

A FÍSICA
NO BRASIL
NA PRÓXIMA
DÉCADA

FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

**A FÍSICA NO BRASIL
NA PRÓXIMA DÉCADA**

Física da Matéria Condensada

**Sociedade Brasileira de Física
1990**

530.0981 Sociedade Brasileira de Física.

s678f

A Física no Brasil na Próxima Década.
São Paulo, Sociedade Brasileira de Física,
Instituto de Física da USP, 1990.

pt. ilus.

Conteúdo: pt.1-Física da Matéria Con -
densada.

Física - História - Brasil

Física - Investigações

t

PUBLICAÇÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

Diretoria 1987/1989

Gil da Costa Marques
Nelson Studart Filho
Henrique Lins de Barros
Adalberto Fazzio
Wido H. Scheiner
Suzana de Souza Barros

Diretoria 1989/1991

Gil da Costa Marques
Nelson Studart Filho
José D'Albuquerque e Castro
Adalberto Fazzio
Wido H. Schreiner
Ana Ma. Pessoa de Carvalho

Presidente
Vice-Presidente
Secretário Geral
Secretário
Tesoureiro
Secretária para Assuntos de Ensino

COMISSÃO COORDENADORA

Gil da Costa Marques (Coordenador Geral)

Sergio M. Rezende

Oscar Sala

Carlos O. Escobar

Iberê L. Caldas

Cid B. Araujo

Paulo M. Bisch

Suzana de Souza Barros

Fernando C. Zawislak

Subvencionada por

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico



Financiadora de Estudos e Projetos



REVISÃO E DIAGRAMAÇÃO

Fernando Luiz C. S. Braga

Laura Junqueira Caldas

CAPA

Marcelo R. Gussoni

DATILOGRAFIA

Maria da Graça Braga

COMISSÃO DE MATÉRIA CONDENSADA

COORDENAÇÃO GERAL

Sergio M. Rezende - UFPE (COORDENADOR)

Eugênio Lerner - UFRJ

Oscar Hipólito - IFQSC

SEMICONDUCTORES

Alaor S. Chaves - UFMG

Adalberto Fazzio - USP

Nelson Studart Filho - UFSCAR

MAGNETISMO E MATERIAIS MAGNÉTICOS

Sergio M. Rezende - UFPE

Afonso G. Gomes - CBPF

SUPERCONDUTIVIDADE

Eugênio Lerner - UFRJ

Oscar Ferreira Lima - UNICAMP

Spero P. Morato - IPEN

CRISTAIS LÍQUIDOS E POLÍMEROS

Antonio M. Figueiredo Neto - USP

Alaide P. Mamana - UNICAMP

Celso P. de Melo - UFPE

VIDROS, CERÂMICAS E CRISTAIS

Michel Aegerter - IFQSC

FÍSICA ESTATÍSTICA e TEORIA DE SÓLIDOS

Silvio R.A. Salinas - USP

CRISTALOGRAFIA E ESTRUTURA DE SÓLIDOS

Aldo Craievich - LNLS

RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Horácio Panepucci - IFQSC

Gaston Barberis - UNICAMP

ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER E OUTRAS TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Carlos Alberto do Santos - UFRN

Adalberto Vasques - UFRS

Fernando C. Zawislak - UFRS

A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA NA PRÓXIMA DÉCADA

ÍNDICE

1. A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA.....	01
2. SEMICONDUTORES.....	21
3. MAGNETISMO E MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	51
4. SUPERCONDUTIVIDADE.....	75
5. CRISTAIS LÍQUIDOS E POLÍMEROS.....	93
6. CERÂMICAS, VIDROS E CRISTAIS.....	124
7. FÍSICA ESTATÍSTICA E TEORIA DE SÓLIDOS.....	145
8. CRISTALOGRAFIA E ESTRUTURA DE SÓLIDOS.....	166
9. RESSONÂNCIA MAGNÉTICA.....	192
10. ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER E OUTRAS TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	212

APRESENTAÇÃO

O projeto "A Física no Brasil na Próxima Década", cujo resultado é agora tornado público, foi concebido pela Diretoria da Sociedade Brasileira de Física em 1987. Ao longo de quase três anos promovemos amplas discussões com a comunidade científica tendo obtido, de uma parte apreciável da mesma, amplo apoio. Recebemos, de um grupo de mais de 50 físicos atuantes nas suas áreas de pesquisa, não só apoio, mas eficiente colaboração na elaboração dos textos depois de executarem o árduo trabalho de coligir e analisar os dados referentes à Física Brasileira.

O documento contém um quadro atualizado da situação da Física no Brasil hoje, completando assim, o documento anterior da SBF "A Física no Brasil", publicado em 1987, e se propõe a encerrar, acima de tudo, uma orientação prospectiva. Procura apresentar a Física que projetamos para o Brasil amanhã. Pretendeu-se assim, que a comunidade científica e a sociedade em geral tomasse conhecimento e refletisse a respeito dos seguintes tópicos:

- . As direções que as diversas áreas da Física deverão tomar no Brasil e as justificativas para um tal direcionamento.
 - . Os projetos de cada área, independentemente do custo, e que tenhamos competência para realizar.
 - . As necessidades, em termos de recursos humanos, para a realização deste projetos.
 - . O levantamento dos equipamentos existentes em nossos laboratórios, sua adequação, necessidades para sua manutenção e aprimoramento dos mesmos.
 - . Os recursos financeiros para a execução de projetos novos, dos existentes e para aqueles em andamento.
- O levantamento dos recursos financeiros permite determinar quanto deveremos investir para o cumprimento das metas de desenvolvimento da Física no Brasil.

Ao fornecer esses dados, acreditamos que a SBF está adicionando elementos importantes para a formulação de uma política científica e tecnológica para o País. É também uma tentativa de buscar caminhos para a atuação da Comunidade Científica em uma sociedade democrática, e, antes de tudo, um esforço coletivo no sentido de halizarmos o futuro da Física brasileira.

É importante ressaltar que o documento não pretende cercar o surgimento de novos projetos na próxima década. A natureza dinâmica da ciência fará, inevitavelmente, com que surjam novas propostas. Estas, como todas aqui apresentadas, deverão ser analisadas no mérito e em igualdade de condições com as oferecidas neste documento. Alertamos ainda, e de forma mui especial aos órgãos de fomento, para eventuais omissões, apesar do nosso esforço e do esforço das diversas comissões, pois o presente documento pode não conter todos os projetos relevantes da comunidade dos físicos no Brasil.

Finalmente, a Diretoria da SBF agradece aos diversos colaboradores que trabalharam na elaboração do documento e, de uma maneira especial, aos coordenadores das áreas cujo trabalho e dedicação queremos ressaltar e registrar. Agradecemos, também, o apoio financeiro obtido da Finep e do CNPq sem os quais o documento não teria se tornado viável.

Gil da Costa Marques
São Paulo, 24 de agosto de 1990

1. Física da Matéria Condensada

1.1 DESCRIÇÃO

A Física da Matéria Condensada investiga os estados da matéria em que os átomos constituintes estão suficientemente próximos e interagem simultaneamente com muitos vizinhos. Ela é uma área de investigação básica, que procura a explicação detalhada de propriedades e fenômenos da matéria condensada a partir dos conceitos e das equações fundamentais da mecânica quântica e da física estatística. São particularmente interessantes as propriedades elétricas, ópticas, magnéticas, mecânicas e térmicas. Por outro lado, a Física da Matéria Condensada tem uma enorme quantidade de aplicações na tecnologia moderna. Por exemplo, foi a partir de investigações nesta área que surgiram grandes inovações tecnológicas como os transistores, os circuitos integrados, os microprocessadores, os fios supercondutores e os lasers semicondutores que deram origem às comunicações ópticas.

Esta área da Física começou a adquirir características próprias apenas a partir de 1948, inicialmente sob o nome de Física do Estado Sólido. Até aquela época as propriedades da física dos sólidos eram objeto de estudo como exemplo de aplicação da mecânica quântica, estabelecida cerca de vinte anos antes. Foi a descoberta do transistor naquele ano que deu um enorme impulso à pesquisa da Física de Sólidos.

Na década de 50 os trabalhos nesta área estavam concentrados nos sólidos cristalinos, cujos íons formam um arranjo ordenado periódico. Nesses sólidos ocorrem fenômenos que não existem em materiais amorfos. Além disso, como eles têm estrutura cristalina com propriedades de simetria bem definidas, os fenômenos podem ser interpretados pelas leis da Física com mais facilidade. Com o progresso das técnicas experimentais e teóricas de investigação, esta área se estendeu a materiais desordenados como os vidros, as cerâmicas, os polímeros, as ligas amorfas e até mesmo aos líquidos, passando a ser conhecida como Física da Matéria Condensada. Nesta área da física trabalham atualmente mais de 40% dos físicos de todo o mundo e a cada ano surgem novas linhas de pesquisa, impulsionadas pela descoberta de novos fenômenos e de novos materiais artificiais. Estas linhas por sua vez abrem o potencial para o desenvolvimento de novos dispositivos que encontram aplicações nos mais variados segmentos tecnológicos, o que realimenta o interesse pela pesquisa básica.

Entretanto, não foi apenas por causa de sua importância tecnológica que a nova área se desenvolveu rapidamente. A enorme variedade de fenômenos que os elétrons e os núcleos apresentam coletivamente em sólidos deu origem a descobertas fundamentais e excitantes. Esta é uma das razões para que cerca de 50% dos Prêmios Nobel dos últimos 18 anos tenham sido dados a físicos que trabalham nesta área. Foram eles J. Bardeen, L.N. Cooper e J.R. Schrieffer (1972 - teoria de supercondutividade), L. Esaki, I. Giaever e B. Josephson (1973 - efeitos de tunelamento em sólidos), P.W. Anderson, N.F. Mott e J.H. Van Vleck (1977 - estudos de sólidos amorfos e propriedades magnéticas da matéria), P. Kapitza (1978 - estudos em baixas temperaturas), N. Bloembergen, A.L. Shalov e K.M. Siegbahn (1981 - espectroscopia

com lasers e a fotoelétrons), K.G. Wilson (1982 - teoria de grupo de renormalização e transições de fase), K.von Klitzing (1985 - efeito Hall quântico), G. Binnig, H. Rohrer e E. Ruska (1986 - invenção do microscópio de tunelamento e do *microscópio eletrônico*) e K.A. Müller e J.G. Bednorz (1987 - supercondutividade em altas temperaturas).

A Física da Matéria Condensada é atualmente uma das áreas mais estimulantes da ciência, contribuindo continuamente para a descoberta de novos fenômenos fundamentais e de novos materiais avançados. Apenas nos últimos dez anos pode-se destacar: a descoberta do efeito Hall quântico; o desenvolvimento de materiais semicondutores fabricados pela deposição sucessiva de monocamadas atômicas formando super-redes, hetero-estruturas ou poços quânticos; a descoberta de efeitos magnéticos e eletrônicos em sistemas de dimensionalidade menor que 3; a identificação e compreensão de fenômenos críticos e transições de fase em sistemas complexos, a formulação teórica e a observação experimental de fenômenos de turbulência e caos em uma grande variedade de sistemas; a descoberta de processos de condução por ondas de densidade de carga e mais recentemente a síntese de materiais supercondutores a temperaturas mais altas.

A interpretação dos novos fenômenos na matéria condensada tem requerido a utilização cada vez mais frequente de técnicas originadas na teoria de campos e no estudo de partículas elementares, como a teoria de grupo de renormalização. Este fato tem atraído para esta área o concurso de físicos teóricos do mais alto calibre, que por sua vez desenvolvem técnicas novas, que encontram aplicações nas outras áreas. O rápido progresso nas técnicas de computação eletrônica permitiu ainda o cálculo semi-quantitativo de inúmeras propriedades dos sólidos. Do ponto de vista fundamental, encontramos na Física da Matéria Condensada uma variedade muito grande de sistemas de muitas partículas. A investigação destes sistemas, ou de modelos propostos para descrevê-los, tem evidenciado aspectos fundamentais da Física de Muitos Corpos, constituindo um imenso "laboratório" para o estudo da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. A compreensão de propriedades termodinâmicas de equilíbrio e de não-equilíbrio dos sistemas mais simples tem fornecido informações valiosas para a descrição de sistemas mais complexos de muitas partículas, como ocorre em *Astrofísica* ou no domínio biológico.

Do ponto de vista experimental, uma característica importante da Física da Matéria Condensada é seu caráter descentralizador, pois ela possibilita a investigação de um problema físico de fronteira completo, com laboratórios de custos e dimensões pequenos comparados aos das grandes máquinas utilizadas na Física Nuclear e de Partículas Elementares. Além disso, ela utiliza uma grande variedade de técnicas experimentais baseadas em instrumentação eletrônica, óptica e criogênica (veja a Tabela 1-2) fazendo com que se torne muito propícia para a formação de técnicos e pesquisadores. A instrumentação típica usada nesta área encontra aplicações em outros campos da ciência, como a Química, Biofísica, Geofísica, Ciência de Materiais, Ciências Agrárias, assim como em Engenharia e Medicina. Um dos exemplos mais notáveis é a tomografia de ressonância magnética nuclear, que está causando um enorme impacto na Medicina.

1.2 A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA NO BRASIL

A. Breve Histórico

O precursor da Física da Matéria Condensada no Brasil foi Bernard Gross, físico alemão que imigrou em 1933. Gross foi trabalhar no Instituto Nacional de Tecnologia fundado no Rio de Janeiro naquele ano, onde montou um laboratório para estudar propriedades elétricas de materiais dielétricos. Um de seus primeiros discípulos foi Joaquim Costa Ribeiro, que em 1944 descobriu o efeito termo-dielétrico que ocorre no processo de solidificação de dielétricos - o efeito Costa Ribeiro. Apesar deste início promissor a Física dos Sólidos custou a se estabelecer no Brasil. Dez anos após a descoberta do transistor, quando o laser já estava sendo investigado, não havia mais do que meia dúzia de físicos de sólidos no País, concentrados em três grupos: dois acadêmicos, no Rio de Janeiro e em São Carlos, este último criado por Sérgio Mascarenhas, discípulo de Gross e Costa Ribeiro, e um terceiro formado a partir de 1953 no CTA em São José dos Campos. Enquanto os dois primeiros grupos se voltavam para os aspectos acadêmicos e para a formação de pessoal, o então denominado "Projeto Germânio" do CTA se dedicava à extração e purificação do Germânio, a partir, inter alia, dos resíduos dos fornos de carvão de Tubarão em Santa Catarina. Esse "Projeto Germânio" se lançava a partir da visão tecnológica a fabricação dos velhos "diodos e transistores de ponta" para uso em eletrônica compactada. A presença desse Projeto em São José dos Campos teve um papel fundamental no desenvolvimento subsequente e imediato dos Laboratórios de Física dos Sólidos em São Paulo e em Campinas, já que na época passaram pelo ITA como professores, Sergio Porto, Newton Bernardes e o suíço Walter Baltensperger, e como alunos, Rogério Cerqueira Leite e José Ripper Filho entre outros.

O primeiro grande investimento tanto em termos de pessoal como em equipamentos foi realizado no início da década de 60 no antigo Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Por iniciativa do físico teórico, Mario Schönberg, e sob a orientação do físico de Estado Sólido e Baixas Temperaturas, Newton Bernardes, organizou-se em São Paulo o primeiro grande grupo de Física de Sólidos e Baixas Temperaturas. Seu laboratório de Baixas Temperaturas se tornou operacional em 1962 e atraiu para São Paulo inúmeros estudantes e professores de outras Universidades brasileiras e também do exterior.

No resto do País o crescimento continuou muito lento na década de 60, período em que foram criados pequenos grupos nas Universidades Federais de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e do Ceará, na PUC e no CBPF do Rio de Janeiro. A partir dos anos 70 no entanto, este quadro começou a mudar rapidamente, com a criação de grupos em várias universidades brasileiras, como na UNICAMP em Campinas e na Federal de Pernambuco. Para isto foi fundamental a criação da FINEP com a visão de seu primeiro presidente, José Pelúcio Ferreira, que entendia que o desenvolvimento tecnológico não poderia existir sem uma ciência básica forte. Também foram importantes a ambição e a ousadia trazidas para a UNICAMP pelo grupo que era do Laboratório da Bell, Sérgio Porto, Rogério Cerqueira Leite e José Ripper Filho. Eles conseguiram levar para o Instituto de Física recém criado naquela Universidade

dezenas de pesquisadores experimentais com doutorado, apoiados por muitos milhões de dólares para a montagem de seus laboratórios. A rápida expansão da Física na UNICAMP provocou profundas mudanças no quadro brasileiro e, a despeito de certos problemas, teve o mérito de alterar a escala dos investimentos na Física da Matéria Condensada no País.

Na década de 70 o número de pesquisadores em Matéria Condensada se multiplicou no País, propiciando a criação de novos grupos em várias regiões e a expansão daqueles que já existiam. Não há dados muito precisos, mas sabe-se que em 1969 o número de doutores nesta área era em torno de 50. Naquele ano, o primeiro encontro nacional de físicos do Estado Sólido realizado em São Carlos reuniu a totalidade dos doutores da área e não teve mais que 70 participantes. Já em 1981 o levantamento realizado para o documento de Avaliação e Perspectivas do CNPq constatou a existência de cerca de 300 doutores em Física da Matéria Condensada, o que representa um crescimento por um fator 6 em 12 anos. De lá para cá o crescimento foi bem menor, porém contínuo. Os detalhes específicos do desenvolvimento das diversas sub-áreas de pesquisa nas instituições estão apresentados nos capítulos seguintes.

Os físicos da Matéria Condensada se reúnem anualmente numa das "cidades das águas", no Sul de Minas Gerais, no Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada. O primeiro Encontro em Cambuquira em 1977 reuniu pouco mais de cem pessoas e foi caracterizado por uma grande informalidade nas apresentações e nas trocas de informações sobre trabalhos em andamento. Depois ele circou por São Lourenço, Poços de Caldas e nos últimos anos tem sido realizado em Caxambú. Nos anos recentes o Encontro tem tido cerca de 700 participantes. Atualmente ele tem uma organização formal de apresentações de trabalhos, porém o clima de informalidade e espontaneidade de formação de grupos de trabalho dos primeiros anos tem sido mantido.

B. Situação Atual

Dentro da física, e mesmo de outros ramos da ciência, a Física da Matéria Condensada é uma das áreas mais desenvolvidas no Brasil atualmente. Seu progresso ocorreu a despeito da crise econômica que freou a ciência no País a partir de 1980 e da perda prematura de seus líderes mais experientes, alguns faleceram (Costa Ribeiro e Porto), outros mudaram de campo na ciência e vários buscaram ocupações diversas em outros ramos. Nesta área trabalham cerca de 60% dos 1.000 físicos ativos com doutorado no País, publicando artigos científicos nos melhores periódicos internacionais em linhas de fronteira, tais como: super-redes de semicondutores; efeito Hall quântico; He superfluido; sistemas magnéticos desordenados; fenômenos críticos e transições de fase; turbulência e caos; supercondutividade em altas temperaturas, etc.

Para elaboração deste documento foi escolhida uma divisão da Física da Matéria Condensada em nove sub-áreas, das quais cinco correspondem a importantes classes de materiais e quatro representam técnicas de aplicação ampla. Como qualquer outra divisão, a que foi adotada não é perfeita. Procuramos

o menor número de sub-áreas que minimizasse as superposições de pesquisadores entre as sub-áreas e se aproximasse daquelas resultantes do agrupamento espontâneo nos Encontros de Caxambú. A distribuição percentual dos doutores nessas sub-áreas é a seguinte:

Semicondutores	23%
Magnetismo e Materiais Magnéticos	12%
Supercondutividade	7%
Cristais Líquidos e Polímeros	4%
Vidros, Cerâmicas e Cristais	6%
Física Estatística e Teoria dos Sólidos	24%
Cristalografia e Estrutura de Sólidos	8%
Ressonância Magnética	9%
Mössbauer e Outras Técnicas de Caracterização	6%

É importante notar que as técnicas ópticas, que também tem grande aplicação em Matéria Condensada, estão agrupadas com Física Atômica e Molecular. No entanto, como quase todos os grupos de pesquisa que usam técnicas ópticas trabalham com os materiais da divisão acima, eles estão incluídos no presente documento.

Com a experiência acumulada na construção e utilização de instrumentos científicos, os físicos da Matéria Condensada no País têm dado significativas contribuições em áreas aplicadas, tais como em biofísica, genética (melhoramento do milho com ressonância magnética), arqueologia (datação por várias técnicas), agricultura (instrumentação de análise, técnicas criogênicas), física médica (bisturis criogênico e a laser; técnicas diversas com lasers magnetocardiógrafo; tomografia de RMN), entre outras. Mais recentemente começaram a surgir efeitos concretos desta área da física na tecnologia avançada, como na microeletrônica e nas comunicações ópticas através de um fenômeno de transbordamento de conhecimento acumulado nas universidades para as indústrias nacionais. Este fenômeno tem sido possível em parte devido a proteção dada à indústria nacional pela Lei da Reserva da Informática, aprovada em 1984. A necessidade de copiar, adaptar e desenvolver tecnologia avançada tem levado indústrias nacionais a contratarem pesquisadores em física, procurando uma maior interação com as universidades. Este fato está abrindo grandes perspectivas para o papel da Física da Matéria Condensada no desenvolvimento tecnológico do País.

A Tabela 1-1 apresenta dados relativos ao pessoal científico e a produtividade em termos de publicações em Física da Matéria Condensada no País. Cabe notar que a superposição de pesquisadores nas diversas sub-áreas é pequena, no máximo 15%. Na verdade os números subestimam a quantidade de pesquisadores ativos nesta área porque nem todos responderam ao questionário da SBF. Isto ocorreu principalmente entre os físicos teóricos, que talvez não tenham respondido por conta da natural falta de motivação para prever investimentos. Acredita-se que o número de doutores ativos em Física da Matéria Condensada em 1988 seja de aproximadamente 600, sendo cerca de 60% experimentais. Este número representa um aumento por um fator dois na década de 80. Pelos dados da Tabela 1.1 é possível estimar

que nos últimos dez anos, 70% dos doutores adicionais foram formados no País, o que corresponde a uma taxa de formação de quase um doutor por orientador com doutorado em dez anos. Esta taxa é muito baixa em relação ao potencial de formação dos grupos.

A distribuição dos físicos com doutorado nas diversas sub-áreas pelas instituições do País está mostrada na Tabela 1.2. Os dados demonstram o caráter descentralizador da Física da Matéria Condensada. Apesar de haver uma maior concentração de doutores na Região Sudeste, há bons grupos de pesquisa espalhados por todo o País.

A Tabela 1.3 mostra uma listagem de técnicas utilizadas em Física da Matéria Condensada, seu custo aproximado, bem como os grupos no País que delas dispõem. É importante chamar a atenção para diversos aspectos desta Tabela. Em primeiro lugar, como foi ressaltado anteriormente, ela mostra enorme variedade de técnicas utilizadas em Matéria Condensada e portanto o grande poder de formação de recursos humanos nesta área. Nela vê-se também a grande gama de custo das diversas técnicas. Finalmente na Tabela 1.3 vê-se que há muitas técnicas importantes de custo médio que são inexistentes ou pouco difundidas no País.

O atual quadro relativamente favorável da Física da Matéria Condensada no Brasil é resultado da política da formação de pessoal empreendida a partir de 1970 e dos investimentos realizados durante a década de 70. É preciso ressaltar, entretanto, que os investimentos para montar novos laboratórios e para expandir e modernizar os já existentes praticamente cessaram em 1980. Este fato tem preocupado muito a comunidade científica nos últimos anos, pois ela está percebendo que nossos laboratórios estão ficando obsoletos e perdendo a capacidade de competir em linhas de fronteira. É importante fazer as autoridades governamentais entenderem que os grupos experimentais no Brasil foram instalados na década de 70 com equipamentos de custo inferior a cem mil dólares, como aparelhos eletrônicos, lasers, espectrômetros analógicos, etc, como a Tabela 1-3 demonstra. Por outro lado, os modernos laboratórios de pesquisa em Matéria Condensada dispõem, além dos equipamentos pequenos, de outros de porte médio de maior custo. Estes equipamentos de porte médio, que são essenciais para produzir e caracterizar inúmeros materiais artificiais usados para pesquisa avançada e para aplicações tecnológicas, são quase inexistentes no Brasil.

Além de impedir a expansão e a modernização dos laboratórios existentes, a falta de recursos tem inibido a criação de novos grupos experimentais e mesmo a elaboração de projetos mais ambiciosos. Na década de 80 há apenas duas iniciativas de porte dignas de registro. A primeira foi a criação em 1986 do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas, e a outra a criação neste ano do Centro Internacional de Física da Matéria Condensada, na Universidade de Brasília. Com relação ao LNLS houve uma preocupação na comunidade com o custo do projeto, uma vez que os grupos universitários, que são os centros formadores de recursos humanos, há anos não têm sido adequadamente financiados. Atualmente o LNLS tem grande apoio entre os físicos, pois eles entenderam que a construção de uma máquina como a fábrica de fótons será de grande importância para a Física da Matéria Condensada no País. Entretanto, é importante enfatizar que a revitalização da ciência experimental no Brasil não será

alcançada sem a estabilização e o financiamento pleno dos bons grupos universitários de pesquisa. Isto pode ser feito no formato de atendimento de balcão, mas também através de programas específicos abrangendo vários grupos, como por exemplo nas sub-áreas de semicondutores, materiais supercondutores, materiais magnéticos, cristais líquidos, polímeros, etc.

