. Uma participação mais efetiva dos pesquisadores da área no programa educacional também é apoiada, através, entre outras coisas, da reciclagem de professores do Ensino Médio, estágios em laboratório para alunos de Ensino Médio e aprimoramento para professores de nível superior.

Um exemplo é o programa da Unicamp de reciclagem de professores do Ensino Médio, onde a cada seis meses é feito um workshop focado em algum tópico de interesse e da atualidade na física. Também existe um programa que está sendo implementado, coordenado pela secretaria estadual de ensino de São Paulo, onde as três universidades estaduais paulistas irão oferecer cursos de reciclagem e aprimoramento à distância para os professores da rede pública estadual.

Uma parceria entre o laboratório CERN e a SBF vem tentando iniciar um programa de intercâmbio de professores do ensino médio para participação em uma escola realizada nas dependências do CERN, em Genebra, que aborda assuntos de física de partículas com a intenção de capacitar os professores para que possam repassar aos alunos conceitos e tópicos de física de partículas elementares em níveis acessíveis.

Além da possibilidade de contribuição no programa educacional formal, a área de física de altas energias tem um papel muito importante na capacitação de pessoal qualificado, tanto nas áreas técnicas como nas de gestão.

## **Recomendações**

- Melhorar a distribuição regional de pesquisadores brasileiros, principalmente no Norte e no Centro-Oeste, com mais incentivos para a fixação de cientistas nessas regiões. Uma possível maneira seria a formação de parcerias entre órgãos de fomento federais e fundações estaduais de apoio à pesquisa (FAPs).
- Melhorar o balanço entre o número de pesquisadores teóricos e experimentais, incentivando as atividades experimentais.
- Apoio continuado às atividades experimentais através do financiamento de projetos por prazos mais longos, incluindo o fortalecimento e continuidade da RENAFAE.
- Apoio para a nucleação de grupos de pesquisa teóricos de diversas instituições, de forma a consolidar a pesquisa nas instituições menores e com menos experiência, através de editais específicos. Eventual consolidação dos grupos de pesquisa teóricos num instituto nacional nos moldes dos já existentes.
- Formação contínua de recursos humanos na área e manutenção de uma política de estado para a ciência que seja sustentável, com suporte ininterrupto de apoio financeiro aos grupos de pesquisa produtivos e competentes.



# Contatos

## **Sociedade Brasileira de Física - SBF**

Rua do Matão, travessa R, 187 - Edifício Sede  
Cidade Universitária  
05508-090, São Paulo, SP

Fone (11) 3034.0429

Fax (11) 3814.6293

Web [www.sbfisica.org.br](http://www.sbfisica.org.br)

### **Horário de Funcionamento:**

Segunda a sexta

8h30 às 12h00

13h30 às 17h30

### **Endereço para Correspondência:**

Sociedade Brasileira de Física

Caixa Postal 66328

05314-970 - São Paulo, SP