C. Carências e Dificuldades

A Tabela 1.4 mostra que historicamente foram investidos nos grupos de pesquisa (que responderam aos questionários) a quantia equivalente hoje a US\$ 51.000.000,00 (cinquenta e um milhões de dólares) para compra de equipamentos. Adicionando a este número US\$ 15.000.000,00 (quinze milhões de dólares) referentes a equipamentos de infraestrutura (liquefadores de He e N₂, oficinas mecânica e eletrônica, computadores e bibliografia) e US\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de dólares) referentes aos grupos que não responderam, chega-se a um total de US\$ 70.000.000,00 (setenta milhões de dólares). Considerando um número médio de 350 doutores em 15 anos, chegamos a um valor médio de investimento/Dt/ano de cerca de US\$ 13.000,00 (treze mil dólares). Este valor é muito baixo comparado com o que é investido nesta área da física nos países industrializados. Ele atesta de forma inequívoca um fato facilmente constatável por aqueles que visitam nossas universidades. Há muitos mestres e doutores, formados com grande esforço individual e do País, que não dispõem de equipamentos e infraestrutura mínima para desenvolver atividades de pesquisa para as quais estão capacitados. A falta de recursos adequados e a irregularidade nos fluxos de financiamento das agências de fomento constituem a grande dificuldade desta e de outras áreas da física no País.

1.3 A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA NA PRÓXIMA DÉCADA - RECOMENDAÇÕES

A. Projeções

A evolução da Física da Matéria Condensada no País mostra que, a exemplo do que ocorre nos países industrializados, este ramo da ciência pode contribuir decisivamente para nosso desenvolvimento científico, tecnológico e industrial. Isto se dará através dos resultados das pesquisas obtidas nos laboratórios universitários e dos centros de pesquisa, bem como da alta qualidade dos recursos humanos preparados para as empresas.

Estimulados pelo projeto "A Física na Próxima Década", os grupos de pesquisa do País elaboraram planos e projeções para suas linhas de pesquisa, investimentos e recursos humanos necessários e capacidade de formação. Os capítulos seguintes apresentam o detalhamento referente a cada sub-área da Matéria Condensada. As Tabelas 1.4 e 1.5 resumem os dados quantitativos das diversas sub-áreas.

A Tabela 1.4 apresenta os investimentos propostos para aquisição de equipamentos nos próximos 5 anos nas diversas sub-áreas. Os maiores equipamentos e as técnicas que seriam implantadas nos grupos

de pesquisa do País estão detalhados nos capítulos seguintes. As propostas de investimento foram feitas pelos grupos com duas hipóteses de trabalho: nas condições atuais de financiamento e de disponibilidade de pessoal; nas condições próximas das ideais, supondo uma melhoria significativa na política de Ciência e Tecnologia do País.

Nas condições atuais, os grupos de pesquisa em Matéria Condensada propõe investimentos de cerca de US\$ 50.000.000 (cinquenta milhões de dólares). Como mostrado nas tabelas dos capítulos seguintes esses investimentos manterão o caráter de pequeno porte da grande maioria dos laboratórios de pesquisa do País. Nenhum salto qualitativo será dado nessas condições. Como mostra a Tabela 1.5 os grupos prevêem formar apenas 577 mestres e 311 doutores nos próximos 5 anos nas condições atuais de trabalho, que são números totalmente insuficientes para uma evolução adequada da Matéria Condensada no País.

Por outro lado, em condições próximas das ideais, vários laboratórios darão um salto qualitativo que possibilitará aumentar a competitividade da Física da Matéria Condensada e, conseqüentemente, melhorar a formação de recursos humanos e a geração de tecnologia no País. Nestas condições os grupos poderão formar 889 mestres e 512 doutores em cinco anos, o que representa um claro aumento na taxa de formação de pós-graduados no País (nos últimos 10 anos foram formados 652 mestres e 251 doutores nas diversas sub-áreas).

Para as condições ideais será preciso investir US\$ 100.000.000,00 (cem milhões de dólares) na aquisição de equipamentos nos próximos 5 anos. O custeio correspondente, sem incluir pessoal permanente, é estimado em US\$ 70.000.000,00 (setenta milhões de dólares) em 5 anos. Este número corresponde a 70% do total em investimentos de capital, sendo 30% para manutenção (10% ao ano em 3 anos) e o restante para insumos, serviços e outros encargos. Considerando os investimentos em infraestrutura e em outros grupos de pesquisa, a quantia total necessária para financiar a Matéria Condensada no País é de US\$ 200.000.000,00 (duzentos milhões de dólares) nos próximos 5 anos (130 para capital e 70 para custeio) e cerca de US\$ 300.000.000,00 (trezentos milhões de dólares) nos 5 anos seguintes (150 para capital e 150 para custeio).

É importante notar que nas condições ideais de trabalho os grupos de pesquisa do País se consideram aptos a formar em torno de 500 doutores nos próximos 5 anos. A extrapolação deste número para os 5 anos seguintes possibilitaria atingir no ano 2000 até 1500 doutores em Física da Matéria Condensada. Este número é pelo menos dez vezes menor do que o número existente nos Estados Unidos atualmente e é também menor do que o número existente nos laboratórios de pelo menos duas empresas, a IBM e a Bell Laboratories. É preciso então fazer um esforço de formação de pessoal maior do que aquele feito até hoje, quer seja com o envio de maior número de bolsistas ao Exterior, quer seja estimulando os grupos nacionais a aumentarem sua capacidade de formação.

Com relação ao mercado de trabalho, os grupos atuais prevêem uma absorção de cerca de doutores nos próximos 5 anos. É razoável supor que 100 doutores serão absorvidos por outros grupos acadêmicos

e que o setor produtivo possa absorver pelo menos 50. Apesar destes números serem modestos, eles estão além da capacidade de formação prevista pelos atuais grupos do País.

O montante do financiamento proposto para a Física da Matéria Condensada, de US\$ 200.000,00 (duzentos milhões de dólares) nos próximos 5 anos, possibilitará aos grupos de pesquisa do País embarcarem em projetos mais ambiciosos. Além de formar pesquisadores em maior quantidade e melhor qualidade e de melhorar o nível de pesquisa básica nesta área, os grupos de pesquisa contribuirão de maneira decisiva para o domínio de várias técnicas e processos de grande importância tecnológica. Dentre elas cabe destacar nas diversas sub-áreas:

Semicondutores:

Nanolitografia para preparação de circuitos de altíssima integração.
Fabricação de multicamadas e heteroestruturas de semicondutores.
Técnicas de integração opto-eletrônica ultra-rápida.
Fabricação de novos dispositivos semicondutores.

Supercondutividade:

Preparação de monocristais e filmes finos de óxidos supercondutores.
Integração de super e semicondutores em circuitos eletrônicos.

Materiais Magnéticos:

Preparação de ligas amorfas de alta permeabilidade e para ímãs permanentes.
Preparação de meios e processos de gravação magneto-óptica.

Cristais Líquidos e Polímeros:

Desenvolvimento de painéis de LCD de grande área.
Desenvolvimento de mostradores coloridos e televisores de LCD.
Preparação de baterias de dispositivos eletro-ópticos de polímeros.

Cerâmicas, Vidros e Cristais:

Preparação de monocristais de Si e semicondutores III-V para circuitos integrados.
Preparação de monocristais para lasers e dispositivos eletro-ópticos.
Preparação de cerâmicas avançadas e vidros especiais.

Técnicas de Análise e Caracterização de Materiais

Utilização de fontes de luz síncrotron para análise de materiais.
Implantação de técnicas de ressonância magnética de alta resolução.
Disseminação de técnicas microscópicas de análise físico-química.

B. Recomendações

As recomendações dos grupos de pesquisa que são comuns às diversas sub-áreas da Física da Matéria Condensada, bem como aquelas propostas pela comissão responsável pelo presente relatório, estão apresentadas a seguir. As argumentações relativas às recomendações estão apresentadas ao longo deste documento.

B.1. Recomendações ao Governo Federal e Agências de Fomento

B.1.1. Recursos Financeiros

A Física da Matéria Condensada pode dar contribuição decisiva para o desenvolvimento de tecnologia de ponta no País. Para tal ela precisa ser adequadamente financiada para que seja possível repor equipamentos obsoletos, implantar novas técnicas de pesquisa, adquirir bibliografia, acessórios, insumos e custear a manutenção dos laboratórios. Os grupos de pesquisa desta área têm planos concretos para aplicar bem, nos próximos 5 anos, US\$ 130.000.000,00 (cento e trinta milhões de dólares) em investimentos de capital e US\$ 70.000.000,00 (setenta milhões de dólares) para custeio. Nos 5 anos seguintes eles poderão aplicar US\$ 150.000.000,00 (cento e cinquenta milhões de dólares) em investimentos e US\$ 150.000.000 (cento e cinquenta milhões de dólares para custeio.

B.1.2. Programas Especiais

Há várias atividades em Matéria Condensada que formam a base para o desenvolvimento de tecnologia de ponta. Este é o caso da pesquisa em preparação, caracterização e estudo de fenômenos em materiais avançados, tais como: semicondutores, materiais magnéticos, cristais líquidos, polímeros não convencionais, vidros, cerâmicas e materiais amorfos.

O Governo deve estimular o crescimento da pesquisa envolvendo estes materiais, criando programas especiais para o apoio financeiro dos grupos de pesquisa e priorizando esta área na concessão de bolsas de estudo no País e no Exterior, tanto em nível de doutorado quanto de pós-doutorado.

B.1.3. Laboratórios de Novos Materiais

Uma forma efetiva de estímulo à pesquisa em novos materiais é a criação de laboratórios de médio porte nas instituições já existentes, com caráter interdisciplinar e com instalações para a preparação e

caracterização de materiais. É fundamental que estes laboratórios disponham de técnicos e recursos específicos para atenderem a usuários de outras instituições visando otimizar os recursos empregados.

A médio prazo, com a maior disponibilidade de pessoal especializado, deve-se estudar a criação de novas instituições de pesquisa, visando desenvolver pesquisas tecnológicas em materiais estratégicos.

B.1.4. Importações

As importações de equipamentos científicos sofisticados, insumos especiais, partes e peças de reposição são absolutamente essenciais para o andamento da pesquisa científica e tecnológica. Considerando que elas representam menos que 1% do total das importações do País e que vão ter um impacto decisivo para nosso desenvolvimento científico e tecnológico, é fundamental que o Governo Federal tome medidas urgentes para que as importações de material científico sejam agilizadas.

B.1.5. Pessoal Técnico

As agências de fomento devem criar programas especiais de formação e aperfeiçoamento, inclusive no Exterior, de técnicos altamente qualificados para apoiar as atividades de pesquisa de ponta, bem como mecanismos que assegurem a eles remuneração adequada.

B.2 Recomendações à Própria Comunidade de Físicos

B.2.1. Aos Programas de Pós-Graduação

É importante aumentar a taxa de formação de doutores em Física da Matéria Condensada, estimulando as áreas experimentais. O ritmo atual, que coincide com o proposto pelos grupos para os próximos 5 anos, de 1 doutor formado por ano para cada 10 pesquisadores experimentais é totalmente insuficiente para as necessidades do País.

B.2.2. Aos Físicos Teóricos da Matéria Condensada

É da maior importância para o desenvolvimento da Física da Matéria Condensada que os físicos teóricos procurem trabalhar em problemas mais próximos daqueles encontrados em materiais reais. Isto é particularmente importante na formação de novos doutores nas áreas em que os laboratórios do País estão produzindo cientificamente.

B.2.3. Aos Físicos Experimentais

Enquanto que o número de doutores em Física no País é da ordem de 1000, os doutores em áreas de ponta da engenharia não chegam a 200. A Física da Matéria Condensada pode e deve catalizar um esforço de seus pesquisadores para influir no desenvolvimento tecnológico do País. Isto decorrerá

naturalmente se os físicos experimentais da área se interessarem por problemas em áreas de interface com a tecnologia de ponta (dispositivos, instrumentação, etc.) e formando neles estudantes de graduação e pós-graduação.

TABELA 1.1
 PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE EM FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA (Dados de 1988)

SUB-ÁREAS	NÚMERO DE GRUPOS	DOCTORES			MESTRES		ESTUDANTES ATUAIS			ESTUDANTES FORMADOS (77-88)		ARTIGOS EM REVISTAS 78-82 83-87	
		T	E	TOTAL	T	E	IC	EX	D	M	D	78-82	83-87
Semicondutores	30	54	78	23*	11	46	68	52	37	123	49	411	703
Magnetismo e Materiais Magnéticos	14	14	53	12*	--	9	46	31	31	78	34	197	249
Supercondutividade	10	6	37	7*	--	5	25	16	4	12	3	18	61*
Cristais Líquidos e Polímeros	10	4	18	4*	--	7	38	30	14	78	14	44	150**
Vidros, Cerâmicas e Cristais	13	2	39	7*	--	16	55	38	31	62	15	51	163**
Física Estatística e Teoria dos Sólidos	32	128	6	23*	13	9	69	59	60	132	67	447	805
Cristalografia e Estrutura dos Sólidos	15	5	43	8*	3	17	22	24	20	56	16	117	221
Ressonância Magnética	16	1	50	9*	1	4	29	30	22	82	40	185	191
Mossbauer e Outras Técnicas de Caracterização	11	4	33	6*	1	7	22	16	10	29	13	137	158
TOTAL	151	218	357		29	120	374	296	229	652	251	1607	2701

*Inclui artigos publicados em 88

**Inclui artigos publicados em 88 e 89

TABELA 1.2
DOCTORES POR SUB-ÁREA NAS INSTITUIÇÕES

INSTITUIÇÃO	SUB-ÁREA									
	SELECIONADORES	MAGNETISMO	SUPERCONDUTIVIDADE	CRISTAIS LÍQUIDOS E POLÍMEROS	CERÂMICAS, VIDROS E CRISTAIS	FIS. ESTATÍSTICA, E TEORIA DOS SÓLIDOS	CRISTALOGRAFIA E SÓLIDOS	RESSONÂNCIA MAGNÉTICA	ESPEC. MOSSBAUER E OUTRAS TÉCNICAS	TOTAL
UF AMAZONAS	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2
UF CEARÁ	9	-	-	-	8	2	-	-	6	25
UF RIO GRANDE DO NORTE	5	3	-	-	1	5	-	-	1	15
UF PARAÍBA	-	-	-	-	-	4	-	-	-	4
UF PERNAMBUCO	4	5	3	2	-	7	-	5	-	26
UF ALAGOAS	-	-	-	-	1	8	2	-	-	11
UF SERGIPE	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
UF MATIA	8	-	-	-	-	6	4	-	-	18
Un BRASÍLIA	4	-	-	1	-	5	3	-	-	13
UF GOIÁS	-	-	-	-	-	-	3	3	-	6
UF MINAS GERAIS	12	6	5	2	-	12	2	7	5	51
UF ESPÍRITO SANTO	-	3	1	-	1	1	-	-	4	10
UF RIO DE JANEIRO	3	7	4	-	-	7	1	3	-	25
FUC/RJ	6	1	3	-	-	9	1	1	-	21
CEPF	-	6	9	-	2	3	1	4	5	30
IME	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2
UF FLUMINENSE	6	4	-	-	-	5	-	2	-	17
USP-SÃO PAULO	15	10	6	3	4	8	8	6	2	62
IPEN	-	-	5	-	4	-	1	-	-	10
IME	8	-	-	-	-	-	-	-	-	8
UNICAMP	26	7	3	-	3	25	7	5	5	81
CPqD- TELEBRÁS	9	-	-	-	-	-	-	-	-	9
USP-SÃO CARLOS	6	-	-	5	11	8	11	6	-	47
UF SÃO CARLOS	9	6	1	-	2	6	-	2	-	26
UF PARANÁ	-	-	-	-	-	1	3	-	-	4
UF SANTA CATARINA	-	-	-	7	2	4	-	-	2	15
UF RIO GRANDE DO SUL	-	9	3	1	2	8	-	-	7	30
UF SANTA MARIA	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2
TOTAL	132	67	43	21	41	137	47	46	37	568

TABELA 1.3
TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE MATERIAIS, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE FENÔMENOS DA MATÉRIA CONDENSADA

CUSTO US\$	TÉCNICA	UTILIZAÇÃO	GRUPOS NO BRASIL
	Resistividade, tunelamento, efeito Hall, magnetoresistividade	Propriedades de transporte elétrico (metais, semi e supercondutores)	UNICAMP, CBPF, UFRS, UFG, PUC, UFF, UFRN
	Fotocondutividade, DLTS	Propriedades opto-eletrônicas (semicondutores)	UNICAMP, UFRN
	Magnetropia, susceptibilidade e histerese magnética	Propriedades magnéticas	UFRS, CBPF, IFUSP, PUC UNICAMP, UFRG, UFES
	Calor específico e dilatação térmica	Propriedades térmicas, transições de fase	UFRJ, UFSC, UFRG, PUC
	Análise termodiferencial e termogravimétrica (DSC, TGA, DTG)	Propriedades térmicas, diagramas de fase	UNICAMP, UFRG, UFSC, UFRN
20-100 mil	Piezoelectricidade, histerese elástica absorção e propagação de ultra-som	Propriedades elásticas, transições de fase	IFUSP, UFSCAR, UFRG
	Medidas termoeletricas	Propriedades eletrônicas (níve de Fermi) e termoeletricas	
	Microscopia óptica	Caracterização de materiais; propriedades ópticas (cristais líquidos)	IFUSP, UFSC, UER, UFPR
	Espectroscopia Mossbauer	Propriedades magnéticas e estruturais, interações hiperfinas, caracterização de materiais	CBPF, UFRS, IFUSP, UFRJ, UFCE, UFRN, UFRG, UFES, UNB, UFSC
	Métodos químicos e eletroquímicos	Preparação de polímeros e cristais líquidos	IFUSP, UNICAMP, UFPE, UFSC, UFF
	Metallurgia do pó, sol-gel, carbonização, grafitação	Preparação de insumos para fabricação de cristais, vidros, etc.	UFSC, UFRN, UFES

TABELA 1.3
TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE MATERIAIS, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE FENÔMENOS DA MATÉRIA CONDENSADA

Continuação

CUSTO USE	TÉCNICAS	UTILIZAÇÃO	GRUPOS NO BRASIL
	Sintetização, carbonização, tratamento térmico em altas temperaturas	Preparação de cerâmicas (supercondutores de alto T_c) e diversos materiais sólidos	UNICAMP, IPEN, UFES, CTA, PUC, CBPF, UFRN, FTS
	Resfriamento rápido	Preparação de ligas amorfas, vidros e quasi-cristais	UNICAMP, CBPF, UFES, UFSC
20-100 mil	Epitaxia na fase líquida (LPE)	Preparação de camadas monocristalinas	UNICAMP
	Espectrofotometria óptica: absorção, reflexão e luminescência (visível, UV, IV)	Propriedades ópticas; transições eletrônicas vibracionais, magnéticas, defeitos	UFRJ, CBPF, UNICAMP, IFUSP, IFQSC, UFRJ, PUC, UFPE
	Espectroscopia foto-acústica e foto-térmica	Propriedades ópticas	UNICAMP, CBPF, UFSCAR, UFRN
	Rotação de Faraday, birrefringência e dicroísmo	Propriedades magnéticas e magneto-ópticas	UFPE, UFRG
	Fotolitografia de alta resolução	Confecção de dispositivos e estruturas microscópicas	CTI
	Crescimento de cristais: Bridgman, Czochralski, método de fluxo	Preparação de monocristais	IFQSC, UFRG, UNICAMP, IPEN
	Evaporação em alto-vácuo, sputtering	Preparação de filmes finos	IFQSC, UNICAMP, UFRG, PUC, CBPF
	Espectroscopia óptica de alta resolução com lasers: visível e infravermelho	Propriedades ópticas, transições eletrônicas e moleculares	UNICAMP, IFQSC, UFPE, UFF, UFRS
100-300 mil	Espectroscopia resolvida no tempo com lasers de pico e femtossegundo	Propriedades ópticas rápidas; sistemas fora do equilíbrio; mecanismos de relaxação	UNICAMP, UFPE, IFQSC, PUC, UFAL
	Espectroscopia óptica não-linear	Propriedades ópticas em alta potência de radiação	UFPE, IFQSC, UNICAMP, PUC, UFAL

TABELA 1.3
TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE MATERIAIS, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE FENÔMENOS DA MATÉRIA CONDENSADA

Continuação

CUSTO US\$	TÉCNICAS	UTILIZAÇÃO	GRUPOS NO BRASIL
	Espalhamento de luz; Raman, Brillouin, Rayleigh	Excitações elementares, fônons, magnons, plásmons, transições eletrônicas	UNICAMP, UFPE, UFRG, UFCE
	Técnicas criogênicas; nitrogênio líquido	Resfriar amostras até cerca de 77k	Quase todos
100-300 mil	Magnetometria com SQUID	Propriedades magnéticas	PUC/RJ, UFBJ
	Ressonância ciclôtrônica e oscilações magneto-tônicas	Propriedades eletrônicas, nível de Fermi	
	Ressonância magnética RMR e RMN	Análise química; análise estrutural; biofísica; dosimetria; tomografia	IFUSP, CBPF, UNICAMP, UFPE, IFQSC, UFF
	Ressonância Magnética - RPE, ENDOR, FMR, absorção de microondas	Propriedades magnéticas; magnons; análise estrutural; defeitos; biofísica	IFUSP, CBPF, UNICAMP, UFPE, IRE, IFQSC, UFRG, UFRJ, UFGO, PUC
	Difratometria de raios-X	Determinação de estruturas, caracterização de materiais, orientação de cristais	IFUSP, UFSC, CTI, IFQSC, UNB, UNESP, UNICAMP, PUC, UFPE, UFBA, UFCE, UFRG, CBPF
	Espalhamento de raios-X, SAXS	Transições de fases estruturais, sólidos heterogêneos	IFUSP, UNICAMP, UFPR
	Topografia de raios-X, difração de cristal duplo e múltiplo	Defeitos cristalinos	IFUSP, UNICAMP, UFPR
	Técnicas criogênicas; hélio líquido	Resfriar amostras até cerca de 2K	IFUSP, CBPF, UFRJ, UFRS, IFQSC, UNICAMP, UFRG, UFPE, PUC, FTI
300 mil - 2 milhões	Elatro-fotoemissão, XPS, UPS		

TABELA 1.3
 TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE MATERIAIS, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DE FENÔMENOS DA MATÉRIA CONDENSADA

Continuação

CUSTO US\$	TÉCNICAS	UTILIZAÇÃO	GRUPOS NO BRASIL
	Espectroscopia com elétrons Auger, LEED, ESCA, SIMS, XED	Análise química microscópica; análise de superfície	URICAMP, UFPA
	Refrigeração de diluição	Resfriar amostras até fração de K	USP, UFRJ
	Espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier	Determinação de energias de vibração de rede e de moléculas; análise química	UFPA
	Microscopia eletrônica - varredura e transmissão	Análise quantitativa de elementos; morfologia; microanálise estrutural	UNICAMP, USP
	MOCVD, MBE e CBE	Preparação de multicamadas atômicas cristalinas	UNICAMP, UFPA, PUC
	Microscopia de tunelamento	Microscopia a nível atômico e molecular	-
0,3- 2 milhões	Técnicas associadas a feixes de nêutrons: difração e espalhamento	Estruturas magnéticas; excitações magnéticas	-
	Técnicas associadas a luz síncrotrônica: espectroscopias de foto-emissão, EXAFS, XANES, espalhamento elástico e inelástico	Estrutura eletrônica de volume e superfície; estrutura atômica de volume, superfície e interface; física atômica e molecular	-
	Técnicas microscópicas com partículas - aniquilação de pósitrons, rotação de spin de sôn	Análise química; análise microestrutural	-
	Implantação iônica	Implantação de íons de forma controlada para modificação de propriedades mecânicas e eletrônicas de materiais	UFPA
	Espectroscopia com feixe de íons; RBS channeling	Análise de elementos	UFPA
1 - 50 milhões	Fontes de feixes de nêutrons	Produção de feixes de nêutrons para aplicações diversas	IPEN
	Fontes de luz síncrotrônica	Produção de feixes de luz de grande intensidade em largo espectro de frequência (visível até raios-X)	Em construção no LNL

TABELA 1.4
 INVESTIMENTO EM EQUIPAMENTOS PARA FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

SUB-ÁREA	INVESTIMENTO REALIZADO (1) (US\$ milhões)	INV./OR/ANO (2) US\$ mil	INVESTIMENTO PROPOSTO (3) PRÓXIMOS 5 ANOS (US\$ milhões)	
			Cond. Atuais	Cond. Ideais
Semicondutores	20,0	16,0	11,0	30,0
Magnetismo	5,0	8,0	4,5	8,0
Supercondutividade	4,5	12,0	6,5	10,0
Cristais Líquidos e Polímeros	1,0	10,0	3,0	6,0
Vidros, Cerâmicas e Cristais	5,5	18,0	5,5	10,0
Física Estatística e Teoria dos Sólidos	2,0	0,6	4,0	6,0
Cristalografia e Estrutura dos Sólidos	5,0	10,0	6,0	10,0
Ressonância Magnética	5,0	10,0	3,5	8,0
Häuserbauer e Outras Técnicas de Caracterização	3,0	5,3	6,0	10,0
TOTAL	51,0		50,0	98,0

(1) Custo atual de reposição por equipamentos equivalentes

(2) Valor médio obtido em período que varia de uma sub-área para outra

(3) Não inclui custeio, cujo valor estimado é 70% do investimento para 5 anos (sem pessoal).

TABELA 1.3
RECURSOS HUMANOS EM FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

SUB-ÁREA	DOCTORES ATUAIS	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO EM 5 ANOS				EXPANSÃO EM 5 ANOS			
		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
		H	D	H	D	H	D	H	D
Semicondutores	132	87	47	146	77	8	33	14	66
Magnetismo	67	65	34	98	56	7	20	12	41
Supercondutividade	43	24	11	37	20	4	17	24	29
Cristais Líquidos e Polímeros	22	45	14	66	39	6	11	12	21
Vidros, Cerâmicas e Cristais	41	48	38	88	72	28	31	43	52
Física Estatística e Teoria dos Sólidos	134	139	87	201	124	3	24	3	58
Cristalografia e Estrutura de Sólidos	48	44	26	74	38	10	25	27	51
Ressonância Magnética	51	78	34	107	53	9	13	18	41
Kossbauer e Outras Técnicas	37	47	20	72	33	2	9	14	21
TOTAL	575	577	311	889	512	77	183	169	380

2. Semicondutores

2.1 DESCRIÇÃO

A Física de Semicondutores (FS) é uma das principais áreas de pesquisa em Física da Matéria Condensada. Este fato decorre da enorme variedade de fenômenos físicos observados nestes materiais e que têm atraído a atenção tanto pelo interesse científico quanto pelas aplicações tecnológicas.

A pesquisa básica em semicondutores iniciou-se ainda no século XIX com a observação por M. Faraday de que, diferentemente dos metais, sua resistência elétrica diminuía com o aumento da temperatura. Fenômenos tais como a fotocondutividade, alta potência termo-elétrica, corrente por portadores de carga positiva e retificação de corrente obtida pela junção de semicondutores diferentes foram observados a seguir. Estes fenômenos constituíam um grande mistério até que na década de 30 uma teoria de bandas foi estabelecida a partir da Mecânica Quântica.

Semicondutores típicos são sólidos cristalinos, predominantemente com ligação covalente, que possuem um gap de energia E_g entre as bandas de valência e condução pequeno quando comparado aos valores de E_g dos isolantes. Semicondutores suficientemente puros não conduzem corrente elétrica a $T = 0$ K, enquanto que ocorre condução eletrônica (elétrons ou buracos) fortemente dependente da temperatura devido a impurezas, ativação térmica ou influências externas, como radiação. Exemplos clássicos de semicondutores são silício, germânio e compostos dos grupos III-V (GaAs, AlAs, InP, InAs, GaSb, GaP, etc. e suas ligas), dos grupos II-VI (CdTe, HgTE, etc. e suas ligas) e dos grupos IV-VI (PbTe, SnTe, etc. e suas ligas). O gap de energia varia na faixa de 0-2 eV. Propriedades semicondutoras podem ainda ser observadas em uma gama enorme de materiais, incluindo sólidos amorfos e cristais orgânicos.

Os objetivos principais de pesquisa nesta área são a compreensão dos fenômenos físicos fundamentais bem como a descoberta de novos materiais semicondutores, o desenvolvimento de sofisticadas técnicas de crescimento e caracterização de estruturas artificiais semicondutoras, e a fabricação e aprimoramento de novos dispositivos microeletrônicos.

Algumas sub-áreas da FS são bem estabelecidas, enquanto que outras estão crescendo rapidamente em importância. Sem dúvida, os desenvolvimentos de novas técnicas de crescimento epitaxial, especialmente MBE (molecular beam epitaxy) e MOCVD (metal-organic chemical vapor deposition) têm tido fundamental importância pois possibilitam a fabricação de novas estruturas com propriedades físicas extremamente interessantes. A revolução que se seguiu à construção de novos dispositivos microeletrônicos com dimensões físicas cada vez menores. Isto abriu um novo campo da Física, denominado genericamente de sistemas mesoscópicos, que trata de estruturas grandes na escala atômica mas suficientemente pequenas de modo que a coerência quântica das ondas eletrônicas domina os efeitos microscópicos. Fenômenos físicos fascinantes como o efeito Hall quantizado e localização de Anderson têm sido observados em sistemas de semicondutores de reduzida dimensionalidade.

As propriedades físicas de interesse em materiais semicondutores são estudadas usando uma grande variedade de técnicas experimentais como fotoluminescência e absorção óptica (bandas de energia, excitons, impurezas); *magneto-resistência* (efeito Hall); espectroscopia Raman (excitações coletivas, fônons); espectroscopia infravermelha (plásmons, elétrons quentes); calor específico (densidade de estados); espectroscopias de lasers de pico e femto segundo (termalização dos elétrons e fônons); ressonância ciclotrônica (polarons, massa efetiva); espectroscopia Auger, RHEED, microscopia eletrônica (análise de interface); DLTS (defeitos).

Várias contribuições fundamentais à Física neste campo de pesquisa foram reconhecidas pela comunidade científica através da concessão do Prêmio Nobel a J. Bardeen, W. Shockley e W.H. Brattain (1956- descoberta do transistor), L. Esaki (1973 - tunelamento em semicondutores), N. Mott (1977 - semicondutores desordenados) e K. Von Klitzing (1985 - descoberta do efeito Hall quantizado).

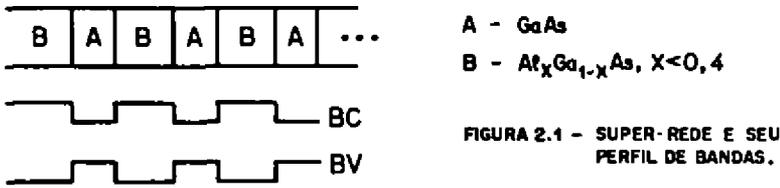
A pujança das atividades de pesquisa em FS pode ser avaliada pela enorme quantidade de conferências internacionais com grande participação de cientistas. A principal delas é a Conferência Internacional de Física de Semicondutores (em sua 19a. edição) que realiza-se bianualmente e é promovida pela IUPAP. Outras agregam tópicos mais específicos como defeitos em semicondutores, propriedades eletrônicas de sistemas bidimensionais, super-redes e microestruturas, estruturas semicondutoras moduladas etc. No Brasil, realiza-se a cada dois anos, a Escola Brasileira de Física de Semicondutores com a presença de renomados conferencistas do exterior.

Os dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos se baseiam nas propriedades ópticas e elétricas (mais especificamente, de transporte elétrico) dos semicondutores. Portanto, a pesquisa fundamental nesses materiais se concentra fortemente nos fenômenos ópticos, eletro-ópticos e de transporte elétrico. Entretanto, as impurezas adicionadas ou naturalmente encontradas em semicondutores determinam a densidade e o tipo de portadores de carga e afetam suas mobilidades elétricas. Decorre daí um interesse muito grande no estudo da produção de cristais ultra-puros. Paralelamente há interesse na investigação de defeitos em semicondutores, no intuito de se compreender sua difusibilidade, estrutura eletrônica e espectro de energia. Pelo fato de muitos dispositivos conterem interfaces entre materiais distintos e também pela crescente miniaturização dos dispositivos há um grande interesse na física de interfaces e superfícies.

Os dispositivos microeletrônicos, até uma década atrás, eram baseados no Ge e principalmente no Si. Monocristais destes elementos são obtidos com altíssima pureza. Além do mais o gap de ambos os materiais, 0,7ev para o Ge e 1,1ev para o Si, está numa faixa excelente para aplicações eletrônicas. No caso do Si, há uma vantagem adicional de que o SiO₂, que se forma facilmente na superfície do Si por aquecimento em atmosfera de oxigênio, resulta numa interface excelente para um importante e amplamente utilizado transistor de efeito de campo (MOSFET - metal-oxide-semiconductor field effect transistor). O Si tornou-se por isso o material principal para a microeletrônica. Entretanto, Ge e Si são materiais que possuem gap indireto e portanto as transições puramente ópticas com energia E_g não são possíveis (ocorre criação ou aniquilação de fônons). Tal fato limita severamente as aplicações destes

materiais em optoeletrônica. Esta se baseia principalmente em alguns semicondutores compostos de gap direto dos grupos III-V, II-VI e IV-VI.

Na exploração dos semicondutores compostos, um acontecimento extraordinariamente inovador foi a concepção e realização de heteroestruturas (exemplo: super-redes, poços quânticos, etc) de compostos superpostos ocorrida nos anos 70. Técnicas de crescimento epitaxial permitem crescimento de películas cristalinas de ótima qualidade com controle de espessura até da ordem do parâmetro de rede do cristal. Isto permite um controle externo do perfil de bandas da heteroestrutura. O sistema mais amplamente investigado é GaAs/Al_xGa_{1-x}As. A Figura 2.1 abaixo ilustra uma super-rede desses materiais.



Como se vê na figura, nas regiões do composto de menor gap (GaAs) forma-se um poço de potencial tanto para o elétron como para o buraco. A largura do poço está na faixa dos 10 nm, mas larguras tão pequenas como 1 nm (10⁻⁹m) são obtidas. Em poços tão estreitos o movimento dos portadores na direção perpendicular às películas é quantizado. Portadores capturados pelo poço têm portanto um comportamento quase bidimensional, já que não há, ignorando-se tunelamento de um poço para outro, movimento perpendicular às películas.

Poços que permitem a quantização dos níveis são denominados poços quânticos. A obtenção de poços quânticos em heteroestruturas semicondutoras levou à descoberta de fenômenos novos, a um grande avanço nas aplicações convencionais de semicondutores e à concepção de novas aplicações. Se doparmos o material de gap maior com impurezas doadoras de portadores, tais portadores migrarão para dentro do poço. Pode-se assim obter gases de elétrons ou buracos altamente densos. Como os portadores ficam espacialmente separados dos íons que os originaram, a sua mobilidade elétrica no plano das camadas é muito elevada. No caso específico do GaAs, gases de elétrons de densidade 10¹¹ - 10¹²cm⁻² são obtidos com mobilidade de 10⁶cm²/volt.seg. a temperaturas de hélio líquido; o recorde é 5x10⁶cm²/volt.seg, o que significa velocidade de arrastamento de 5 Km/seg para campo elétrico de 0,1 volt/cm! A alta mobilidade desses elétrons deu origem a tipos de FET (field effect transistors) denominados HEMT (high electron mobility transistor) que constituem os transistores de mais alta frequência de operação já obtidos. A mobilidade do gás de elétrons em poços quânticos de GaAs à temperatura ambiente é de 10³cm²/volt.seg, ou seja, somente cerca de três vezes maior que a do gás confinado na interface Si-SiO₂ em um MOSFET. Entretanto, no MOSFET não se obtém melhoria muito significativa com o resfriamento, opostamente ao que ocorre com o HEMT de GaAs. Computadores ultra-rápidos baseados em GaAs estão sendo projetados para operar sob refrigeração com nitrogênio líquido, situação em que a

mobilidade do gás de elétrons já é 10^2 vezes maior que a temperatura ambiente. O super-computador CRAY III que já está sendo comercializado, se baseia em GaAs resfriado.

Além da adequação para a microeletrônica, as estruturas GaAs/AlGaAs são também excepcionalmente eficazes em dispositivos optoeletrônicos. Resultou disto o desenvolvimento de circuitos optoeletrônicos embutidos na mesma pastilha. Outros tipos de estruturas com qualidades elétricas e ópticas comparáveis às do GaAs/AlGaAs são InP/InGaAs e InP/InGaAsP. Os lasers de GaAs/AlGaAs emitem luz com comprimento de onda de cerca de 0,8nm ao passo que com as duas outras estruturas acima consegue-se emissão "sintonizável", através da composição da liga, na faixa 1,3nm - 1,5nm, que é a faixa ideal para comunicações ópticas. Circuitos integrados optoeletrônicos para comunicações ópticas baseados nas estruturas InP/InGaAsP estão sendo amplamente utilizados.

A produção de heteroestruturas semicondutoras por epitaxia levou a invenções de novos dispositivos eletrônicos baseados em transporte vertical, ou seja, transporte de carga perpendicular às películas. Tais dispositivos são essencialmente distintos dos convencionais. Existe, sobretudo, um enorme esforço atual em desenvolver osciladores baseados em tunelamento ressonante em barreiras duplas de GaAs/AlGaAs.

A obtenção de gás de elétrons ou buracos bidimensional de alta mobilidade em poços quânticos de estruturas semicondutoras levou à investigação e descoberta de fenômenos interessantes. O mais importante desses fenômenos é o efeito Hall quantizado (EHO). O EHO resulta do fato de que quando se aplica um campo magnético intenso perpendicularmente ao plano de um gás bidimensional de portadores, o espectro de energia desses portadores é totalmente discreto. Observa-se então que a variação da resistência Hall do sistema com campo magnético B passa por platôs em que seu valor é $R_H = h/je^2$, onde $j=1,2,3,\dots$, em flagrante contradição com a previsão clássica $R_H = B/nec$, onde n é a densidade eletrônica, ou seja, R_H cresce linearmente com B. O EHO é um fenômeno bem entendido teoricamente. Surpreendentemente, porém, verificou-se que em amostras de altíssima mobilidade e a temperaturas abaixo de 1 K, o número quântico j pode também assumir valores fracionários. Tal fenômeno é denominado efeito Hall quantizado fracionário (EHQF). A compreensão de EHQF é ainda um dos grandes desafios para a física teórica.

Com o uso de litografia por feixe eletrônico ou mesmo por artifícios de crescimento é possível a obtenção de fios quânticos (sistemas unidimensionais) ou pontos quânticos (sistemas zero dimensionais). Esses sistemas são atualmente alvo de intensa curiosidade, e pesquisa nessa área certamente levará a interessantes descobertas e provavelmente também a importantes aplicações. Essas e outras novidades e expectativas no campo das heteroestruturas levam a se prever que a atividade na área será crescente nos próximos anos. Por outro lado têm surgido novas técnicas de epitaxia por levitação em gás (VLE) que terão progresso, seja na gama de materiais utilizados para heteroestruturas, seja na qualidade ou custo dessas amostras. O mais importante, porém, é que a existência de um elenco maior de técnicas de epitaxia dará mais chance de sucesso a um projeto realmente grandioso na direção da integração tridimensional de circuitos. Nas técnicas de epitaxia controla-se o perfil das estruturas somente em uma direção, que é a de crescimento, e a estrutura é homogênea no plano normal a essa direção. Os circuitos

integrados são posteriormente confeccionados nesse plano por litografia e por processos complementares. O grande desafio é controlar o crescimento epitaxial também no plano da amostra. Por exemplo, um feixe fino de íons ou de elétrons seria utilizado, seja como parte da secção ou como agente catalizador. O crescimento ocorreria somente nos pontos de incidência do feixe. Desta maneira a litografia, que é um processo de corte, seria substituída pela estruturação da mesa do circuito no próprio processo de crescimento. Processos de implantação iônica "in situ", por exemplo, completariam a confecção do circuito planar. Uma camada isolante e homogênea, a menos de certos dutos condutores, seria então depositada sobre o circuito, em cima dela outro circuito, e assim por diante. Os dutos condutores conectariam os circuitos superpostos. Enfim, uma verdadeira engenharia em escala atômica. O resultado poderia ser um supercomputador em um único bloco cristalino!

Uma outra classe de semicondutores tem atraído bastante interesse, os semicondutores semimagnéticos, constituídos de uma liga de um semicondutor ordinário e um composto ou elemento magnético. Os compostos mais investigados são do tipo II-VI, por exemplo $Hg_{1-x}Mn_xTe$, $Hg_{1-x}Mn_xSe$, $Hg_{1-x}Mn_xS$ e as variações em que o Hg é substituído pelo Cd e/ou o Mn é substituído pelo Fe. Vários fenômenos interessantes são observados nesses materiais, tais como estados de vidro de spin, transição vidro de spin-antiferromagnética, transição semimetal-semicondutor magnético. Super-redes compostas pelo semicondutor ordinário e a liga semimagnética têm também sido produzidas e investigadas, por exemplo $CdTe/Cd_{1-x}Mn_xTe$. Fenômenos magnéticos especiais tais como fator giromagnético gigante, na faixa de até 10^2-10^3 , rotação de Faraday excepcionalmente alta, na faixa de até $10^4-10^5/cm.tesla$, etc..., têm sido observados. Os semicondutores semimagnéticos e as super-redes a eles relacionadas são uma área promissora tanto do ponto de vista da pesquisa básica em magnetismo e mecânica estatística quanto do ponto de vista de aplicações tecnológicas.

Na área de sólidos amorfos existem duas grandes categorias de semicondutores: os vidros calcogêneos e os de coordenação tetraédrica. Só estes últimos podem ser preparados como materiais eletrônicos no sentido de que a condutividade pode ser modulada por impurezas. Os calcogêneos são usados em outras aplicações, em particular o selênio é o material clássico de eletrofotografia. Dentre os semicondutores amorfos da segunda categoria, além do silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), muita atenção tem sido dada ao estudo de ligas tais como silício-carbono, silício-nitrogênio, silício-germânio, etc., que têm aplicações interessantes na micro e optoeletrônica.

Os semicondutores de gap muito estreito, na faixa 0,05-0,5eV, têm sido intensamente utilizados em aplicações optoeletrônicas tais como sensores de infra vermelho e lasers de baixa frequência, com comprimento de onda na faixa 2-20 μm . Exemplos de tais semicondutores são $Hg_{1-x}Cd_xTe$ e $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Tais dispositivos optoeletrônicos têm ampla aplicação em astronomia, espectroscopia de infravermelho, sensoriamento remoto, visão noturna e diagnóstico médico.

Finalizando, o interesse científico e tecnológico dos semicondutores têm causado nas últimas décadas uma verdadeira revolução na tecnologia e na própria sociedade. O progresso na informática, na automação de equipamentos e processos industriais, nas telecomunicações, em técnicas de diagnóstico

médico, especialmente tomografias, em equipamentos eletrodomésticos, em células fotovoltaicas, e em várias outras áreas, se assenta basicamente na ciência e tecnologia dos materiais semicondutores. O avanço dessa tecnologia se dá a uma velocidade espantosa. Numa pequena pastilha de Si ou GaAs já é possível incorporar a capacidade de processamento de um grande computador de duas décadas atrás. Um disco compacto digital com leitura por um laser de GaAs, já tão utilizado na gravação musical e cujo custo de produção é inferior a um dólar, tem capacidade de memória para se gravar a enciclopédia Britânica. O desempenho dos componentes e equipamentos cresce rapidamente enquanto seu custo cai a uma velocidade igual ou maior. Apesar da queda de preços, entretanto, o faturamento da indústria eletrônica, incluindo a informática, irá na próxima década superar a da indústria automobilística em vários países, inclusive provavelmente no Brasil. A revolução eletrônica-optoeletrônica-informática não é um processo em vias de exaustão. Ao contrário, tal revolução tem ímpeto e velocidade crescentes. Qualquer previsão do futuro baseada em informações atualmente disponíveis será por isso quase certamente suplantada pela velocidade. Certas projeções mais baseadas em conjecturas e intuições podem não se concretizar, mas no conjunto os fatos poderão suplantam expectativas supostamente otimistas. Muitas dessas expectativas estão ligadas a computadores que dispensam programação pelo usuário e às denominadas inteligências artificiais, ou seja, computadores que aprendem. É provável que boa parte da revolução futura em informática decorra mais de inovações no campo da lógica, com a possível substituição da lógica binária do que do aprimoramento de dispositivos. Sem dúvida, entretanto, o progresso dos dispositivos eletrônicos e principalmente optoeletrônicos terão um papel vital nesse processo e presume-se que os materiais semicondutores continuarão no centro da cena. A pesquisa em FS deverá portanto se intensificar na próxima década.

2.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

A primeira atividade em FS no País ocorreu no IFUSP em 1963, com trabalhos experimentais em efeitos magneto-oscilatórios. Entretanto, a pesquisa em FS naquele instituto só adquiriu dimensão significativa após 1978 e é desde então predominantemente teórica.

A FS adquiriu um bom impulso em 1970-1971, quando se criou na UNICAMP um grande grupo de pesquisa na área, constituído de brasileiros recém-chegados do Exterior e de estrangeiros. Apesar de a UNICAMP ter diminuído a ênfase original em FS e ser hoje mais diversificada, o maior grupo de pesquisadores trabalhando em FS no País ainda se encontra naquela universidade. A pesquisa básica em FS na UNICAMP se enfraqueceu nos últimos anos. Entretanto, ainda existe lá intensa atividade em crescimento de cristais, caracterização e desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos. Além do mais, a pesquisa em dispositivos na UNICAMP resultou, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da Telebrás, no projeto laser para comunicações ópticas.

Na presente década surgiram vários grupos de FS no País, em São Carlos (USP e Federal), INPE, PUC/RJ, UFF, UnB, COPPE, UFRN, UFRJ e UFMG. Grupos de Pesquisa estão também sendo criados na UFCE, UFPE, UFBA e FUA. Nos setores de engenharia e indústria houve grande expansão dos laboratórios LME-EPUSP e LSI-EPUSP e o surgimento de algumas indústrias com laboratórios de pesquisa em dispositivos, tais como a SID-Microeletrônica, a Elebra e a Itaucom. Deve-se ressaltar, entretanto, que a expansão da pesquisa básica em FS no País tem se baseado essencialmente em trabalhos teóricos. Tal fato se deve, em grande parte, à diminuição de recursos disponíveis para investimento e custeio em laboratórios nesta década. A pesquisa experimental em FS é relativamente dispendiosa, talvez a mais dispendiosa dentro da Física da Matéria Condensada. Além disso, essa área sofreu notáveis mudanças na presente década, o que resultou na obsolescência de grande parte da capacidade de pesquisa instalada.

Apesar da precariedade dos recursos, a comunidade que se dedica à FS tem crescido e esta é a maior área da Física no País em número de pesquisadores. Tal fato se deve talvez principalmente ao apelo exercido pelo notável progresso da área nos países desenvolvidos. A Escola Brasileira de Física de Semicondutores, que se realiza bienalmente desde 1983, tem também contribuído para atrair pesquisadores para a área.

B. Situação Atual e Perspectivas

A FS é no Brasil a maior área da matéria condensada em número de pesquisadores. O número de pessoas com doutorado que exercem alguma atividade em FS é da ordem de 160, dos quais aproximadamente 50% são experimentais. Na tentativa de reequipar os grupos já existentes e instalar novos grupos e linhas de pesquisa foi feito um Projeto Nacional de Semicondutores (PNFS), coordenado pela Comissão de Semicondutores da Sociedade Brasileira de Física.

As Tabelas 2.1 a 2.6 dão uma visão global das atividades já existentes e das que se pretende implantar pelo PNFS, diferenciando aquelas que já possuem os recursos assegurados. Nos parágrafos seguintes faremos uma descrição sucinta da situação atual e das perspectivas para os próximos cinco anos de cada instituição participante do PNFS.

Universidade do Amazonas

Trata-se de um grupo em formação que no momento conta com um doutor experimental especialista na área. Há um programa de formação de pessoal em FS em outras instituições do País; três pessoas concluirão o doutorado brevemente. O futuro do grupo depende criticamente de apoio financeiro, principalmente através do PNFS, e do sucesso do programa de formação de pessoal. As atividades existentes, de forma incipiente no momento, e planejadas, envolvem transporte elétrico, inclusive fotocondutividade, estudos de contatos elétricos e teoria de estados eletrônicos em heterojunções e super-redes.

Universidade Federal do Ceará (UFCE)

A pesquisa em FS na UFCE é ainda incipiente. Está sendo criado um grupo de pesquisa baseado fortemente na reorientação da atividade de pesquisadores de outras áreas e na adaptação de seus laboratórios. Por exemplo, físicos que atualmente usam técnicas de óptica e medidas dielétricas no estudo de transição de fases estruturais pretendem utilizar as mesmas técnicas, com alguma sofisticação adicional tal como lasers sintonizáveis, lasers de pulso ultra-rápido, para investigação de materiais semicondutores. Existem elementos jovens com formação teórica em estrutura eletrônica de semicondutores e termalização de elétrons quentes. O sucesso dos programas do grupo de FS dependerá do envolvimento efetivo dos pesquisadores que estão reorientando suas atividades, do apoio financeiro necessário para adaptação dos laboratórios já existentes, implantação de liquefator de He, equipamento para produção de filmes finos por sputtering, etc., e de intercâmbio com outros centros.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

O grupo conta atualmente com seis doutores com formação em FS, dos quais cinco são teóricos. Os teóricos têm apresentado uma boa produção científica na área de estrutura eletrônica, interfaces e superfícies. O grupo experimental pretende produzir compostos e heteroestruturas de classe II-VI por MOCVD, fazer caracterização por resistividade e efeito Hall, fotoluminescência e espectroscopia de fotoexcitação. Pretende também investigar portadores quentes por fotoluminescência com resolução temporal. O futuro desse grupo depende criticamente de obtenção urgente de apoio financeiro. O grupo tem formação adequada e conta com excelente apoio dos teóricos locais. Com suporte financeiro adequado certamente se concretizará um bom grupo integrado experimental-teórico de FS na UFRN.

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

O Departamento de Física (DF) da UFPE constitui um excelente centro de pesquisa em semicondutores magnéticos, mas a direção está voltada ao entendimento dos fenômenos magnéticos desses materiais e não suas propriedades semicondutoras. O projeto da UFPE está centrado principalmente no Si cristalino e em estruturas MOS de Si, ao passo que no resto do País a atenção está voltada quase que exclusivamente para semicondutores compostos das classes III-V e II-VI e para semicondutores amorfos, inclusive Si. O plano da UFPE é contratar jovens pesquisadores, ex-estudantes daquela universidade, atualmente em programas de doutorado e pós-doutorado no exterior, reorientar parcialmente a atividade de pesquisadores experientes do DF e de seus respectivos laboratórios de pesquisa e instalar novos laboratórios, principalmente para processos e testes de materiais e dispositivos. Há atualmente um pesquisador especialista em dispositivos MOS de Si. A necessidade de se dar mais atenção ao Si no País já foi registrada inclusive no documento da SIBF "A Física no Brasil" e portanto iniciativas nesta direção devem merecer apoio e estímulo especiais.

Universidade Federal da Bahia (UFBA)

O Departamento de Física da UFBA está implantando um grupo teórico na área de propriedades eletrônicas de sistemas desordenados e sistemas de baixa dimensionalidade. O grupo de cristalografia tem planos de se dedicar ao estudo de cristais semicondutores com a suplementação de equipamentos do laboratório de raio-X. O projeto experimental prevê ainda a utilização da espectroscopia fotoacústica em semicondutores.

Universidade de Brasília (UnB)

A UnB conta com três doutores teóricos cuja atividade principal está na área de estrutura eletrônica de ligas e semicondutores dopados e dois doutores teóricos com atividade parcial na área. Conta ainda com um doutor experimental dedicado integralmente à FS. Há ainda a intenção de se contratar alguns doutores experimentais para a área. O DF conta com algum equipamento eletrônico e óptico apropriado para a pesquisa em FS. A atividade teórica já vem de alguns anos, mas a atividade experimental está em seu início. O sucesso do programa experimental dependerá de alguns fatores, principalmente de apoio financeiro e da contratação de pessoal. O projeto experimental envolve produção epitaxial de compostos III-V, principalmente InP/InGaAs, por MOCVD e estudos ópticos (fotoluminescência, espectroscopia e fotoexcitação e espalhamento Raman) e elétricos (resistividade, efeito Hall e fotocondutividade) desses e outros compostos.

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

A pesquisa em FS na UFMG é recente. O programa de pesquisa na área foi concebido em 1982 mas como ele dependia crucialmente de formação de recursos humanos, todo o plano foi projetado numa perspectiva de longo prazo. Atualmente o grupo dispõe de seis doutores experimentais e três teóricos integralmente dedicados à área. Cinco doutores experimentais e um teórico estão se incorporando ao grupo em dedicação parcial. Dez estudantes estão em programas de doutorado experimental no exterior em áreas de interesse do grupo. Pretende-se absorver pelo menos metade desse contingente.

O grupo produz estruturas GaAs/AlGaAs pela técnica MBE e faz caracterização elétrica (resistividade e efeito Hall) das mesmas e mantém intercâmbio com outras instituições para uso de métodos complementares de caracterização. Estão sendo adquiridos equipamentos para laboratórios de óptica (Raman convencional e ressonante, fotoluminescência, fotoexcitação e absorção), de transporte elétrico sob campos magnéticos intensos (até 13 Tesla), análise de superfície (Auger, LEED, SIMS e XPS), detecção óptica de ressonância magnética (ODMR) e processos (fotolitografia, difusão, contatos).

As linhas de pesquisa do grupo para os próximos anos incluem crescimento de amostras e sua investigação pelas técnicas acima. O laboratório de processos, relativamente modesto, será utilizado para a confecção de circuitos para medidas elétricas. Dentro de quatro ou cinco anos haverá pesquisa em

dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos baseados em GaAs/AlGaAs. Estudantes estão sendo enviados ao exterior para treinamento na área de dispositivos.

O grupo conta com algumas dificuldades. A principal é a necessidade de importação de grande quantidade de equipamento. Apesar de dispor de mais de três milhões de dólares já aprovados na FINEP, a experiência brasileira mostra que nem sempre os recursos aprovados garantem efetivamente os investimentos previstos, principalmente em equipamentos importados. O grupo teórico tem se dedicado quase que exclusivamente ao estudo de defeitos em Si e sua interação com os temas de interesse dos experimentais é desejável. Há também, no momento, muita dificuldade em se conseguir abertura de concursos para a planejada expansão do grupo.

COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE)

O laboratório de Estudos de Materiais e Interfaces (LEMI) do COPPE contém um grupo que se dedica, desde 1982, ao estudo de células solares de filmes de a-Si:H. O grupo conta com três doutores e cinco mestres, todos experimentais, e dispõe de equipamento para produção de filmes por sputtering, glow discharge, para análise (microssondas, espectrômetros Auger e SIMS, microscópio eletrônico) e para processos (fotolitografia e metalização). As linhas de pesquisa do grupo são produção de filmes amorfos de Si, difusão de H, formação de silicetos metálicos, deposição de camadas passivadoras e isolantes e aplicações em dispositivos, incluindo transistores de a-Si:H. O programa da COPPE prevê um forte intercâmbio com a PUC/RJ, principalmente para a caracterização óptica e elétrica e por "Rutherford Backscattering Spectroscopy" (RBS).

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ)

A pesquisa em FS na PUC/RJ envolve três departamentos: Física (DF), Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) e Centro de Estudos em Telecomunicações (CETUC). Nos últimos cinco anos o DF tem realizado pesquisa em FS por técnicas ópticas, especialmente fotoluminescência. Por outro lado o DCMM tem utilizado uma microsonda eletrônica para análise de superfícies e para litografar por feixe de elétrons e o CETUC tem trabalhado em processos em filmes, parcialmente em colaboração com o CPqD-Telebrás. O DF conta com equipamentos para RBS. Nasceu de tal configuração um projeto interdepartamental de produção de GaAs, AlAs, InAs e suas ligas heteroestruturas por MOCVD, caracterização (óptica, elétrica, superfície) e confecção de circuitos de microondas e optoeletrônicos. O projeto já conta com uma concessão de quase um milhão e meio de dólares pela FINEP, para aquisição do reator MOCVD e suplementos. Mais recursos serão necessários para a aquisição de mais equipamentos do laboratório de caracterização. O DF conta com quatro doutores experimentais, um com dedicação integral à FS e três com dedicação parcial, um dos doutores coordena o projeto global da PUC/RJ. O DF conta também com dois doutores teóricos que trabalham na área, com os quais uma colaboração estreita está prevista.

Universidade Federal Fluminense (UFF)

A UFF conta com onze doutores teóricos trabalhando em FS, a maioria deles com dedicação integral na área. Conta também com quatro experimentais. As linhas de pesquisa do grupo são semicondutores desordenados, heteroestruturas, transporte, fenômenos magnéticos, superfícies e interfaces, propriedades ópticas e células fotovoltaicas. No caso de fenômenos magnéticos há pesquisa experimental e teórica e no caso de célula fotovoltaica a pesquisa é experimental. Nos temas restantes o enfoque é teórico. O grupo de FS da UFF é inquestionavelmente produtivo e qualificado. Há, entretanto, um enorme desbalanceamento para o lado teórico. Há planos de investimento em infraestrutura experimental (liquefação de He, laboratórios). Acredita-se que para maior sucesso do grupo deveria haver planos de contratação de pesquisadores experimentais.

Universidade de São Paulo (USP-SP)

O Instituto de Física da USP (IFUSP) conta com um grupo teórico de FS composto de onze doutores. A linha principal de pesquisa do grupo é defeitos pontuais isolados em cristais semicondutores, mas os trabalhos incluem também estrutura de bandas, termodinâmica de ligas e super-redes, gás de poços quânticos, reconstrução de superfícies livres e outros temas. O grupo tem sido muito produtivo. No IFUSP trabalham também quatro experimentais em FS, utilizando raios-X, EPR e espectroscopia óptica como técnicas de análise.

Na perspectiva futura o projeto de se criar um grupo de produção por MBE e caracterização de estruturas GaAs/AlGaAs. O projeto envolve o laboratório de sub-sistemas integráveis (LSI) da EPUSP, e a principal destinação das amostras será o desenvolvimento de transistores de elétrons de alta mobilidade (HEMT-FET) e de circuitos integrados no LSI.

O projeto MBE do IFUSP envolverá aplicação de cerca de quatro milhões de dólares, dos quais três milhões provenientes da FINEP e o restante do BID. Os recursos já foram concedidos. O projeto tem méritos inquestionáveis. O IFUSP representa um papel importante na Física Brasileira e o reforço da física experimental de semicondutores naquele instituto através de um projeto de impacto terá reflexos positivos. Por outro lado o LSI é o grupo brasileiro em melhores condições para desenvolver dispositivos microeletrônicos baseados em GaAs. A dificuldade atual é a necessidade de maior envolvimento de físicos experimentais para o cumprimento das metas, já que as pessoas eventualmente disponíveis estão altamente disputadas pelo mercado. O prestígio da USP poderá lhe dar significativa vantagem nesta disputa.

Universidade de São Paulo - São Carlos (USP-SC)

O DFCM da USP-SC dispõe de um grupo teórico em FS, pequeno e muito ativo. O grupo foi pioneiro, no País, no estudo teórico de gases de elétrons bidimensionais, tanto em semicondutores quanto na superfície de hélio. Atualmente três doutores se dedicam à FS naquele grupo. Tem havido também

naquele departamento, nos últimos seis anos, pesquisa em crescimento de cristais volumétricos de Si. O grupo do Si é composto por dois doutores. Em 1985 iniciou-se um esforço na direção de se produzir sistemas GaAs por MBE no DF. Já existe em operação ali uma câmara de crescimento por MBE de pequeno porte. Três doutores experimentais estão envolvidos no crescimento. Há um projeto de ampliação das instalações ligadas ao MBE, incluindo uma câmara de análise equipada com SIMS e de implantação de outros laboratórios de caracterização óptica e elétrica (inclusive sob o efeito de campos magnéticos intensos). Será também instalado um laboratório de processos para confecção de circuitos de prova elétrica. Os investimentos previstos são cerca de um milhão de dólares, metade dos quais já concedidos pela FINEP.

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

O DF-UFSCar possui um grupo teórico dedicado à investigação de estados eletrônicos, transporte e magneto-transporte (planar e vertical), excitações coletivas e fenômenos magnéticos em heterojunções e super-redes semicondutoras. Três doutores dão dedicação integral ao programa e um outro dá dedicação parcial. Há colaboração com o grupo teórico da USP-SC e os dois grupos formam o mais importante polo de teoria em heterojunções e super-redes do País. Existe também na UFSCar um grupo experimental dedicado ao estudo de contatos elétricos em compostos III-V utilizados na fabricação de laser. O grupo conta com seis doutores, pelo menos dois em dedicação integral. Tal grupo é bem recente e ainda está precariamente equipado, boa parte de seus trabalhos sendo por isso realizada em colaboração com outros laboratórios. O grupo planeja melhorar seus laboratórios de processos e caracterização visando mais desempenho e autonomia no estudo de contatos. Planeja também iniciar trabalhos de preparação, por sputtering, de filmes de óxido de silício e nitrato de silício e estudo de suas propriedades elétricas.

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

O grupo de FS do Instituto de Física da UNICAMP é de longe o maior e mais equipado do País. A UNICAMP teve um papel hegemônico na história da FS do Brasil. Com o aparecimento de outros grupos e um decréscimo da ênfase em FS na própria UNICAMP, a importância relativa daquela instituição da FS do País decresceu nitidamente, apesar de ainda ser muito grande. O pessoal docente com doutorado da UNICAMP dedicado à FS se classifica em seis grupos:

Grupo de Propriedades Ópticas (4 experimentais)

Grupo de Espectroscopia (2 experimentais)

Grupo Teórico de Estrutura Eletrônica e Física de Semicondutores (3 teóricos)

Grupo de Pesquisa em Dispositivos (9 experimentais)

Grupo de Conversão Fotovoltáica (4 experimentais)

Grupo Teórico de Processos Dinâmicos em Semicondutores (4 teóricos)

Há ainda o Grupo de Cristalografia (2 experimentais) cujas atividades estão descritas na respectiva sub-área deste trabalho.

A UNICAMP tem um projeto visando reaparelhamento dos laboratórios no grupo de pesquisa em dispositivos. Pretende-se instalar neste grupo um sistema de epitaxia por feixe químico (CBE) para produção de InP, InGaAs, InGaAsP, GaSb e AlAs e heteroestruturas desses compostos para pesquisa básica e produção de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos bem como ampliar o sistema atualmente existente de MOCVD. Os novos laboratórios do grupo de pesquisa em dispositivos incluem sistema de implantação de íons, SIMS, microscopia eletrônica de varredura de transmissão e evaporadora de metais de alto vácuo. Os equipamentos e a instalação de área limpa com infraestrutura para acomodar o CBE e o SIMS custarão US\$ 4.500.000,00 (quatro e meio milhões de dólares), sem contar o custo das obras civis. Cerca de US\$ 3.000.000,00 (três milhões de dólares já foram concedidos pela FINEP e serão destinados à aquisição e instalação do CBE e do SIMS. O custo total de reequipamento dos outros grupos é de cerca de um milhão e meio de dólares.

Os investimentos planejados pela UNICAMP são perfeitamente razoáveis para o porte do grupo de FS e é muito provável que os recursos sejam obtidos. No caso específico do grupo de propriedades ópticas, os investimentos planejados, menos de meio milhão de dólares, são verdadeiramente modestos. O projeto da UNICAMP levará a uma recuperação da competitividade em pesquisa básica e à sua consolidação como importante polo de produção de materiais semicondutores e sua utilização em dispositivos optoeletrônicos.

CPqD - Telebrás (CPqD)

A coordenadoria da área de dispositivos optoeletrônicos (CADO) do CPqD faz pesquisa e desenvolvimento de dispositivos optoeletrônicos visando telecomunicações ópticas. A CADO com 26 pesquisadores, sendo 9 doutores e 18 mestres.

Seus projetos atuais são: Lasers e LEDs de GaAs/AlGaAs e de InP/InGaAsP. No futuro próximo a CADO planeja fazer Pesquisa e Desenvolvimento em optoeletrônica integrada, circuitos integrados de GaAs. Planeja também expandir sua infraestrutura para epitaxia MOCVD e análise de materiais, incorporando um espectrômetro Auger a seus equipamentos. Cerca de US\$ 2.500.000,00 (dois e meio milhões de dólares) serão investidos em laboratórios de epitaxia, análise de superfície (Auger), implantador de íons e processos.

O CPqD é uma entidade ímpar na FS no País. Seu objetivo é pesquisa e desenvolvimento em área muito bem definida e sua atuação constitui importante interface entre universidade e indústria. O CPqD contribui também de modo expressivo para a formação de recursos humanos, abrindo seus laboratórios e instalações para estudantes em programas de tese.

Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE)

O Laboratório Associado de Sensores e Materiais é a unidade do INPE que exerce atividade de pesquisa em materiais semicondutores e desenvolvimento de dispositivos. O grupo teve sua origem em 1978, com trabalhos teóricos e a partir de 1980 se diversificou com atividade teórica, experimental e de desenvolvimento de dispositivos. O laboratório conta atualmente com 5 doutores, dos quais um é teórico.

A linha de pesquisa teórica do INPE inclui a difusão de átomos em superfícies, transporte de gás de elétrons sob campo magnético intenso, transporte em sistemas MOS, estados de impurezas em poços quânticos e espessura crítica de camadas epitaxiais tensionadas. Na área de produção de materiais há pesquisa na produção de cristais volumétricos de $Pb_{1-x}Sn_xTe$, assim como filmes destes materiais por epitaxia (LPE e HWE). Planeja-se iniciar pesquisa na produção de outros compostos IV-VI ($Pb_{1-x}Cd_xTe$, $Pb_{1-x}Se_xTe$, $Pb_{1-x}Mn_xTe$, etc), assim como compostos II-VI ($Hg_{1-x}Cd_xTe$) e III-V (InSb). Na área de dispositivos há pesquisa em células fotovoltaicas de qualificação espacial baseados em Si (planeja-se também utilizar GaAs), detectores de infravermelho baseados em $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (no futuro serão usados outros materiais produzidos no INPE) e microsensores mecânicos e térmicos baseados em Si.

O INPE é a instituição no País que se dedica à produção de semicondutores de gap estreito e desenvolvimento de dispositivos baseados nesses materiais. No caso de detectores de infravermelho baseados em $Pb_{1-x}Sn_xTe$ já há domínio completo do ciclo, da produção dos cristais à comercialização do dispositivo.

C. Projeto Nacional de Física de Semicondutores

O PNFS é um projeto envolvendo 17 instituições. O projeto visa reequipar os laboratórios existentes, criar linhas de pesquisa e apoiar grupos emergentes na área de FS. O custo do PNFS é de cerca de 30 milhões de dólares em material importado.

O PNFS surgiu a partir de ampla discussão de pesquisadores da área durante o X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada realizado em maio de 1987 em Caxambú. O PNFS é uma iniciativa no sentido de dar maior desenvolvimento à área no País. O número de pesquisadores dedicados à FS no Brasil tem aumentado significativamente nos anos recentes como reflexo do renovado interesse que os semicondutores têm despertado no cenário internacional. Por outro lado, a FS se enquadra de modo privilegiado na política de desenvolvimento científico e tecnológico da Secretaria Especial de Ciência e Tecnologia, uma vez que esta Secretaria destacou as áreas de novos materiais e informática, além de outras, num programa especial de apoio.

A pesquisa experimental em FS é relativamente dispendiosa. A produção e investigação dos materiais semicondutores exigem um variado acervo de equipamentos de médio porte, ou seja, na faixa de custo de

US\$ 300.000,00 - 2.000.000,00, instalações especiais, inclusive área limpa, e materiais de consumo de grande pureza. Ficou então evidente a necessidade de um projeto especial visando o reaparelhamento dos laboratórios já existentes e a implantação do novos laboratórios para acomodar de modo produtivo a crescente comunidade de FS no País.

Julgamos que as intenções de se iniciar pesquisa em novos materiais semicondutores esbarrarão, além da barreira de recursos financeiros, na escassez de pessoal especializado. É urgente iniciar-se um programa de formação de pessoal especializado na produção de novos materiais semicondutores, na sua caracterização e no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e optoeletrônicos baseados em tais materiais. Tal programa deveria incluir o envio de grande número de pessoas para doutoramento e pós-doutoramento no Exterior.

Foi criada, dentro da SBF, a Comissão Nacional de Semicondutores (CNS) com o fim de promover a área e encaminhar a formulação do PNFS. O Projeto envolve dezessete instituições e cerca de 150 doutores. A CNS terá as funções de negociar perante os órgãos governamentais a alocação de verba especial para o PNFS e fará o acompanhamento da execução do Projeto.

O PNFS poderá dar enorme impulso à FS no País. O número de pesquisadores na área poderá duplicar em cinco anos como resultado da melhoria dos laboratórios e portanto da capacidade de formação de recursos humanos. O aumento dos pesquisadores ocorrerá principalmente na área experimental, o que é altamente desejável em área de tamanha interface com a tecnologia de ponta. Os pesquisadores teóricos serão sem dúvida beneficiados pelo desenvolvimento da área experimental, já que a disponibilidade de fatos experimentais inéditos é um dos principais requisitos para a existência de pesquisa teórica de alto nível e originalidade.

TABELA 2.1
TÉCNICAS DE CRESCIMENTO E PREPARAÇÃO

MATERIAL INSTITUIÇÃO	II-V	II-VI	IV-VI	SI	Amerfos
FUA	0	0		0	0
UFC		0.X		0	
UFRN		0			0
UFPE				0	0
UFBA					
UNB	0				
UFMG	X			0	
COPPE-UFRJ				0.X	0.X
PUC-RJ	*				
UFF		0		X	
USP-SP	*				
USP-SC	X			X	X
UFSCAR					
UNICAMP	*.X				0.X
CPqD-Telebras	*.X			-	
INPE	0.X		0.X	0	
UFRS					

X - Já existentes
* - A ser implantado
0 - Condições ideais

TABELA 2.2
TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Técnica Instituição	Propriedades ópticas	Propriedades de Transporte	Superfícies	Micro Análise	Propriedades Estruturais	Propriedades Microscópicas	Medidas Locais
FUA	O,X	O		O	O		
UFC	O,*	X	O	O	O	O,*	*
UFRN	O	O			O		
UFPE	X,*	X	O	O		O	O,*
UFBA							
UNB	O	O					
UFMG	*	*	*	O	O		*
COPPE-UFRJ	O	X	O,X	O,X	X		O,X
PUC-RJ	X	X	X	X	X		
UFF	*			X			
USP-SP	O	X	O	O	O,X		
USP-SC	X,X	*	X	O	O,X		X
UFSCAR		X					X
UNICAMP	O,X	O,X	X,X	O,X	O,X	X	
CPQD-Telebras	X	X	*	X	X		
INPE	X	X			X		
UFERS	O	O	X	O,X	X	O	

X - Já existentes
* - A ser implantado -
O - Condições ideais

TABELA 2.3
PROCESSOS

Técnica Instituição	Fotolitografia	Difusão	Implantação iônica	Retal/ Semic	Dielétrico Semic	Corrosão	Recozimento
FUA		O		O			
UFC				X			
UFRN		O		O			
UFPE	O	O		O		O	
UFBA							
UNB	O	O		O			
UFEG	O	O		O			
COPPE-RJ	X			X	X		O,X
PUC-RJ	X	X					X
UFF							O,X
USP-SP							
USP-SC	O	O,X		O	O	O	X
UFSCAR	X			X	O		X
UNICAMP	X	X	O	X	O	X	X
CPqD-Telebrás	O,X	X	X	X	X	X,X	X
INPE	X	O		X	O	X	X
UFRS	X	X	X	X	X	X	X

X - Já existentes
A - A ser implantado
O - Condições ideais

TABELA 2.4
DISPOSITIVOS

TIPO INSTITUIÇÃO	Ópto- Eletrônico	Foto- Voltaicos	Transistor & Diodo	Ultra- Rápido	Gauges e Sensores	Passivos
FUA					X	
UFC						
UFRN						
UFPE			0			0
UFBA						
UNB						
UFMG	0					
COPPE-RJ		X	0		0,X	
PUC-RJ	X		X			X
UFF		*				
USP	0		0			
USP-SC	*	*	*	*	0	0
UFSCAR						
UNICAMP	X	X	0	0		
CPQD-Telebrás	0,X			*		
INPE	X	X	0		0	
UFERS			0	0		

X - Já existentes
* - A ser implantado
0 - Condições ideais

TABELA 2.5
TEORIA

AREA INSTITUICAO	Defeitos	Hetero- estruturas	Desordenadas	Sistemas Resonãncios	Propr. Ópticas	Propr. Magnéticas	Superfície	Trans- porte	Ext. Elem.
FUA			0		X	X	0	0	0
UFC	0						X	X	X
UFRN	X	X	X		X	X	X		
UFPE	0			0	X	X		0	X
UFBA		X	X						
UNB		0			0			X	
UFMG	X	X							
CCPPE-RJ									
Puc-RJ	X	X	X		X				
UFF	X	*	X		X	X	X	*	X
USP-SP	X	X	X						X
USP-SC	X	X	0		X	X	0	0	X
UFSCAR		X			X			X	X
UNICAMP	X	X			X	X		X	
CPqD-Telebras									
INPE	X	X			X	X		X	X
UFRS									

X - Já existentes
* - A ser implantado
0 - Condições ideais

TABELA 2.6
 QUADRO GERAL DAS ATIVIDADES

ÁREA INSTITUICAO	Crescimento e Preparação	Caracterização	Dispositivos	Processos	Teoria
FUA	O	O	X	O	X
UFC	O,X	O,X		O	O,X
UFRN	O	O,X		O	X
UFPE	O	O,X	O	O	O
UHB	O	O		O	X
UFMG	X	O,X	O	O	X
COPPE-RJ	O,X	O,X	O,X	O,X	
PUC-RJ	O	X	O,X	X	X
UFF	O,X	X,X	X	O,X	X
USP-SP	X	X			X
USP-SC	X,X	X,X	X	X	X
UFSCAR	X	X		X	X
UNICAMP	X,X	X,X	O,X	O,X	X
CPqD-Telebrás	X,X	X,X	X,X		
INPE	X	X	X	X	
UFRS		X	X	X	

X - Já existentes
 X - A ser implantado
 O - Condições ideais

TABELA 2.7
GRUPOS DE PESQUISA EM SEMICONDUTORES

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO (US\$)
NORTE-NORDESTE				
FUA	Fenômenos de transporte (E) Propriedades eletrônicas de heteroestruturas (T)	C I	Fotocondutividade -	50.000 -
UFC	Caracterização de Filas Finais (E) Propriedades eletrônicas (T)	J C	Fotodetroquímica -	50.000 -
UFRN	Propriedades físicas de hetero-estruturas e superfícies (T) Propriedades Elétricas de Materiais (E)	C I	- Resistividade; Efeito Hall, DLTS; Capacitância	- 200.000
UFPE	Semicondutores magnéticos Propriedades ópticas não-lineares Física de Dispositivos MOS	C C	Resonância magnética Espectroscopia óptica não-linear Capacitância, Resistividade	- 150.000
UFBA	Propriedades eletrônicas de heteroestruturas e sistemas desordenados (TI)	C	-	-
CENTRO-OESTE				
UNB	Propriedades eletrônicas e termodinâmicas de ligas (T)	C	-	-

TABELA 2.7
GRUPOS DE PESQUISA EM SEMICONDUTORES

Continuação

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO (US\$)
SUDESTE				
UFRO	Crescimento e caracterização de heteroestruturas III-V (E)	C	MBE	500.000
	Estrutura eletrônica de defeitos (T)	C	-	-
	Propriedades ópticas e de transporte (E)	I	Fotoluminescência, Fotoexcitação, efeito Hall	300.000
	Análise de superfície	I	SIRS, LEED, XPS	1.000.000
COPPE/UFRRJ	Produção de filmes amorfos de Si e interface metal-Si (E)	C/I	Sputtering e descarga luminescente	
	Propriedades ópticas, elétricas e estruturais de semicondutores amorfos (E)	C/I	Auger, SIRS, microsonda e microscopia eletrônica, condutividade	S/D
	Produção de células solares e a-Si:-FET (E)	C/I	Processos básicos	
PUC/RJ	Propriedades ópticas (E)	C	Fotoluminescência	200.000
	Análise de superfície (E)	C	RBS e microsonda	700.000
	Crescimento epitaxial de heteroestruturas III-V (E)	I	RCVD	400.000
UFF	Propriedades eletrônicas e magnéticas de semicondutores cristalinos e amorfos (T)	C	-	S/D
USP-SP	Células fotovoltaicas (E)	I	Eletroquímica	
	Estrutura eletrônica de defeitos heteroestruturas, ligas e superfícies (T)	C	-	
	Caracterização de amorfos semicondutores (E)	C	Raios-X	200.000
	Crescimento epitaxial de heteroestruturas III-V (E)	I	MBE	1.500.000
	Caracterização óptica e elétrica (E)	I	Fotoluminescência, DLTS, efeito Hall	500.000

TABELA 2.7
GRUPOS DE PESQUISA EM SEMICONDUTORES

Continuação

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTÁGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO (US\$)
USP-SC	Crescimento epitaxial de heteroestruturas III-V (VI)	C	MBE, SIMS, RHEED	500.000
	Caracterização óptica e elétrica (E)	I	Fotoluminescência, fotocondutividade	200.000
	Propriedades eletrônicas de heteroestruturas (T)	C	-	-
	Contatos em semicondutores compostos III-V (E)	C	Processos e transporte elétrico, CV, Hall	200.000
	Propriedades eletrônicas de heteroestruturas (T)	-	-	-
UNICAMP	Crescimento e caracterização de silício amorfo (E)	I	Luminescência, fotocondutividade	200.000
	Crescimento epitaxial de heteroestruturas II-V (E)	C/I	MOCVD, CBE, SIMS	
UNICAMP	Dispositivos opto-eletrônicos (E)	C	Processos	
	Propriedades ópticas e elétricas	C	Fotoluminescência, DLTS	
	Defeitos (E)	C	PITTS, DLTS	1.000.000
	Semicondutores amorfos (E)	C	Sputtering, descarga luminescente	
	Propriedades magneto-ópticas		Hall quântico, Shubnikov, de Haas oscillations, espectroscopia modulada, Efeito Raman, fotocondutividade	
CPqD-Telebrás	Estrutura eletrônica e processos dinâmicos em semicondutores (T)	C		
	Fabricação de lasers, Leds e foto-detectores (E)	C	Processos e caracterização	S/D
INPE	Crescimento epitaxial de heteroestruturas III-V (E)	C	MOCVD e LPE	
	Circuitos integrados de GaAs (E)	I	Processos (implantação iônica)	
	Produção de compostos II-VI (E)	C	VLS, LPE e MBE	
UFSCAR	Células solares e detectores infravermelho (E)	C	Processos e caracterização	
	Propriedades eletrônicas de heteroestruturas (T)	C	-	
UFSCAR	Contatos em semicondutores			
	Propriedades eletrônicas de semicondutores compostos	I		

TABELA 2.8
PESSOAL CIENTÍFICO e PRODUTIVIDADE

INSTITUICAO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	B	D	X	D	78-82	83-87
NORTE-NORDESTE											
FUA	-	2	2	4	1	-	-	-	-	3	9
UFC	-	4	-	3	10	8	2	10	-	10	13
Prop. ópticas	-	2	-	1	2	1	-	1	-	9	6
Prop. eletrônicas e de transporte	3	-	1	-	4	4	-	2	-	9	14
UFRH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Técnico	3	-	1	-	2	1	-	3	-	20	34
Experimental	-	2	-	2	7	-	-	-	-	5	5
UFPE	1	3	-	-	4	-	1	-	1	3	13
UFBA	6	2	-	1	2	1	-	2	1	25	45
CENTRO-OESTE											
UNB	3	1	-	-	4	4	-	1	-	-	-
SUDESTE											
UFMG	-	3	-	-	1	4	2	4	-	2	8
Crescimento Defeitos	3	-	-	-	2	2	-	5	3	25	21
Prop. ópticas e eletrônicas	-	6	-	-	1	2	3	12	4	34	29
COPPE-UFRJ	-	3	-	5	-	2	-	2	-	5	5

TABELA 2.8
PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE

Continuação

INSTITUIÇÃO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ANTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	R	D	R	D	78-82	83-87
PUC-RJ											
DF	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UFF	5	1	4	-	2	-	4	4	-	23	32
USP-SP											
Tedrico	11	-	-	-	4	9	7	30	14	59	145
Experimental	-	4	-	-	4	4	-	2	2	1	10
USP-SC	3	3	-	-	-	-	-	-	4	-	-
UFSCAR											
Tedrico	3	-	-	-	2	3	3	3	1	18	20
Experimental	-	6	-	-	4	1	-	1	-	12	22
UNICAMP											
Prop. ópticas (E)	-	4	-	-	10	2	6	9	4	50	75
Espectroscopia (E)	-	2	-	-	-	1	1	6	5	24	24
Processos Dinâmicas (T)	4	-	-	-	-	1	2	6	6	14	29
Estrutura Eletrônica (T)	3	-	-	-	-	-	5	4	3	40	38
Crescimento e Dispositivos	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aerofos (E)	-	4	-	-	2	2	1	5	1	-	120
CPqD-Telebras	-	9	-	18	-	-	-	-	-	-	-
INPE											
Tedrico	3	-	2	-	-	-	-	4	-	15	50
Células Solares	-	-	1	4	-	-	-	-	-	5	10
Sensores	1	4	-	8	-	-	-	6	-	-	40

TABELA 2.9
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM SEMICONDUTORES

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS (US\$)
Norte-Nordeste			
FUA	<u>Condições Atuais</u> Consolidação das atuais linhas.	<u>Condições Atuais</u> Fotocondutividade e Efeito Hall	100.000
	<u>Condições Ideais</u> Caracterização.	<u>Condições Ideais</u> Fotoluminescência, fotocapacitância	700.000
UFC	<u>Condições Atuais</u> Caracterização por medidas ópticas e dielétricas. <u>Condições Ideais</u> Propriedades ópticas não lineares	<u>Condições Atuais</u> Fotoluminescência, eletroreflectância, piezoreflectância, Raman ressonante, <u>Condições Ideais</u> Espectroscopia óptica não-linear.	1.100.000
UFRN	<u>Condições Atuais</u> Crescimento epitaxial	<u>Condições Atuais</u> MOCVD	300.000
	<u>Condições Ideais</u> Caracterização	<u>Condições Ideais</u> Luminescência, DLTS, Medidas Temporais.	500.000
UFPE	Fiação de dispositivos em escala submicron Estruturas de Si-Ge e III-V Estruturas semi-supercondutor	Elipsometria e espectroscopia óptica	200.000
		Processos de fabricação de máscaras e pastilhas Raios-X, DLTS	1.000.000 550.000
UFBA	Caracterização	Fotoacústica, Raios-X	240.000
CENTRO-OESTE			
UNB	Propriedades ópticas	Raman, Fotoexcitação	250.000

TABELA 2.9
 PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 3 ANOS: TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM SEMICONDUTORES

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS (US\$)
SUDESTE			
UFPR	Consolidação das atuais linhas em implantação (ver Tab. 2.7)		3.000.000
COPPE-RJ			
PUC-RJ			
UFF	Retroestrutura Semic. (T) Semic.-Semimagnéticos (T) Caracterização de Semic. (E)	Espectroscopia óptica	
USP-SP			
USP-SC			
USP-SC	Consolidação das atuais linhas em implantação (ver Tab. 2.7)	Técnicas ópticas e elétricas	1.000.000
UFSCAR	Interfaces e filmes finos	Ream., sputtering	443.000
UNICAMP			
UNICAMP	Consolidação das atuais linhas	<u>Condições Atuais</u> Ream. ressonante, magneto- óptica. <u>Condições Ideais</u>	700.000 3.000.000
CPQD-TELEBRAS			
INPE	Revolitografia	Microscopia eletrônica de transmissão	500.000

TABELA 2.10
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM SEMICONDUTORES

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	R	D	R	D	R	D	R	D
<u>NORTE-NORDESTE</u>								
FUA	-	-	5	-	-	1	2	3
UPC								
Prop. ópticas	8	2	10	3	2	2	3	4
Filmes Finos	3	1	5	2	1	2	2	4
Prop. eletrônicas e de transporte	4	2	6	4	-	3	-	4
UFRN								
Teórico	6	-	12	-	-	1	-	2
Experimental	3	-	6	-	-	3	-	5
UFPE	2	-	5	2	-	1	-	4
UFBA	5	-	7	3	-	3	-	5
<u>CENTRO-OESTE</u>								
UNB	5	-	15	3	-	3	-	5
<u>SUDESTE</u>								
UFMG								
Crescimento								
Defeitos								
Prop. ópticas								
<u>COPPE-UFRJ</u>								
<u>PUC-RJ</u>								

TABELA 2.10
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM SEMICONDUTORES

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	N	D	N	D	N	D	N	D
UFF	4	6	6	8	-	2	-	4
USP-SP								
Técnico	20	10	20	15	-	-	-	1
Experimental	5	2	10	5	-	4	-	6
USP-SC	3	3	4	5	3	3	4	5
UFSCAR								
Técnico	5	5	10	8	-	1	-	3
Experimental	2	-	3	1	2	1	3	2
UNICAMP								
Prop. Ópticas	8	8	16	12	-	3	-	6
Espectroscopia	2	1	4	3	-	-	-	2
Proc. Dinâmicos (T)	2	3	2	3	-	-	-	1
Estrut. Eletrônica (T)	-	5						
Cresc. e Dispositivos Ahorfo								
CPqD								
Telebrás								
INPE								

3. Magnetismo e Materiais Magnéticos

3.1 Descrição

O magnetismo é um dos campos de pesquisa mais férteis e mais ativos da Física da Matéria Condensada, que atrai atualmente grande atenção de físicos teóricos e experimentais. Ele tem também uma enorme variedade de aplicações em tecnologia que ganham importância com a descoberta de novos materiais magnéticos.

Os principais objetivos da pesquisa neste campo são a compreensão das origens microscópicas das propriedades magnéticas dos materiais, a descoberta de novos materiais e fenômenos, o estudo das propriedades termodinâmicas e das excitações dinâmicas dos sistemas magnéticos, bem como o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas.

Na pesquisa básica um dos tópicos fundamentais é a origem do magnetismo em isolantes e metais. Isto envolve dois aspectos, a origem dos momentos magnéticos microscópicos e a natureza das interações entre eles. Os momentos tem origem na estrutura eletrônica dos átomos ou íons que formam o material e tem, portanto, características bem distintas nos isolantes (ou semicondutores) e nos metais. Exemplos clássicos de materiais magnéticos isolantes são os óxidos, sulfetos, clorretos ou fluoretos de elementos do grupo de transição 3d (Fe, Ni, Co, Mn por exemplo) ou de terras raras 4f (Nd, Sm, Eu, Gd entre outros). Nesses materiais os momentos magnéticos são localizados nos íons metálicos. Em contraposição, em metais como Fe ou Ni puros, assim como em alguns compostos intermetálicos de transição, os momentos não são localizados, são itinerantes. Os fundamentos do magnetismo em isolantes foram compreendidos antes da década de 70. Por outro lado, várias questões fundamentais do magnetismo itinerante ainda hoje não tem resposta satisfatória.

Considerações de estrutura eletrônica estabelecem também o mecanismo da interação entre os momentos magnéticos. Quando a interação é forte suficiente para se sobrepor à agitação térmica, os momentos tendem a ficar alinhados coletivamente resultando numa magnetização. É esta magnetização que determina a resposta macroscópica do material a campos externos. Por outro lado, se a temperatura é aumentada a desordem térmica aumenta e a magnetização diminui, tendendo bruscamente a zero numa temperatura de transição T_C . A Figura 3.1 mostra o comportamento típico da magnetização M em função da temperatura T num material magnético. A medida e a interpretação teórica detalhadas deste comportamento em materiais constituem um tópico atual de pesquisa em magnetismo. Quando a temperatura ultrapassa o valor crítico T_C o sistema passa da fase ordenada (momentos alinhados) para a fase paramagnética, sofrendo uma transição de fase.

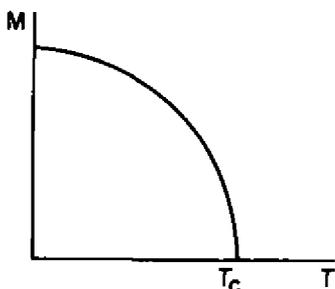


FIGURA 3.1- VARIACÃO TÍPICA DA MAGNETIZAÇÃO COM A TEMPERATURA.

Os fenômenos críticos que ocorrem nas proximidades das transições de fase são de grande interesse da Mecânica Estatística. Como os sistemas magnéticos podem ser representados por uma variedade de modelos matemáticos relativamente simples, o Magnetismo é o campo da Física de maior aplicação da Mecânica Estatística. Foi principalmente neste campo que poderosas ferramentas desenvolvidas nas últimas décadas foram postas a prova. Este é o caso das expansões em alta temperatura, da teoria de grupos de renormalização (que deu o Prêmio Nobel a K.Wilson em 1982) e dos métodos de simulação por computador.

Até a década de 70 a pesquisa em magnetismo era voltada para materiais com interações entre momentos em três dimensões ($d=3$) e com ordenamentos simples, ferro-, ferri- ou antiferromagnético. A década de 70 presenciou uma enorme evolução na síntese de materiais magnéticos. Foram descobertos materiais com interações predominantemente em planos ($d=2$) ou em cadeias lineares ($d=1$) e com ordenamentos mais complexos, como os sistemas modulados. Foram também produzidos materiais com desordem espacial dos momentos, como as ligas, os sistemas densos diluídos e os vidros de spin que estimularam o desenvolvimento de novas técnicas de Mecânica Estatística. Foi graças a contribuições fundamentais à Física dadas neste campo que Louis Néel em 1970 e J.H.van Vleck e P.W. Anderson em 1977 receberam o Prêmio Nobel. Os sistemas de baixa dimensão ($d=1,2$) e os sistemas desordenados constituem áreas de grande atividade atualmente.

As propriedades de materiais e os fenômenos magnéticos são investigados experimentalmente com uma grande variedade de técnicas. As propriedades termodinâmicas são medidas, por exemplo, através da magnetização, susceptibilidade de e ac, calor específico, resistividade, dilatação térmica, espalhamento elástico de nêutrons, ressonância magnética, efeito Mössbauer, etc. Por outro lado, com técnicas de rádio-frequência e microondas, espalhamento Raman e Brillouin de luz, absorção e luminescência óptica e infravermelha, rotação de spin de muons, entre outras, é possível estudar as excitações magnéticas elementares e os fenômenos dinâmicos. Por esta razão, o magnetismo é também uma excelente área para a formação de pesquisadores em técnicas experimentais para atuarem em diversos campos da ciência e da tecnologia.

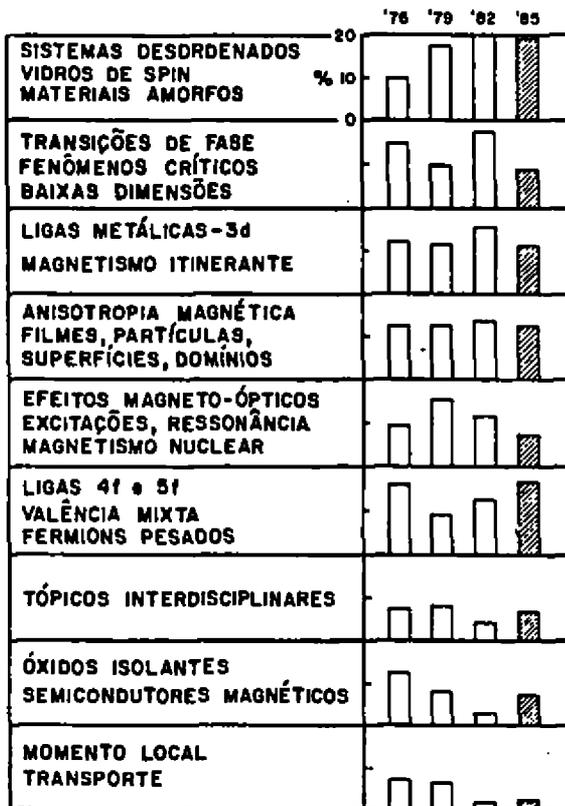


FIG. 3.2 - Distribuição dos artigos publicados nos Anais das ICM/76, ICM/79, ICM/82 e ICM/85.

A intensa atividade de pesquisa básica em magnetismo é refletida nas conferências internacionais periódicas que atraem cada uma cerca de 1000 pesquisadores. As mais importantes são a Conferência Anual de Magnetismo e Materiais Magnéticos (MMM), realizada nos Estados Unidos, a Conferência Internacional de Magnetismo (ICM) realizada a cada três anos em países diferentes. As linhas de pesquisa em Magnetismo na atualidade estão espelhadas na distribuição de artigos apresentados nas conferências ICM de 1976 a 1985 mostrada na Figura 3.2. A partir de 1986 ganhou importância o estudo da correlação entre, o magnetismo e a supercondutividade. Isto decorreu da constatação de que as cerâmicas supercondutoras em altas temperaturas tem propriedades magnéticas peculiares que não ocorrem nos supercondutores tradicionais.

A importância do magnetismo não está restrita apenas à pesquisa básica. Os materiais magnéticos desempenham um importante papel na tecnologia moderna, pois encontram um grande número de aplicações em produtos e processos industriais dos mais variados setores. As aplicações vão desde dispositivos com funções muito simples, como os pequenos ímãs permanentes usados para fechaduras de portas de móveis e utensílios, a inúmeros componentes sofisticados utilizados na indústria eletro-eletrônica. Neste setor os materiais magnéticos somente são suplantados em volume de aplicação pelos semicondutores, mas em termos econômicos eles têm uma importância quase tão grande quanto estes. Muitas das aplicações atuais dos materiais magnéticos resultaram de avanços científicos e tecnológicos obtidos nos últimos 20 anos nas universidades, laboratórios industriais e centros de pesquisa do Japão, Estados Unidos e União Soviética.

Os materiais magnéticos são classificados em três grandes classes, de acordo com sua aplicação: ímãs permanentes, materiais de alta permeabilidade e materiais para gravação magnética. O que determina a aplicação de cada material é seu ciclo de histerese, que representa o campo B resultante em função do campo H aplicado (por exemplo com uma corrente elétrica numa bobina) A Figura 3.3 mostra as grandezas importantes no ciclo de histerese.

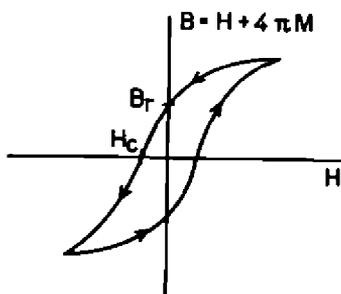


FIGURA 3.3- CICLO DE HISTERESE DE UM MATERIAL MAGNÉTICO.

Os ímãs permanentes constituem a aplicação mais antiga e mais facilmente identificável dos materiais magnéticos. Sua função é criar um campo magnético externo. Para ser utilizado num bom ímã o material

deve ter altos valores de magnetização remanente M_r e campo coercitivo H_c (Figura 3.3.), ou seja, um alto valor do chamado produto-energia $(BH)_{max}$. A Figura 3.4 mostra que a evolução desta grandeza nos materiais magnéticos desenvolvidos durante este século foi formidável, o que resultou de atividades de pesquisa teórica e experimental combinadas. O grande salto dado na década de 50 com a utilização de aglomerados de partículas de um só domínio, por exemplo, foi fruto de estudos teóricos de Néel e Kittel. Por outro lado, a descoberta recente (1983) das excelentes propriedades das ligas de Nd-Fe-B resultou de trabalhos empíricos de indústrias japonesas e americanas. Nestas ligas o papel da terra rara é produzir uma grande anisotropia magnética, responsável pelo alto valor de H_c , enquanto que a grande magnetização é devida à forte interação ferromagnética entre os íons de Fe.

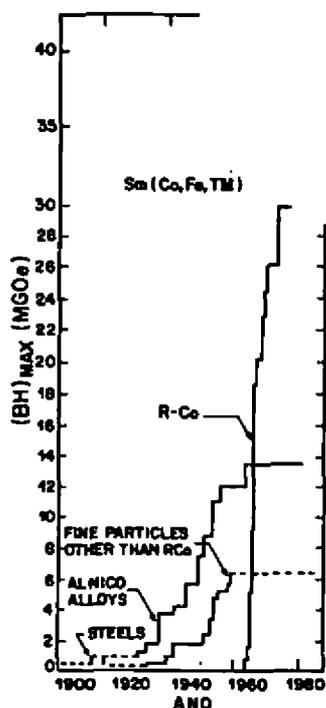


FIGURA 3.4 - EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DOS ÍMÃS.

Os ímãs permanentes são empregados em dispositivos eletromagnéticos (geradores e motores de automóveis, aviões, eletrodomésticos, relógios, computadores, etc.), dispositivos eletroacústicos (alto-falantes, fones e microfones de telefones, agulhas magnéticas de toca-discos, etc), instrumentos de medida (galvanômetros e balanças), dispositivos de torque (ultracentrifugas, medidores de potência elétrica, etc), equipamentos médicos, componentes de microondas, instrumentos e equipamentos científicos diversos, etc. O mercado mundial de ímãs permanentes é da ordem de US\$ 1 bilhão, mas o mercado dos bens que deles dependem é dezenas de vezes maior.

Os principais desafios da pesquisa em materiais para uso em ímãs permanentes são: a compreensão da origem e do papel das interações nos materiais desenvolvidos empiricamente, suas propriedades

térmicas, magnéticas e mecânicas, a síntese de novos materiais com maiores produtos $(BH)_{\max}$, temperaturas de Curie mais elevadas, maior facilidade de fabricação em massa, melhores propriedades mecânicas e, se possível, baseados em insumos minerais abundantes.

Os materiais de alta permeabilidade são utilizados para criar um alto fluxo magnético gerado por uma corrente elétrica ou para produzir uma grande indução magnética devido a um campo externo. Essas propriedades devem ser alcançadas com requisitos diversos de variação no tempo e no espaço, com um mínimo de dissipação de energia. Os materiais de alta permeabilidade (soft magnetic materials) devem então ter um ciclo de histerese estreito (H_c muito pequeno) e uma grande inclinação na parte da curva $B \times H$.

Vários materiais de alta permeabilidade são usados atualmente dependendo da aplicação. Em dispositivos de baixa frequência (motores, geradores, transformadores e reatores, entre outros) os materiais mais comuns são: os chamados aços elétricos, feitos com lâminas de aço com pouca concentração de carbono ou com silício; ligas de ferro e níquel ou ferro e cobalto, na forma de material bruto ou de liga amorfa preparada por esfriamento rápido sobre uma superfície metálica fria. Atualmente há uma grande atividade de pesquisa e desenvolvimento em ligas amorfas com o objetivo de reduzir os mecanismos de perda de energia e melhorar os processos de produção de fitas em larga escala.

Em dispositivos de frequência acima de 10kHz as perdas por correntes parasitas não permitem o uso de aços e ligas metálicas. São então utilizados ferrites diversos como hexagonais (estrutura do $BaFe_{12}O_{19}$), os espinélios (MFe_2O_4) e as granadas ($Y_3Fe_5O_{12}$ -YIG) nos quais ainda hoje há atividades de pesquisa básica. As principais aplicações desses materiais são em transformadores e indutores de alta frequência utilizados em equipamentos eletrônicos, dispositivos de microondas usados em telecomunicações e em radar e cabeças de gravação magnética. O mercado mundial de materiais de alta permeabilidade é da ordem de US\$ 1 bilhão, mas do mesmo modo que com os ímãs permanentes, o mercado de bens que dependem desses materiais é muito maior.

A maior expansão na aplicação de materiais magnéticos nos anos recentes foi na área de gravação magnética, onde eles têm oferecido um grande número de alternativas há várias décadas. Por exemplo, as memórias dos primeiros computadores eram feitas de tambores magnéticos girantes. Posteriormente eles deram lugar aos núcleos de ferrite. Quando estes começaram a ser suplantados por dispositivos semicondutores, apareceram as memórias de bolhas magnéticas e os discos magnéticos. As principais características dos meios magnéticos para gravação são: a não volatilidade, o rápido acesso e a grande capacidade.

Os meios magnéticos atualmente usados na gravação são feitos pela deposição de uma emulsão de partículas magnéticas sobre uma superfície (de polietileno, por exemplo, no caso de fitas), ou filmes finos preparados por evaporação a vácuo ou "sputtering". A informação é gravada no meio em movimento (disco ou fita) através de um sinal elétrico variável no tempo, produzindo uma magnetização que varia no espaço. A fidelidade da gravação de sinais em função da frequência e a capacidade de

armazenamento (em bits/polegada², por exemplo) dependem da qualidade do meio. Os materiais adequados para a gravação têm campo coercitivo intermediário entre os ímãs permanentes (milhares de Oe) e os de alta permeabilidade (alguns Oe). Ele deve ser suficiente para manter a magnetização produzida durante a gravação e ao mesmo tempo possibilitar que a informação seja apagada, sendo tipicamente da ordem de centenas de Oe.

As fitas de gravação de áudio desenvolvidas na década de 30 pela BASF na Alemanha usavam partículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Isto aumenta a anisotropia magnética, dando origem a uma maior coercividade, o que resulta em maior resposta de frequência (pois M pode variar mais rapidamente no espaço sem haver desmagnetização local). Este meio também é utilizado em fitas de vídeo e em discos flexíveis de alta capacidade. Uma melhoria maior na resposta de frequência é alcançada com partículas de CrO_2 , que são cada vez mais utilizadas para todas aplicações. Com a difusão de equipamentos de vídeo-tape e a informatização da sociedade, o volume de materiais magnéticos para gravação tem aumentado consideravelmente. O mercado de equipamentos de gravação atualmente no mundo é da ordem de US\$ 30 bilhões.

Atualmente há uma grande atividade de pesquisa básica e tecnológica em meios e processos de gravação magnética. Os principais objetivos são a obtenção de meios com maior resposta em frequência, maior estabilidade térmica, maior capacidade de armazenamento, melhores propriedades mecânicas e com maior confiabilidade e facilidade de fabricação. Há também uma intensa atividade de desenvolvimento de memórias de bolhas magnéticas e de meios magneto-ópticos, que tem potencialmente uma maior capacidade de armazenamento e rapidez de acesso.

3.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

A evolução do Magnetismo no Brasil pode ser atribuída a liderança exercida por diversas pessoas em diferentes instituições do País. Em cada caso as técnicas experimentais implantadas tiveram um papel quase determinante nas linhas de pesquisa que vieram a se esboçar nos anos seguintes.

Na Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi Theodore Maris, um físico nuclear teórico, que incentivou a implantação da técnica de correlação angular no início da década de 60. A técnica foi utilizada inicialmente para estudos em Física Nuclear e posteriormente foi aplicada em matéria condensada por John Rogers. Foi sob a influência positiva de John Rogers que o grupo de magnetismo da UFRGS desenvolveu-se sendo conduzido posteriormente por Fernando Zawislak e Flávio Livi. Sendo a correlação angular uma técnica microscópica de caracterização, ela influenciou para que outras técnicas do gênero fossem mais tarde desenvolvidas, como a espectroscopia Mössbauer, levando o grupo a uma linha de pesquisa de caracterização de materiais, notadamente ligas intermetálicas.

Na Universidade de São Paulo foi também um físico teórico que no início dos anos 60 liderou a formação de um grupo de Matéria Condensada experimental. Trata-se de Mario Schönberg, que juntamente com Newton Bernardes arregimentou Daunt, Quadros e Salinger para implantar equipamentos de baixas temperaturas (nitrogênio e hélio). As técnicas de criogenia viriam a ser, já nos anos 70, a base para os trabalhos em transições de fase magnéticas liderados por Nei Oliveira e Carlos Becerra. Desde cedo estes trabalhos tiveram a participação de físicos teóricos, inicialmente com Luís Guimarães Ferreira e posteriormente com Silvio Salinas. A linha de pesquisa em materiais magnéticos para aplicações tecnológicas só surgiu nos anos 80 sob a liderança de Frank Missell.

No Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, no Rio de Janeiro, surgiram nos anos 60 duas linhas distintas de pesquisa em magnetismo. No lado experimental foi o químico Jaques Danon que introduziu as técnicas de espectroscopia Mössbauer e ressonância magnética eletrônica no estudo de complexos moleculares. A expansão para outros sistemas, alguns de natureza metálica, foi o encaminhamento natural. Observa-se aí o reencontro de atividades iniciadas na UFRGS, em São Paulo e no Rio, no que diz respeito a estudos em sistemas metálicos. No lado teórico, foi com a colaboração de Adrian de Graaf, na USP, que se desenvolveram as primeiras atividades. Ele orientou dois alunos, Affonso Gomes e Roberto Luzzi, influenciando o primeiro a obter o doutorado em Paris. Em sua volta Gomes trouxe a influência da escola de Friedel e formou no CBPF vários teóricos na linha de magnetismo itinerante.

No final da década de 60 e início dos anos 70 as atividades de pesquisa em magnetismo se espalharam mais no País. Na PUC do Rio de Janeiro Sergio Rezende e Nicim Zagury obtiveram importante resultados na teoria quântica do magnetismo, como o conceito de estados coerentes de magnons. Na UNICAMP, Roberto Luzzi e José Galvão Ramos iniciaram um grupo teórico de magnetismo, enquanto que Daltro Pinatti implantava as técnicas de criogenia e formava o pessoal que mais tarde constituiria um grupo de materiais magnéticos. Em 1972, Rezende foi para Recife levado por cinco recém-mestrados pernambucanos dando origem a um grupo teórico e experimental na linha de fenômenos dinâmicos em magnetismo. A ampliação das áreas de interesse do grupo levou mais tarde a uma diversificação de atividades, com Maurício Coutinho Filho e Ivon Fittipaldi liderando a formação de um grupo de Mecânica Estatística e Cid Araújo um grupo de Óptica Não Linear.

Pela descrição acima pode-se ver que a década de 60 foi caracterizada pela formação dos primeiros físicos do País na área de magnetismo e pela implantação de algumas técnicas experimentais em poucos centros de pesquisa.

A década de 70 poderia ser caracterizada pela implantação de métodos ópticos, micro-ondas (mais sofisticado do que foi iniciado nos anos 60), assim como altos campos magnéticos e baixas temperaturas. Na década de 80 podemos assinalar: a implantação de ultras baixas temperatura (mK) na USP e na UFRJ, o implantador de fons da UFRGS, a técnica de SQUID na PUC/RJ e na UFRJ e a disseminação em vários centros de altos campos magnéticos obtidos com bobinas supercondutoras.

No ponto de vista dos temas de pesquisa observa-se que as primeiras técnicas implantadas estavam voltadas para o estudo de interações hiperfinas e medidas magnéticas. Com a sofisticação das técnicas experimentais houve a passagem para estudos sugeridos pelos avanços da Mecânica Estatística e da teoria das transições de fase e a diversificação para linhas de fenômenos dinâmicos.

B. Situação Atual

No Brasil, o Magnetismo é uma das maiores sub-áreas da Matéria Condensada em termos de número de pesquisadores, refletindo o que também ocorre a nível internacional. Há cerca de 50 teóricos e 50 experimentais com doutorado em 14 instituições do País. Aqui é preciso chamar a atenção de que a Tabela 3.2 mostra um número bem menor de teóricos porque grande parte deles está relacionada na área de Mecânica Estatística e Teoria de Sólidos. Isto reflete o fato anteriormente mencionado de que o Magnetismo é a área de maior aplicação da Mecânica Estatística. Se por um lado isto é bom para o Magnetismo, por outro lado a maior parte dos teóricos no Brasil trabalha com modelos abstratos, muito distantes daqueles que representam os materiais. O resultado é uma interação relativamente pequena entre físicos teóricos e experimentais, o que não é uma característica apenas do magnetismo. Na verdade esta situação é verificada em todos os ramos da Física nos países subdesenvolvidos e resulta tanto da precariedade dos laboratórios e do pequeno volume de resultados experimentais locais quanto da ênfase dada às atividades teóricas. Isto não é bom para a Física, mas é importante ressaltar que este problema já foi mais grave no Brasil. 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. Isto se verifica tanto entre pesquisadores de uma mesma instituição, como de instituições diferentes, até mesmo localizadas em regiões distantes no País.

A Tabela 3.1 mostra as linhas de pesquisas, as técnicas disponíveis e os recursos (convertidos em valor atual de reposição) específicos investidos nos 12 laboratórios de pesquisa em magnetismo do País. O total investido foi de cerca de US\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de dólares). Considerando que nestes laboratórios há 50 doutores, esta quantia corresponde a US\$ 100.000,00/doutor investidos historicamente. Estes laboratórios formaram nos últimos dez anos 34 doutores e 78 mestres e publicaram mais de três centenas de artigos originais de pesquisa em revistas internacionais com árbitros.

No ponto de vista das linhas de pesquisa constata-se que na grande maioria dos temas atualmente investigados internacionalmente existem grupos brasileiros pesquisando, como pode ser visto pela comparação da Figura 3.2 com a Tabela 3.1. Naturalmente o volume da pesquisa é pequeno comparado com o de países industrializados, em consequência do estágio inicial de nosso desenvolvimento científico. Entretanto, é possível destacar várias contribuições relevantes de nossos pesquisadores para o avanço do magnetismo. Na UFRGS por exemplo, várias técnicas de medidas de propriedades de transporte, térmicas e magnéticas, de efeito Mössbauer e de correlação angular tem sido usadas há décadas para caracterizar novas ligas intermetálicas. Em particular ganharam destaque resultados obtidos no início da década de 80 em ligas de Heusler X_2MnY ($X = Ni, Cu, Pd, Y = Al, Sn$).

TABELA 3.1
GRUPOS DE PESQUISA EM MAGNETISMO

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTÁGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFPE Grupo de Magnetismo e Magneto-óptica	Dinâmica de ondas de spin	C	Absorção de microondas e Ressonância magnética eletrônica	200.000
	Sistemas iônicos Desordenados	C	Espalhamento Raman	100.000
	Semicondutores Magnéticos	C	Espalhamento Brillouin	100.000
	Fenômenos Magneto-ópticos	C	Magnetometria (em-vibrante)	100.000
		I	Rotação Faraday e Birrefringência magnética	100.000
			TOTAL	600.000
UFMG Lab. Espectroscopia Hiperfina e Física de Superfícies	Interações hiperfinas	C	Espectroscopia Mossbauer	150.000
	Propriedades magnéticas e Estruturais no volume (ligas macias e duras, compostos de terras raras e metais Superfícies e interfaces.	I	Ultra alto-vácuo	500.000
		I	Magnetometria	50.000
		I	Espectroscopia com Elétrons (LEED, SAES, SAR, SEM, SIMS)	250.000
		C	Ressonância Magnética Resistividade	200.000
			TOTAL	1.150.000
UFES	Metais e ligas intermetálicas	C	Balança de Faraday	15.000
CBPF	Compostos intermetálicos - Terras raras.	C	Magnetometria	100.000
	Propriedades de transporte elétrico.	C	Resistividade elétrica	50.000
	Sistemas desordenados - vidros de spin.	C	Fusão de ligas metálicas	30.000
	Propriedades magnéticas e estruturais			
	Interações hiperfinas em inter- metálicos	C	NMR pulsedo 0-100 MHz	200.000
			TOTAL	380.000
UFRJ Laboratório de Baixas Temperaturas	Sistemas magnéticos desordenados e de baixa dimensionalidade	I	Magnetometria com SQUID	50.000
		C	Calorimetria	50.000
		C	Refrigerador de Diluição	200.000
			TOTAL	310.000

TABELA 3.1
GRUPOS DE PESQUISA EM MAGNETISMO

Continuação

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFRJ Laboratório de Magnetismo e Materiais Magnéticos	Ferrites Ímãs Permanentes Intermetálicos de Terras Raras Calcogenetos	C	Mössbauer	40.000
		I	Magnetometria (amostra vibrante)	15.000
		I	Susceptibilidade	30.000
		I	Preparo de amostras	50.000
TOTAL				135.000
UFF Grupo Técnico	Estrutura eletrônica de sistemas magnéticos Excitações magnéticas Sistemas de baixa dimensionalidade			
PUC/RJ	Compostos intermetálicos - Terras raras e actinídeos - sistemas de rede de Kondo e elétrons pesados	I	Susceptibilidade magnética	70.000
		C	Resistividade elétrica (alta pressão)	70.000
		I	Calor específico	60.000
		I	Preparação de amostras	80.000
TOTAL				280.000
USP Grupo de Magnetismo	Transições de fase em magnetismo Supercondutividade	C	Susceptibilidade Magnética	40.000
		C	Capacitância e resistência	30.000
		C	Altos campos magnéticos	200.000
		C	Baixas Temperaturas-refrigeração diluição	300.000
TOTAL				580.000
USP Grupo de Materiais Magnéticos	Ligas amorfas e alta permeabili- dade Ímãs permanentes de terras raras Compostos intermetálicos	C	Magnetometria (ss.vib.)	155.000
		C	Preparação de materiais	300.000
		C	Magnetostricção	40.000
TOTAL				495.000
UFSCAR Grupo de Preparação Física de Metais	Preparação e caracterização de cristais metálicos	C	Ultra-som pulsado e contínuo	70.000
		C	Pêndulo de torção (elasticidade e relaxação)	15.000
	Intermetálicos em sólidos	C	Altos campos magnéticos	20.000
		C	Susceptibilidade magnética	
		C	Resistividade	
		C	Crescimento de cristais	20.000
TOTAL				125.000

TABELA 3.1
GRUPOS DE PESQUISA EM MAGNETISMO

Continuação

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO (US\$)
UNICAMP Grupo de Baixas Temperaturas	Diagramas de fase e magnetismo Ligas metálicas amorfas Supercondutividade	C	Magnetometria (am-vibrantes) susceptibilidade ac e dc (casos intensos	80.000
		C	Ultra-som e resistividade	40.000
		C	Prep. de Amostras e metalografia	300.000
		C	Calorimetria e condutividade térmica	
			TOTAL	420.000
URICAMP Grupo Técnico	Sistemas de baixa dimensão Magnetismo e supercondutividade Valência intermediária Transições de fase e fenômenos críticos			
UFERS Laboratório de Resistividade	Ligas de Heusler	C	Resistividade em baixas e altas temperaturas	70.000
	Ligas binárias diluídas	C	Magnetometria e susceptibilidade	60.000
	Sistemas magnéticos desordenado - vidros de spin	C	Calor específico	60.000
	Magnetismo de compostos de terras raras	C	Magnetoresistividade	15.000
	Supercondutividade	C	Dilatometria e magnetostrição	15.000
		C	Termogravimetria	10.000
	TOTAL	230.000		

Obs.: Os grupos da tabela são essencialmente experimentais. Há grupos técnicos trabalhando em magnetismo (ver Física Estatística e Teoria de Sólidos em UFCE, UFRN, UFPE, UFAL, UNB, CBPF, UFF, UFRJ, PUC/RJ, UNICAMP, USP-SP, UFRGS, UFPA e UFSC). Há também grupos experimentais incipientes na UFES e na USP-São Carlos.

TABELA 3.2
PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE EM MAGNETISMO

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS 78-88		ARTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	A	D	X	D	78-82	83-87
UFRN	3	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3
UFPE	1	4		1	5	1	3	8	3	26	24
UFRO		6		2	8	3	1			13	34
UFES		3		2						1	6
CBPP	3	3		0	4	4	4	14	4	26	25
PUC/RJ		1									7
UFRJ	1	6			8	5	1	1	-	6	9
UFF	4				2	2		1		10	16
USP-Magnetismo		6			5	6		9	4	29	18
USP-Mat. Magnéticos		4		1		2	6	11	2	22	26
UFSCAR		6			4	2	1	2	3	7	7
URICAMP	2	5			5	2	11	18	13	31	40
UFRS-Resistividade		6			5		1	7	3	18	24
UFRS-Intermetálicos		3		3		4	3	7	2	6	10
TOTAL	14	53		9	45	31	31	78	34	197	249

Obs.: Os grupos da tabela são essencialmente experimentais. Há grupos teóricos trabalhando em magnetismo. (ver Física Estatística e Teoria dos Sólidos) com cerca de 30 doutores.

Na USP destacam-se os estudos de fenômenos críticos em transições de fase de sistemas magnéticos como a descoberta do ponto Lifshitz em MnP. Esses estudos evidenciaram os benefícios da interação teórico-experimental pois a participação de teóricos da própria USP e da UFPE foi decisiva para a interpretação dos resultados. Ainda na USP é importante ressaltar os recentes trabalhos do grupo de materiais magnéticos tanto na tecnologia de preparação de ligas amorfas quanto no esclarecimento das origens da coercividade de ímãs de NiFeB .

O CBPF tem dado contribuições significativas para a compreensão de sistemas metálicos e intermetálicos de terras raras, tanto na caracterização de amostras fabricadas localmente, quanto nos aspectos teóricos. O grupo de baixas temperaturas da UNICAMP também tem se dedicado ao estudo de ligas intermetálicas, tendo nos últimos anos dado várias contribuições para a caracterização de processos de relaxação da magnetização em ligas amorfas.

Na UFPE a maior contribuição tem sido na linha de fenômenos em isolantes e semicondutores magnéticos, tais como o esclarecimento dos mecanismos microscópicos de relaxação da ressonância eletrônica, de magnons e de modos localizados e mais recentemente os primeiros estudos de fenômenos críticos associados a instabilidades de ondas de spin. Os trabalhos em antiferromagnetos desordenados que vem sendo realizados há quase uma década na UFPE levaram recentemente à descoberta do primeiro sistema que apresenta tanto características de vidros de spin quanto de campo aleatório, dependendo da concentração dos componentes. Cabe ressaltar também recentes contribuições para a compreensão do mecanismo de magnetização do Fe puro, que como mencionado anteriormente é um dos problemas em aberto do magnetismo. Finalmente é importante mencionar que é de um professor da UFPE, Jairo Rolim de Almeida, um dos nomes da famosa linha de instabilidade de vidros de spin. A linha de Almeida-Thouless, prevista por Jairo em sua tese de doutoramento em Birmingham, é há vários anos um dos aspectos mais investigados nos vidros de spin.

Além das contribuições acima mencionadas, resultantes principalmente dos trabalhos de grupos de magnetismo experimental, é importante ressaltar que há inúmeros resultados de pesquisadores e grupos teóricos nacionais que ganharam destaque. É o caso dos resultados em fenômenos críticos da USP e da UFPE, em sistemas desordenados e vidros de spin da UFF, UFPE e PUC-RJ, em sistemas de baixa dimensionalidade da UFCE, UFPE, UFMG e USP, em magnetismo de superfícies e multicamadas de UFRGN, UFF, CBPF, UFMG e UFSCAR e de magnetismo de ondas de spin em metais da UFPE, CBPF e UFF.

Com relação à indústria brasileira de materiais magnéticos, seu faturamento é de aproximadamente US\$ 100.000.000,00 (cem milhões de dólares) anuais. A produção é principalmente de chapas de aço silício fabricadas pela Acesita e de ímãs de ferrite de bário fabricados por 3 empresas, duas nacionais (CEM e Supergauss) e uma multinacional (Constanta-Phillips). As 60.000 toneladas anuais de aço silício de grão orientado (GO) e grão não-orientado (GNO) são utilizadas nas indústrias de transformadores e de motores, as ferrites de manganês-zinco são utilizadas em aplicações de alta frequência em aparelhos

TABELA 3.3
 PRODUÇÃO DE MATERIAS MAGNETICAS NO BRASIL

PRODUTOS	FABRICANTES	PRODUÇÃO ANUAL BRASILEIRA EM TONELADAS
Aço Silício CO, CMO	ACESITA	60.000
Aço Baixo Carbono	USINAS, MANGELS	?
Ligas de FeNi, FeCo	ELETROMETAL, VILLARES	100
Ferrites de Manganês- Zinco	CONSTANTA (PHILLIPS) THORNTON	2.400
Isola de	ALRICO ERIZ	300
Isola Orientados de Ferrite	CEN, CONSTANTA, SUPERGAUSS	8.000
Isola Não-Orientados de Ferrite	MODEL NAGOYA, R. SORTAG, etc.	100
Isola Flexíveis	MULTIPLAST, SUPERGAUSS, R. SORTAG	?

Levantamento realizado por F.P. Nizzei (USP) e F. Landgraf (IPT-SP)

televisores, enquanto os ímãs são utilizados predominantemente em alto-falantes. Estes materiais produzidos em larga escala são competitivos no mercado internacional, sendo a metade da produção de ímã de ferrite de bário exportada.

Tanto estes materiais de grande volume de produção quanto os demais listados na Tabela 3.3 são produzidos segundo técnicas tradicionais de fabricação e pouco esforço é despendido nas empresas com o intuito de entender mais profundamente seu comportamento magnético: a conformidade de certas propriedades magnéticas com valores padronizados é o suficiente para o controle de qualidade, uma vez que os usuários de materiais magnéticos não são muito exigentes.

Existe entretanto uma tendência de mudança em curso: os fabricantes de grandes transformadores pressionam a Acesita por chapas de melhor desempenho; o mercado demanda motores de eletrodomésticos com menor consumo energético; o crescimento do mercado de motores exige melhores ímãs de ferrite de estrôncio; o desenvolvimento da indústria de instrumentação pede materiais mais sofisticados como ímãs de terras raras ou ligas amorfas.

Refletindo isto, nos últimos cinco anos tem sido crescente o interesse por materiais magnéticos nos centros de pesquisa de empresas metalúrgicas importantes como a Aços Villares, Eletrometal, Eriez, assim como nas empresas usuárias de materiais magnéticos como Motores Weg e Embraco, dentre as mais importantes. Este interesse repercute no interior da Universidade e com isso há hoje no meio acadêmico interesse nesses materiais por parte de físicos, engenheiros de materiais e engenheiros elétricos.

Na área de materiais magnéticos para gravação, muito pouco está sendo feito pelas indústrias. Há algumas empresas multinacionais (dentre as quais Basf e 3M) produzindo fitas para gravação no País. No entanto elas trazem do Exterior as emulsões magnéticas para deposição nas fitas e realizam no País apenas os processos menos dispendiosos e menos sofisticados.

C. Carências e Dificuldades

As dificuldades da área de Magnetismo no Brasil decorrem de vários fatores. No ponto de vista da pesquisa básica pode-se destacar quatro: o pequeno número de pesquisadores, a escolha dos temas de pesquisa, a deficiência dos laboratórios e a falta de pessoal e equipamentos para preparação de materiais magnéticos. Estes pontos estão detalhados a seguir.

a. O número de pesquisadores e grupos de pesquisa é ainda muito pequeno comparado com outros países. Há várias linhas de pesquisa e poucos pesquisadores, o que torna o intercâmbio interno quase inexistente, enquanto que outras linhas são praticamente inexploradas entre nós.

b. A maioria dos pesquisadores na área é jovem e tem relativamente pouca experiência. Este é um dos fatores responsáveis pela pouca interação teórico-experimental. A maioria dos teóricos em magnetismo escolhe seus temas de pesquisa sem fazer muito esforço para tomar conhecimento das questões levantadas nos trabalhos experimentais na literatura internacional. Não há dúvida de que é importante haver pesquisa em modelos abstratos mas o que preocupa é que esta linha é dominante no Brasil. O mais grave é a tendência de perpetuação desta ênfase, pois a maioria dos novos doutores na área está sendo formada na mesma linha.

c. Os investimentos feitos nos laboratórios de magnetismo até o momento foram relativamente pequenos. Conforme constatado anteriormente, foram apenas US\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de dólares) em 25 anos. Considerando que há 50 doutores experimentais, isto corresponde a uma quantia histórica de US\$ 100.000,00/doutor. Levando em conta que a maior parte desse investimento foi feito na década de 70, podemos considerar que o investimento médio por doutor é no máximo US\$ 8.000,00/doutor/ano, que é uma quantia extremamente pequena.

A consequência evidente do pouco investimento feito até agora e principalmente da ausência de maiores recursos na década de 80, é que os grupos brasileiros não dispõem de muitas técnicas experimentais sofisticadas desenvolvidas nas décadas de 70 e 80. Este é o caso de técnicas de médio e alto custo que utilizam partículas para medir propriedades microscópicas de sólidos, como elétrons, nêutrons, pósitrons e muons. em particular as técnicas de espalhamento elástico e inelástico de nêutrons são fundamentais para o estudo de estruturas e excitações magnéticas. Mas não é somente da falta de técnicas mais dispendiosas que os grupos brasileiros se ressentem. A própria magnetometria de SQUID, que é extremamente difundida no mundo, foi implantada pela primeira vez no País, na PUC, há 8 anos e mais recentemente na UFRJ.

d. Um dos grandes problemas do magnetismo experimental no País é a falta de recursos humanos e laboratórios para a preparação de materiais magnéticos. Somente ligas amorfas e cristais muito simples são fabricados no País. Isto cria uma dependência de colaboração com os países desenvolvidos que dificulta muito o acesso a inúmeras linhas de pesquisa.

No ponto de vista da pesquisa aplicada em magnetismo a constatação evidente é de que muito pouco está sendo feito em nossas universidades e centros de pesquisa. O mais importante esforço nesta direção é o do grupo de materiais magnéticos da USP que está trabalhando na preparação e no estudo dos novos ímãs permanentes de NdFeB e ao mesmo tempo tentando interessar empresários brasileiros em absorver a tecnologia desenvolvida. As raízes deste problema estão nas próprias dificuldades dos grupos universitários anteriormente mencionadas e na natureza do parque industrial brasileiro.

3.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Planos dos Grupos

Os onze grupos experimentais de magnetismo no País planejam para os próximos anos expandir suas linhas de pesquisa de modo a cobrir vários campos pouco explorados entre nós. A Tabela 3.4 apresenta as novas linhas de pesquisa, as novas técnicas e os investimentos necessários previstos com duas hipóteses de trabalho: nas condições atuais do País e em condições ideais.

O exame da Tabela 3.4 mostra que vários grupos pretendem desenvolver capacitação no preparo de materiais, visando superar o que no momento é um dos maiores entraves para a melhoria da qualidade de pesquisa no País. É de se esperar que com o domínio da fabricação de heteroestruturas magnéticas, agregados metálicos, ligas amorfas, cristais metálicos, isolantes e semicondutores e vidros de spin diversos, vários grupos possam competir na fronteira da pesquisa básica e contribuir para a tecnologia de ponta na área de materiais magnéticos. Dentre os novos métodos de caracterização devem se ressaltadas as sofisticadas técnicas microscópicas utilizando partículas (aniquilação de pósitrons, tempo de vida de rotação de spin de muon, EXAFS e espalhamento de nêutrons) planejados pelo grupo da UFMG. Numa fase inicial algumas delas serão utilizadas em colaboração com instituições no Exterior, mas este será um passo essencial para sua futura implantação no País. Pode-se constatar também que vários grupos pretendem implantar técnicas de magnetometria SQUID, que é uma técnica básica de difusão.

É interessante verificar também a preocupação de vários grupos em desenvolver pesquisa aplicada e tecnologia em vários materiais magnéticos e em gravação magneto-óptica. Caso os planos desses grupos sejam concretizados, deverá ser possível ter no País o domínio tecnológico de processos de fabricação de materiais e dispositivos de grande importância para a indústria de alta tecnologia.

B. Recursos Humanos

Uma consequência natural da expansão dos programas de pesquisa nas universidades será a formação de recursos humanos para apoiar os quadros essenciais para a pesquisa básica e tecnológica em magnetismo. A Tabela 3.5 mostra que nos próximos 5 anos os grupos experimentais poderão formar 65 mestres e 34 doutores nas condições atuais do País. Entretanto, estes números podem passar para 98 mestres e 56 doutores caso as condições de financiamento e de trabalho se aproximem das ideais. Neste caso será possível dobrar o número de doutores em magnetismo experimental em relação ao atual.

É importante observar que se nas condições ideais o número de doutores poderia dobrar nos próximos cinco anos, na melhor das hipóteses ele também dobraria nos cinco anos seguintes atingindo cerca de 200 doutores experimentais na próxima década. Este número, sem dúvida, possibilitaria suprir os quadros universitários (cuja expansão prevista pelos grupos atuais é de apenas 25 doutores em 5 anos) bem como

fornecer recursos humanos de alto nível para centros de pesquisa e indústrias para a formação de novos grupos universitários.

C. Investimentos Necessários

Nos próximos 5 anos os grupos experimentais de magnetismo planejam investir US\$ 4.500.000,00 (quatro milhões e quinhentos mil dólares) na aquisição de equipamentos, supondo a manutenção das atuais condições de trabalho. Entretanto eles estão preparados para absorver mais US\$ 3.500.000,00 (três milhões e quinhentos mil dólares) caso o País adote uma política de ciência e tecnologia mais ambiciosa. Cabe ressaltar que, considerando o número atual de 50 doutores experimentais, um investimento de US\$ 4.500.000,00 (quatro milhões e quinhentos mil dólares) em 5 anos corresponde a uma média de US\$ mil/ano/doutor. Esta cifra que é realmente modesta, cai ainda mais se considerarmos que o número de doutores na área inevitavelmente aumentará nos próximos anos. É importante chamar a atenção também de que cerca de 20% dos investimentos mencionados correspondem ao projeto de instalação das técnicas de médio porte da UFMG. Considerando o estágio de desenvolvimento do Departamento de Física da UFMG, esta iniciativa de implantação das técnicas microscópicas sofisticadas deve ser apoiada.

Em resumo, pode-se afirmar que os grupos experimentais de magnetismo do País estão em condições de receber investimentos de US\$ 8.000.000,00 (oito milhões de dólares) nos próximos 5 anos e a mesma quantia nos 5 anos seguintes, ou seja, US\$ 16.000.000,00 (dezesseis milhões de dólares) na próxima década. Estes recursos se conjugados com uma política que possibilite a expansão dos quadros e o custeio da pesquisa, permitirão ao País no fim do século contar com cerca de 200 doutores para o domínio de uma variedade de técnicas científicas em magnetismo e da tecnologia de materiais magnéticos.

TABELA 3.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS EM MAGNETISMO

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
UFPE	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>		
	Agregados metálicos Ligas amorfas Quasecristais	Susceptibilidade ac em campos intensos	40.000
		Rotação de Faraday e birrefringência	30.000
		Preparação de cristais e ligas amorfas	30.000
		TOTAL	100.000
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
	Multicamadas magnéticas Semicondutores semimagnéticos Gravação magneto-óptica	Magnetômetro SQUID	150.000
		Baixas T; refrig. diluição	200.000
		Filmes finos	100.000
		Calor específico	50.000
Microscopia Eletrônica	500.000		
TOTAL	1.100.000		
UFPA	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>		
	Ressonância Magnética Técnicas de Superfícies	Magnetômetro SQUID	150.000
		LEED, SAES, SAN, SINS, DCERS Magnetometria de amostra vibrante	1.000.000
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
	Investigação de materiais com novas técnicas	Baixas T; refrig. diluição TDPAC, NO, EXAFS, uSR	1.000.000
		espalhamento de nêutrons	

TABELA 3.4
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 3 ANOS EM MAGNETISMO

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
UFES	Ligas interestéticas	Magnetometria de amostra	40.000
	Minerais magnéticos naturais Terras raras	vibrante e de indução	
CBPF	Diagramas de fases interestéticas Sistemas desordenados	Magnetometria e campos intensos Resistividade A.C. e a altas temperaturas.	150.000 50.000
	Propriedades de novos materiais Supercondutores de altas temperaturas Ímãs Permanentes Monocristais Interestéticos com Sistemas de baixa dimensionalidade Modelos teóricos para interestéticos com terras raras. Anisotropia.	Magnetoresistividade Magnetometria SQUID Aplicações faixa de frequência	50.000 150.000 100.000
UFRJ Magnetismo e Materiais Magnéticos	Semicondutores Semimagnéticos	Técnicas auxiliares de magnetismo	200.000
		Resistividade	20.000
		Crescimento de Cristais	50.000
		TOTAL	270.000
<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>			
UFRJ Laboratório de Baixas Temperaturas	Filmes Finos Magnéticos	Sputter RF Resistividade Magnetoresistividade	200.000 20.000 20.000
	Ruído Magnético	Magnetometria com SQUID DC	50.000
			TOTAL 290.000
<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>			
		Microscopia de tunelamento de elétrons Complemento das técnicas implantadas	150.000 150.000
			TOTAL 300.000

TABELA 3.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 3 ANOS EM MAGNETISMO

Continuação

INSTITUIÇÃO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO	
PUC/RJ	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>			
		Resistividade elétrica		
		Resistividade elétrica sob pressão hidrostática		
		Susceptibilidade magnética		
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>			
		Preparação de amostras	70.000	
		Magnetização em campos intensos	100.000	
		Resistividade sob altas pressões (Bridgman method)	90.000	
		Automatização de experimentos	40.000	
		Caracterização por difração de raios-X	120.000	
	Crescimento de monocristais	50.000		
		TOTAL	460.000	
USP	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>			
	Magnetismo	Magnetismo em He ³		
		Fluidos quânticos		
		Magneto óptica	100.000	
		NMR	50.000	
	Medidas térmicas diversas	200.000		
	Terao gravimetria	100.000		
		TOTAL	450.000	
USP	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>			
	Materiais Magnéticos	Magnetismo em heteroestruturas		
		Difração de raios-X	250.000	
		Filmes finos - sputtering	200.000	
		Magnetômetro SQUID	150.000	
			TOTAL	600.000
		<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
	Gravação magneto-óptica			
	Lab. de magneto-óptica	200.000		
	Magnetização em campos intensos	150.000		
		TOTAL	350.000	

TABELA 3.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS EM MAGNETISMO

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO (US\$)
UFSCAR	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>		
	Preparação de Cristais metálicos	Difratometria e fluorescência de raios-X	800.000
	Caracterização em campos intensos e baixas T.		
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
	Caracterização de materiais com raios-X	Preparação de amostras por fusão RF	
	Propriedades magnéticas de materiais	Baixas temperaturas	100.000
	Filmes finos de estado de transição		
UNICAMP	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>		
	Sistemas Fe-Terras Raras leves	Dilatometria e calorimetria	50.000
	Hidrogenação, anisotropia, dinâmica de ligas esferas e gravação termomagnética	Magnetostricção	30.000
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
	Novos materiais magnéticos com potencial de aplicação	Magnetometria SQUID	300.000
		Magnetização com pulsos rápidos	
UNICAMP	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>		
	Teoria	Cinética em Magnetismo	Monte Carlo
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>		
		Simulações numéricas em sistemas finitos com supercomputadores	10.000
UFRS	Ligas com elementos f	Magnetometria SQUID	150.000
	Vidros de spin reentrantes	Medidas em campos intensos	50.000
	Terras raras diluídas	Expansão das técnicas para temperaturas mais baixas	200.000
	Ligas Ni-Mn		TOTAL 400.000
	Filmes finos implantados		

TABELA 3.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 3 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM MAGNETISMO

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	H	D	H	D	H	D	H	D
UFRN	3	-	6	-	-	3	2	5
UFPE	5	5	5	8	-	2	-	4
UFMG	0	4	13	7	1	1	2	3
CBPF	8	6	14	8	3	3	3	7
UFRJ	3	1	4	2	2	1	3	2
UFF	3	1	5	3	-	1	-	2
OSP-Magnetismo	12	3	15	6	-	3	-	6
OSP-Net. Magnéticos	4	6	4	6	-	3	-	3
UFSCAR	7	2	16	7	-	-	1	2
UNICAMP	5	3	4	4				
UFRS-Resistividade	5	1	8	3	-	1	-	5
UFRS-Interactivos	2	2	4	2	1	2	1	2
TOTAL	65	34	98	56	7	20	12	41

4. Supercondutividade

4.1 Descrição

A supercondutividade é um efeito físico que ocorre em certos materiais quando resfriados abaixo de uma determinada temperatura crítica, característica de cada material supercondutor. Este fenômeno é caracterizado pela total ausência de resistência à uma corrente elétrica. A supercondutividade foi descoberta em 1911, em Leiden, na Holanda, pelo físico H. Kammerlingh Onnes, quando realizava experiências com mercúrio à 4,2K. Esta descoberta ocorreu três anos após o próprio Onnes ter conseguido liquefazer o gás hélio pela primeira vez.

Outros materiais metálicos, além do mercúrio, tais como o estanho e o chumbo, entre outros, também apresentam o efeito da supercondutividade à temperaturas abaixo de 10K e na presença de campos magnéticos menores do que 1KG. Esses materiais são chamados de supercondutores do tipo I e apresentam correntes críticas baixas.

Um material permanece no estado supercondutor enquanto estiver a uma temperatura inferior à temperatura crítica, T_c , na presença de um campo magnético inferior ao campo magnético crítico, H_c , e pelo qual passa uma corrente elétrica inferior à corrente crítica, J_c .

Durante a década de 1950 novas famílias de materiais supercondutores foram desenvolvidas, materiais esses baseados principalmente em ligas de nióbio (NbTi, Nb₃Sn, Nb₃Zn, etc) que apresentam valores relativamente elevados para T_c , H_c e J_c , de tal ordem que possibilitaram mais tarde a confecção de bobinas supercondutoras de alto campo magnético, viabilizando, desta forma, aplicações industriais. Tais ligas apresentam valores de $T_c = 20K$, $H_c = 250KG$ e $J_c = 10^6$ Amp/cm² e foram denominadas de supercondutores do tipo II. É interessante destacar que o nióbio puro, um elemento, se comporta também como um supercondutor do tipo II.

Até 1950 praticamente nada foi realizado no que diz respeito à tecnologia, sendo que os desenvolvimentos se resumiam à pesquisa básica em laboratórios. Com o aparecimento de liquefator contínuo de hélio, realizado por Collins em 1950 no MIT, e do fio supercondutor, fabricado do composto intermetálico Nb₃Sn, desenvolvido por Kunzler da Bell Labs, uma década depois, iniciaram-se projetos de cunho tecnológico, visando aplicações as mais variadas como: magnetos para confinamento de plasma, eletroímãs utilizados por exemplo em ressonância magnética nuclear, magnetohidrodinâmica, armazenagem de energia, separação magnética, etc.

Com as descobertas da ciência básica a tecnologia se beneficia delas para o seu desenvolvimento e aprimoramento. As descobertas no campo da supercondutividade deram prêmios Nobel, para o próprio Kammerlingh Onnes, em 1913, pelos seus trabalhos da liquefação do hélio e sobre a resistência elétrica no mercúrio; para J.Bardeen, L.Cooper e R. Schriffer, em 1972, por terem formulado um modelo teórico

que explicava o efeito da supercondutividade e para B. Josephson juntamente com L. Esaki e I. Giaever, em 1973, pela descoberta em 1962 do efeito Josephson, e que implicou numa redefinição da metrologia usada em Física, conduzindo a padrões mais precisos a serem utilizados em eletrônica. Além de se ter um melhor entendimento do efeito da supercondutividade, pode-se também constituir dispositivos de alta precisão, baseado no efeito Josephson, empregados, por exemplo, em prospecção geológica e biomagnetismo através desses instrumentos sensíveis, como galvanômetros e magnetômetros (como por exemplo o SQUID - "Superconducting Quantum Interference Device").

Outra aplicação prática da supercondutividade, foi o desenvolvimento de um aparelho de ressonância magnética nuclear (RMN) para a produção de imagens, com conseqüente diagnóstico das mais variadas enfermidades, de forma não invasora (cirurgia exploratória). Tal aparelho tende a substituir, com vantagens, os de tomografia por raios-X, pois a radiação emitida, sendo de radiofrequência e, portanto não ionizante como os raios-X, não causa praticamente nenhum dano durante a espectroscopia do corpo humano, para efeito de diagnóstico.

Estas máquinas foram de enorme sucesso comercial, pois são uma componente significativa na revolução dos diagnósticos médicos não exploratórios. Um aparelho deste encontra-se atualmente em uso no Hospital Albert Einstein em São Paulo. Seu custo capital é da ordem de US\$ 2.000.000,00 (dois milhões de dólares) e tem que ser operado com hélio líquido. O custo médio para manter o equipamento resfriado é da ordem de US\$ 60.000,00 (sessenta mil dólares) anuais.

Nos supercondutores metálicos o nióbio desempenha um papel importante. Os maiores consumidores de nióbio em dispositivos supercondutores são os grandes aceleradores de partículas e os dois principais projetos mundiais, atualmente em discussão são o "Large Hadron Collider" no CERN e o "Superconducting Supercollider" (SSC) nos Estados Unidos. Essas máquinas deverão utilizar cavidades supercondutoras de radiofrequência com uma previsão de consumo de folhas de nióbio ultra puro da ordem de 120 toneladas. Na realidade, como as reservas mundiais de nióbio conhecidas hoje são em torno de 10 milhões de toneladas, e o Brasil tem mais de 90% destas reservas, não há preocupação quanto a demanda do nióbio. O que realmente se necessita, no Brasil, é aperfeiçoarmos a técnica da produção de ligas para fios supercondutores utilizados em eletroímãs e dispositivos dos mais variados.

Os materiais supercondutores de alto T_c foram descobertos em janeiro de 1986 por G. Bednorz e A. Müller (na IBM de Zurich), que observaram indicações de que óxidos de lantânio, hário e cobre poderiam ter resistências elétricas nulas a 35K. Desde então, vários grupos se lançaram em busca de novos materiais desta família de óxidos ternários que pudessem ter uma temperatura crítica T_c mais elevada. Resultados independentes de pesquisadores dos USA, Japão e China revelaram temperaturas em torno de 40K em óxidos metálicos da classe estudada por Müller. Na última semana de dezembro de 1986, o grupo de Chu reportou supercondutividade a 52K nos compostos de Ba-La-Cu-O sob pressão.

A partir de janeiro de 1987 vários grupos relataram terem obtido materiais com temperaturas críticas acima do ponto de ebulição do nitrogênio líquido, que é de 77K. Os pioneiros foram Paul Chu da

Universidade de Houston, Zhongxian da Universidade de Pequim e Bertram Batlogg da Bell Labs. Estes grupos anunciaram T_c da ordem de 92K em compostos de $YBa_2Cu_3O_7$. Os resultados destes grupos foram reproduzidos por vários laboratórios do mundo.

A pesquisa continuou de forma intensa quando, finalmente, em 16 de fevereiro de 1987 a National Science Foundation dos USA anunciou que grupos das Universidades do Alabama e de Houston (Grupo de Chu) observaram, independentemente, indicações de supercondutividade a 92K.

Assim, a supercondutividade entre 90 e 100K parece ser agora, aos físicos, um fenômeno muito comum e consolidado. Na sessão da APS de 18 de março de 1987, houve a apresentação de resultados de supercondutividade acima de 90K em compostos do tipo $RBa_2Cu_3O_{7-x}$, onde R seria um elemento das Terras Raras. Com os compostos revelados e os procedimentos conhecidos, grupos de todo o mundo iniciaram a pesquisa com estes materiais uma vez que tudo estava por medir e caracterizar, bem como amplas possibilidades de aplicações tecnológicas se abriram com estas descobertas.

A pesquisa tecnológica, com vistas a aplicações industriais, resultou logo de início em trabalhos como o crescimento epitaxial de filmes do composto $YBa_2Cu_3O_x$ e o crescimento de monocristais de $YBa_2Cu_3O_x$. Estes trabalhos têm em comum o fato de apresentarem resultados altamente promissores de correntes críticas da ordem de 10^6 Amp/cm² a 4,2K, valores já similares ou superiores aos melhores supercondutores metálicos existentes.

Tais trabalhos são um exemplo dos resultados obtidos quando se faz uma pesquisa dirigida, visando as aplicações tecnológicas. No caso dos filmes finos, com resultados de altas correntes supercondutoras, o horizonte de aplicações abre-se de uma vez, pois a tecnologia de filmes permite, numa aproximação, a conformação inicial do dispositivo supercondutor que se quer construir.

No início de 1988 duas novas famílias de óxidos supercondutores com T_c mais elevados foram descobertas: a) A família do Bi-Sr-Ca-Cu-O com T_c entre 80 e 110K; b) A família do Tl-Ba-Ca-Cu-O com T_c já medido até 130K. Apesar destes novos materiais também não suportarem ainda altas densidades de corrente elétrica, fica evidente a ampliação das possibilidades para uso tecnológico em temperaturas cada vez mais elevadas.

A atividade de pesquisa, tanto fundamental quanto aplicada, continua intensa em todo mundo, com destaque especial nos Estados Unidos e no Japão. O consenso geral dos pesquisadores é de que muitas novidades importantes ainda estão por aparecer, não sendo excluída a descoberta de novos materiais que sejam supercondutores até à temperatura ambiente.

Algumas possibilidades de aplicação da supercondutividade de alto T_c estão enumeradas na Tabela 4.1. Nas colunas procuramos, em função da situação atual de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), estabelecer um sentido de temporalidade que está dividido em alcances, condicionados também à viabilidade tecnológica. O primeiro deles, a curto prazo, significa que as aplicações são imediatamente

TABELA 4.1

APLICAÇÕES DOS NOVOS SUPERCONDUTORES		PRAZOS				
		IMEDIATO	MÉDIO PRAZO	LONGO PRAZO	DEPENDE DE VIABILIZAÇÃO	SEM PREVISÃO
1. INSTRUMENTAÇÃO	magnetômetros	X				
	sensores	X				
2. ELETRÔNICA E INFORMÁTICA	interconectores	X				
	chaveadores	X				
	dispositivos	X				
3. RMN (aparelhos de imagem)			X		X	
4. TRANSPORTE (MAGLEV)			X		X	
5. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA			X		X	
6. PESQUISA	magnetismo			X	X	
	aceleradores			X	X	
	cavidades	X				
	synchrotrons		X		X	
7. EQUIPAMENTOS ENERGÉTICOS	geradores			X	X	
	linhas de transmissão			X	X	
	interruptores			X	X	
	estabilizadores de rede			X	X	
	transformadores		X		X	
	motores		X		X	
8. ARMAZENADORES DE ENERGIA				X	X	
9. GERAÇÃO DE ENERGIA MHD				X	X	
10. FUSÃO NUCLEAR					X	X

viáveis, ou seja, existem indicações sólidas de protótipos já operacionais ou cuja realização já seria possível. Nota-se que concentram-se as aplicações no segmento de tecnologia de ponta. A partir de prazos médios (de 2 a 5 anos), a condicionante de viabilidade tecnológica passa a representar um papel importante, pois estarão envolvidos campos magnéticos de alguns Tesla que vão depender de produtos industrializados como fios, cabos e outros. Cabe ressaltar também que existe uma certa complementaridade nas aplicações dos supercondutores metálicos e cerâmicos (de alto T_c).

Devido a descoberta dos supercondutores de alto T_c , A. Müller e G. Bednorz receberam o prêmio Nobel de Física em 1987, sendo que deste modo, esta descoberta na área de supercondutividade resultou em mais um Prêmio Nobel. Acredita-se que, como outras descobertas científicas importantes transferidas para o setor produtivo causaram impactos econômicos, esta também venha a contribuir para uma nova revolução tecnológica. Podemos exemplificar algumas dessas descobertas de impacto, como o desenvolvimento da máquina a vapor (revolução industrial) e do transistor (informatização), esperando-se que com o desenvolvimento de fios e folhas desses materiais supercondutores se alcance uma revolução tecnológica de grande vulto.

4.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

Antes da descoberta dos supercondutores de alto T_c , os grupos de pesquisa que trabalhavam em supercondutividade, eram o do Instituto de Física da USP (Propriedades de Materiais Amorfos), o do CBPF (Propriedades de Transporte), do Instituto de Física da UFRGS (Propriedades de Transporte), do Instituto de Física da UFRJ (Meta-estabilidade Estrutural), Departamento de Física da PUC/RJ (Desenvolvimento de Transformadores de Fluxo) Fundação de Tecnologia Industrial-Divisão de Materiais Refratários (Cabos e Magnetos Supercondutores) e Instituto de Física da UNICAMP (Propriedades de Transporte e Efeitos Irreversíveis, principalmente de nióbio e ligas).

A evolução da supercondutividade com alto T_c no Brasil é algo inédito, pois com um mês de diferença após a publicação no Exterior da composição química destes óxidos, foi possível a reprodução dos resultados obtidos nos laboratórios com os materiais supercondutores. Apesar dos processos de preparação não terem sido revelados em sua totalidade, a simples publicação da fórmula química do composto foi suficiente para que os grupos brasileiros reproduzissem os resultados internacionais. Dadas as condicionantes de competência, infra-estrutura e disponibilidade de reagentes, o tempo mínimo para a síntese de um composto supercondutor do tipo $YBa_2Cu_3O_x$ é algo em torno de 30 horas.

No X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada em Caxambú-MG, ocorrido de 4 a 7 de maio de 1987, houve uma mesa redonda sobre supercondutividade a alto T_c , onde foram apresentados os resultados e as respectivas pastilhas supercondutoras do grupo de Crescimento de Cristais do Instituto de Física e Química de São Carlos-USP e do grupo de Crescimento de Cristais do Instituto de Pesquisas

Energéticas e Nucleares - IPEN/SP. Foram também anunciados os resultados obtidos no Instituto de Física Gleb Wathagin-UNICAMP. No laboratório de baixas temperaturas do IFUSP, foram realizadas medidas de susceptibilidade magnética em materiais sintetizados pelos grupos de IFQSC e do IPEN, indicando supercondutividade a 92K em compostos de $YBa_2Cu_3O_x$ que estes dois grupos produziram.

Nas semanas que se seguiram a este encontro, outros grupos do País se engajaram na maratona de obter sua pastilha supercondutora, tendo sido anunciado resultados de supercondutividade obtidos pelos grupos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, da Universidade Federal de Pernambuco e da Universidade Federal de São Carlos. Grupos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas também iniciaram suas pesquisas nesta área, formando grupos de experimentais e de teóricos, além de também sintetizarem materiais supercondutores do tipo Y-Ba-Cu-O. Posteriormente, o Instituto de Física da USP e outros grupos como o de cerâmicas avançadas do IPEN e o de cerâmicas do Departamento de Física da UFMG, Belo Horizonte, também sintetizaram pastilhas supercondutoras. Na reunião anual da Associação Brasileira de Cerâmica, realizada em Brasília em 25 de maio de 1987, foram apresentados os resultados do IPEN e do IFQSC e feitas demonstrações de levitação magnética.

Em maio de 1988, houve uma conferência Latino Americana de Supercondutividade no Rio de Janeiro, onde vários trabalhos foram apresentados pela comunidade. Outros foram apresentados na XI ENEMC (Caxambú) resultando a caracterização de novas cerâmicas, baseadas no Bi e nas primeiras aplicações de YBaCuO em SQUID de alto T_c . Cerca de 40 trabalhos entre comunicações orais e painéis foram apresentados.

B. Situação Atual

Há um longo caminho a percorrer desde o estágio inicial, quando se reproduziram nos laboratórios brasileiros amostras do composto $YBa_2Cu_3O_x$ que apresentaram um efeito Meissner considerável, até a produção de um fio que conduza corrente elétrica com alta densidade. A síntese do material $YBa_2Cu_3O_x$ já está razoavelmente dominada pelos grupos brasileiros restando ainda, o seu aprimoramento. A fabricação de um fio, fita ou filme supercondutor apresenta um grau de dificuldade muito maior. O pó embebido em resina ou polímero e extrudado na forma de fio pode tornar-se flexível ou elástico e apresentar o efeito Meissner. Mas este mesmo fio deve apresentar percolação de corrente elétrica de alta densidade e sob campo magnético para ter alguma utilidade energética.

A seguir apresentaremos uma matriz simplificada (Tabela 4.2), onde estão representados diversos grupos nacionais e suas competências específicas, a partir de comunicações de resultados bem como de seu potencial para execução face a projetos correlatos. Nas linhas desta matriz colocaremos os métodos de processamento e de caracterização, e nas colunas os Institutos de Pesquisas e Universidades.

TABELA 4.2

EXPERIÊNCIAS TÉCNICAS		ENTIDADES	
FRACIONAMENTO DE TERRAS RARAS		X	NUCLEMON
SÍNTESE DE YBa-Cu-O		X	IPEN, SÃO PAULO
SÍNTESE DE OXIFLUORETOS		X	IFUSP, SÃO PAULO
SÍNTESE DE FIBRETES		X	IPT, SÃO PAULO
CRESCIMENTO DE CRISTAIS		X	EPUSP, SÃO PAULO
FIBRES FINOS (E/B) SPINNING		X	IQUSP, SÃO PAULO
MELT SPINNING		X	USP, RIO CARLO-SP
EXTRUSÃO DE FIOS		X	UNICAMP, CAMPINAS-SP
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO/QUÍMICA		X	UNESP, ARARAQUARA-SP
CARACTERIZAÇÃO ANALÍTICA	X	X	IFQSC-SUP, SÃO CARLOS-SP
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	X	X	UFSCar, SÃO CARLOS-SP
MÉDIAS MAGNÉTICAS	X	X	FTI, LORENA, SP
MÉDIAS ELÉTRICAS	X	X	UFRJ, RIO DE JANEIRO
MÉDIAS TÉRMICAS	X	X	PUC, RIO DE JANEIRO
ESPALHAMENTO DE LUZ	X	X	CBPF, RIO DE JANEIRO
FOTODIÁSTICA	X	X	UFCE, FORTALEZA, CE
MÉDIAS ÓPTICAS	X	X	UFPE, RECIFE, PE
TEORIA	X	X	UFMG, BELO HORIZONTE, MG
DISPOSITIVOS	X	X	COTN, BELO HORIZONTE, MG
USO E APLICAÇÕES	X	X	UFSC, FLORIANÓPOLIS, SC
	X	X	UFRGS, PORTO ALEGRE, RS
	X		UFF, RIO DE JANEIRO

C. Carências e Dificuldades

Se, por um lado, foi enorme o interesse despertado em todos os físicos do mundo pela supercondutividade a alto T_c , por outro, apesar dos esforços dispendidos pelos físicos brasileiros, as condições existentes nos causam uma certa frustração. O poderio tecnológico dos países mais avançados, sua infra-estrutura laboratorial e o número de pesquisadores disponíveis voltados para as pesquisas materiais já produziu um impressionante volume de resultados em alguns meses de trabalho.

Para nós, dadas nossas condicionantes, fica difícil competir internacionalmente na área acadêmica, apesar de termos demonstrado competência e capacitação tecnológica. Não se faziam no País pesquisas com estes óxidos supercondutores até março de 1987 e nossa experiência com os mesmos ainda é pequena. Como os grupos são em número reduzido e temos ainda muito por fazer também em outras áreas de importância, diríamos que a fase atual é de certa cautela com relação ao que já foi dito internacionalmente e de avaliação das nossas possibilidades no panorama nacional e internacional. Nossas limitações, na área de dispositivos, são ainda maiores, dados os vultosos investimentos que serão necessários.

As maiores dificuldades na área de supercondutividade no Brasil decorrem de vários fatores. A pesquisa básica é dificultada pelo pequeno número de pesquisadores e grupos de pesquisas comparado com outros países. A deficiência crônica dos nossos laboratórios, ou seja, a falta de pessoal e de recursos para aquisição de equipamentos ou a manutenção dos aparelhos já existentes nos laboratórios, associados à burocracia cartorial do País, são fatores impeditivos como em outras áreas para que se faça uma pesquisa competitiva.

Logo após a obtenção de materiais supercondutores de alto T_c , por grupos de pesquisa nacionais, órgãos financiadores do governo fizeram promessas de investimento na área, mas que até o presente momento não se materializaram. Continuamos numa forte dependência de importação da matéria prima e da falta de verbas para o desenvolvimento dos projetos apresentados.

4.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Planos dos Grupos

A descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica apresenta uma série de desafios fundamentais que só poderão ser vencidos com um programa de pesquisa bem elaborado e contínuo realizado por grupos que além de competência tenham facilidades suficientes para alcançarem os objetivos desejados. Inicialmente, algumas das questões mais fundamentais a serem atacadas e que devem ser os objetivos dos grupos, são as seguintes:

- a) qual é o mecanismo responsável pela supercondutividade de alta temperatura crítica?

- b) porque o conteúdo de oxigênio e seu estado de ordem ou desordem é tão importante?
- c) como aumentar a corrente crítica?
- d) qual é o comportamento desses materiais na presença de campos magnéticos?
- e) quais são os efeitos devido à impurezas, danos físicos e/ou químicos?

Sabe-se que estes materiais, em seu estágio atual, são quebradiços (cerâmicas), sensíveis a dano, degradam com a umidade e com a perda de oxigênio e são supercondutores pobres na presença de campos magnéticos. Assim, a plena caracterização destes materiais é uma tarefa essencial para sua futura aplicação. A procura do entendimento dos processos da supercondutividade certamente levará à síntese de materiais dopados ou de sistemas químicos, inicialmente com substituições de elementos do mesmo grupo da tabela periódica ou mesmo o emprego de isótopos como sondas locais. Sabe-se hoje que nos sistemas Y-Ba-Cu-O:

- a) remoção do oxigênio destrói a supercondutividade;
- b) o oxigênio é removido preferencialmente das cadeias lineares nestes materiais;
- c) a temperatura crítica é independente da dopagem com terras raras;
- d) substituintes de Cu diminuem a T_c sem correlação clara com sua carga ou momento magnético;
- f) o comprimento de correlação é muito pequeno.

Para o Brasil, as conclusões preliminares quanto a dopagem foram muito atraentes. A substituição do ítrio por terras raras ou mesmo por uma mistura delas (ex. xenotíma) para o caso dos sistemas Y-Ba-Cu-O favoreceram o barateamento de um processo industrial de fracionamento de terras raras. Além disso, a composição R-Ba-Cu-O, onde R significa ítrio ou terras raras, traz uma maior tranquilidade inicial quanto a estes insumos uma vez que detemos reservas de ítrio e de terras raras retirados das areias monaziticas e da xenotíma.

Pesquisas devem ser desenvolvidas considerando-se os novos supercondutores do tipo $Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-y}$, por exemplo, onde os elétrons é que permeiam em vez de buracos ou vazios, como nas descobertas por Müller e Bednorz.

Quanto aos aspectos puramente tecnológicos, uma outra vertente deverá ser pesquisada paralelamente aos aspectos apenas fundamentais. Para se fazer uso energético dos supercondutores, e, portanto, para se pensar em sua exploração econômica, a pesquisa tecnológica deve ser dirigida no sentido de se obter

TABELA 4.3
GRUPOS DE PESQUISA EM SUPERCONDUTIVIDADE (Situação Atual)

INSTITUCÃO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	Estágio	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UNICAMP	Supercondutividade	C	Susceptibilidade magnética a.c. d.c., resistividade elétrica e térmica, medidas de corrente e campos críticos, calorimetria.	500.000
IPEM	Preparação de amostras Caracterização de amostras Propriedades térmicas	C I I	Crescimento de cristais, filmes finos Espectroscopia óptica e fotoacústica Difração de raios-X, resistividade e difusividade.	500.000
UFSCAR	Supercondutividade	I	Susceptibilidade, resistividade elétrica, magnetometria, calorimetria, filmes finos.	250.000
UFPE	Supercondutividade, novos materiais e instrumentação	I	Resistividade elétrica, susceptibilidade a.c. e d.c., medidas de campo crítico, crescimento de cristais, absorção de micro-ondas.	200.000
CBPF	Supercondutividade	P.I.	Preparação de amostras, susceptibilidade e magnetometria, resistividade elétrica, difração de raios-X, espectroscopia Mossbauer P.A.C. - NMR, ATG, ATD, microscopia óptica, filmes finos.	1.000.000
UFRJ (Lab. Baixas Temperaturas)	Supercondutividade e aplicações (dispositivos)	I I	Magnetometria com SQUID, calor específico, susceptibilidade a.c., resistividade, magnetoresistividade, filmes finos.	400.000
PUC/RJ	Dispositivos supercondutores, instrumentação supercondutora, preparação de amostras e caracterização	C	Construção de SQUIDS e transformadores de fluxo, construção de susceptímetro, magnetocardiógrafo, microfone supercondutor, susceptibilidade magnética, calor específico, resistividade elétrica sob pressão, filmes finos, fotoacústica.	500.000

TABELA 4.3
GRUPOS DE PESQUISA EM SUPERCONDUTIVIDADE (Situação Atual)

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	ESTÁGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO (US\$)
USP	Supercondutividade; Fios de NbTi; Supercondutividade de alto T_c	C I	Medidas de correntes críticas Susceptibilidade e magnetização, medidas de propriedades de transporte.	500.000
UFMG	Propriedades magnéticas dos supercondutores cerâmicos Flutuações críticas nos supercondutores cerâmicos	C C	Resistividade elétrica, magnetização Susceptibilidade a.c., magnetoresistência, calorimetria, dilatação térmica.	250.000
UFMG	Supercondutores de alta temperatura. Produção e caracterização de amostras. Produção e caracterização de cerâmicas (Pó ultrafino) (em colaboração com o Depto. de Química do CEX e com o CETEC)	C	Espectroscopia de correção angular gama- gama. Espectroscopia de impedância, Micro- ondas, RPE, Raios-X. Microscopia eletrônica de varredura (colaboração com o CETEC). Granulometria por correlação de fóton (colaboração com o CETEC).	1.000.000

TABELA 4.4
 PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE - SUPERCONDUTIVIDADE

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS 78/82		ARTIGOS EM REVISTAS C/ARBITRO 78/82 83/88	
	T	E	T	E	IC	M.	D	M	D		
URICAMP	-	3	-	-	1	1	2	8	2	11	18
IPEN	-	5	-	1	1	5	-	-	-	-	1
UFSCAR	-	1	-	-	1	1	-	-	-	-	1
UFPE	-	3	-	-	3	1	-	-	-	-	15
CBPF	3	6	-	1	6	3	1	1	-	-	10
UFRJ (Lab. Baixas Temperatures)	-	4	-	1	1	3	-	-	-	-	1
PDC/RJ	-	3	-	1	6	-	-	1	-	2	10
USP	1	5	-	-	-	2	-	1	1	5	-
UFROS	-	3	-	-	4	-	-	-	-	-	5
UFRG	1	4	-	1	2	-	1	1	-	-	-
TOTAL	5	37	-	5	25	16	4	12	3	18	61

TABELA 4.5
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 5 ANOS - TÉCNICAS E INVESTIMENTOS - SUPERCONDUTIVIDADE

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS E APARELHOS	INVESTIMENTO US\$
USP	<p>Perspectivas de transporte em fios multifilamentares de NbTi, produzidos por agrupamento. Propriedades de transporte em fios produzidos pelo método "Powder in Tube" (supercondutores de alto T_c).</p> <p>Propriedades magnéticas e de transporte de supercondutores de alto T_c com íons magnéticos. Supercondutores de alto T_c produzidos a partir de precursores metálicos. Fitas supercondutoras produzidas pelo método de "Belt Spinning".</p>	D.T.A., susceptômetro, magnetômetro e forno termo-gravimétrico.	400.000
UFRCG	Flutuações críticas; monocristais, compostos supercondutores, junções S-N-S; filmes finos.	Cristalato com bobina supercondutora, SQUID, voltímetros e superímetros de pressão.	350.000
UFRC	Dispositivos de Estado Sólido; projeto, produção e padronização. Determinações de porcentagem de fase supercondutora por métodos não convencionais, incluindo modelagem e tratamento teórico. Determinação rigorosa de corrente e campos críticos e comprimento de penetração.	Implantação do método de quatro pontos, de controle mais rigoroso da temperatura. Automação de medidas RL e RCL. Automação das medidas e tratamento de dados em resistividade e susceptibilidade. Controle rigoroso das condições de conformação (pressão isostática) e de sinterização. Aplicação da faixa de frequência até 13MHz.	500.000
CBPF	Óxidos supercondutores; síntetização em altas pressões de O_2 , monocristais e filmes finos. Determinação de ordens magnéticos através de medidas de SR.	Sistemas de evaporação com SQUID; ATG e DTG	600.000

TABELA 4.5
 PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS - TÉCNICAS E INVESTIMENTOS - SUPERCONDUTIVIDADE

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS E APARELHOS	INVESTIMENTO US\$
URICAMP	Estudo de flutuações na transição supercondutora.	Magnetometria com SQUID, susceptômetro, gerador de ondas, analisador de espectro, lock-in.	350.000
IPEN	Medidas de calor específico	Análise térmica diferencial, calorimetria, evaporador, D.T.A., forno, criostato.	600.000
UFSCAR	Sensores	Oscilador de NMR, lock-in, sputtering, criostato, magneto, gerador de ondas.	250.000
UFPE	Filmes finos, dispositivos supercondutores.	Magnetometria com SQUID, sputtering, sistema para DTA-TGA, espectrometria raios-X, calorimetria, microscopia eletrônica.	2.000.000
UFRJ (Lab. Baixas Temperaturas)	Dispositivos supercondutores com junção Josephson, SQUID de sítio T_c , filmes e dispositivos de sítio T_c .	Medidas de ruído em dispositivos com SQUID d.c.; microscopia de varredura por tunelamento eletrônico, filmes finos e litografia, modernização das técnicas existentes.	800.000
PUC/RJ	SQUID e transformadores de fluxo com filmes Propriedades e susceptibilidade sob pressão	Filmes finos	500.000

TABELA 4.6
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS - PESSOAL - SUPERCONDUTIVIDADE

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO		CONDICÕES IDEAIS		EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDICÕES ATUAIS R	D	CONDICÕES ATUAIS R	D	CONDICÕES ATUAIS R	D	CONDICÕES IDEAIS R	D
URICARP	2	2	3	2	-	1	-	1
IPER	3	-	6	-	-	-	3	-
UFSCAR	-	2	1	3	-	-	1	1
UFPE	2	1	2	2	-	2	-	5
UFRJ (Lab. Baixas Temp.)	3	2	4	3	-	1	-	2
PUC/RJ	2	1	3	2	1	3	1	4
USP	5	-	5	2	-	5	-	6
UFROS	3	1	5	2	2	1	3	2
UFRG	4	2	8	4	1	4	16	8
TOTAL	24	11	37	20	4	17	24	29

Cavidades

a) medir, compreender e controlar as propriedades supercondutoras de superfície e o comportamento em alta frequência (RF).

A produção de fios supercondutores poderá envolver, por exemplo, o desenvolvimento de fornos longos que possam processar continuamente estes fios na medida em que vão sendo extrudados. Tais fios deverão ser flexíveis o suficiente para que possam ser torcidos e formatados em cabos. Os cabos são componentes principais dos enrolamentos de magnetos e das linhas de transmissão.

As tabelas que se seguem (4.3, 4.4, 4.5 e 4.6) fornecem dados referentes a situação atual dos grupos de pesquisa, suas linhas de pesquisa e investimento estimado, já realizado; pessoal científico e produtividade; perspectivas de técnicas e investimentos para os próximos 5 anos; e perspectivas de pessoal para os próximos 5 anos.

B. Comentários Finais

Analisando as tabelas verifica-se que o número de estudantes de doutorado por doutor está numa razão de 0,1 (um décimo), que é muito pequena para as necessidades de formação de recursos humanos para a área. Um dos motivos desta razão ser baixa provavelmente é devido ao fato de que a maioria dos doutores não se dedica exclusivamente a área de supercondutividade, devendo ter orientandos em outras áreas.

O número de alunos de Iniciação Científica, 25 (vinte e cinco) não é o ideal, mas razoável se levarmos em conta a superposição de áreas de atuação dos doutores. É de extrema importância a formação de alunos de Iniciação Científica, pois estes constituem o material humano a ser formado na pós-graduação. Uma boa orientação destes alunos aumenta consideravelmente o potencial de se ter bons alunos nos programas de pesquisa elevando o nível dos recursos humanos. Os órgãos governamentais de apoio a bolsas devem levar em consideração a importância da formação desses alunos, assim como as Universidades e Institutos de Pesquisas devem incentivar este tipo de atividade.

Das perspectivas para os próximos anos verifica-se que a demanda ideal é de 29 (vinte e nove) doutores quando a capacidade de formação ideal é de 20 (vinte) doutores, enquanto que nas condições atuais a capacidade de formação é de 11 (onze) doutores. Conclui-se que existe a necessidade de estimular uma maior participação de alunos e orientadores na área. Como existem poucos grupos de pesquisa e alguns ainda implantando linhas de pesquisa, a formação de pessoal deverá ser realizada não só no País como também no Exterior para que haja um maior intercâmbio de idéias e propostas de pesquisa. A formação de pessoal no Exterior, nesta área específica, seria altamente desejada para reforçar a formação de recursos humanos no País.

É necessário que haja um maior apoio por parte dos órgãos financiadores para que se possa concretizar a realização dos projetos apresentados. Verifica-se que há uma grande tendência dos grupos para o desenvolvimento de dispositivos supercondutores, que certamente levará a projetos de construção e testes de protótipos com aplicações bem definidas. A área sendo devidamente apoiada poderá abrir um mercado de trabalho para pesquisadores, mercado este inexistente no presente momento.

A formação de pessoal técnico de nível médio e superior se faz essencial nesta área de supercondutividade, para que possam dar apoio aos projetos de pesquisa básica e desenvolvimento tecnológico.

O governo deve se conscientizar que somente o apoio à formação de recursos humanos, científicos e técnicos, não é suficiente para o desenvolvimento de qualquer área. Necessita-se de um plano objetivo de absorção deste pessoal que é formado, pois, sem a possibilidade de contratação, como ocorre no momento, há um completo desestímulo para a formação desses recursos humanos. A demanda deve ser suprida e os meios para tal devem ser providos.

Um investimento total estimado atual em equipamentos de grande e médio portes é de US\$ 4.600.000,00 (quatro milhões e seiscientos mil dólares), que na realidade engloba muitos equipamentos e facilidades existentes, que são utilizados também em outras áreas. O investimento total estimado para os próximos cinco anos de US\$ 6.500.000,00 (seis milhões e quinhentos mil dólares) é uma demanda realista uma vez que se destina prioritariamente à implantação de novas técnicas, desenvolvimento de dispositivos e aquisição de equipamentos inexistentes.

A realização dos projetos propostos certamente levará o País a competir internacionalmente com o desenvolvimento futuro da área, a médio prazo, permitindo a formação de pessoal científico e técnico necessário à área, assim como o desenvolvimento científico e tecnológico.

5. Cristais Líquidos e Polímeros

5.1 DESCRIÇÃO

A. Cristais Líquidos

A.1 Um Século de Existência dos Cristais Líquidos

Os cristais líquidos representam um certo número de estados particulares da matéria, nos quais a ordem de seus constituintes básicos é intermediária entre a ordem orientacional e posicional de longo alcance dos sólidos cristalinos e a desordem de longo alcance dos líquidos isotrópicos e gases.

A primeira observação experimental de um cristal líquido foi feita pelo botânico austríaco Friedrich Reinitzer em 1888. Observou o chamado "fenômeno das cores", conhecido hoje como característico de muitos cristais líquidos colestéricos, quando o acetato ou o benzoato de colesterila líquido era resfriado. O colesterol já havia sido identificado em 1812. Esse mesmo fenômeno das cores, que consiste basicamente em se observar a partir da incidência em grandes ângulos da luz branca, a reflexão seletiva de luz com diferentes comprimentos de onda, foi observado em outras substâncias derivadas do colesterol. Além dessa reflexão seletiva, Reinitzer observou que o benzoato de colesterila cuidadosamente purificado fundia a 145,5°C, apresentando uma fluidez opaca e, continuando o aquecimento, em 178,5°C se tornava subitamente transparente. Esse é o chamado "clearing point" dos cristais líquidos. O resfriamento subsequente do material produzia o "fenômeno das cores".

Uma vez que a existência dessas duas temperaturas de fusão poderia ser devida a existência de impurezas no material, Reinitzer solicitou ao prof. Otto Lehmann de Aachen (RFA) a síntese, purificação e observação desses materiais para afastar a hipótese das impurezas. Após uma criteriosa série de observações, Lehmann confirmou as experiências de Reinitzer e denominou essas substâncias **CRISTAIS LÍQUIDOS** uma vez que possuíam uma certa rigidez, eram fluidos e também apresentavam anisotropia óptica.

A contribuição francesa veio em 1922 com Friedel. O pesquisador francês sistematizou as observações efetuadas até então, criticou o termo cristais líquidos e concluiu que se tratava de um novo estado da matéria, intermediário entre o sólido cristalino e o líquido isotrópico (ou amorfo). Propõe, então, o termo **MESOMÓRFICO** para caracterizar essa nova fase (ou **MESOFASE**).

De lá para cá, depois de transcorridos cem anos da primeira observação experimental, os cristais líquidos (como são usualmente conhecidos), têm se revelado um sistema extremamente interessante não só pelas suas propriedades físico-químicas, mas também pelas suas inúmeras aplicações de natureza tecnológica.

A.2 Fluidos Anisotrópicos

As fases intermediárias entre o sólido cristalino e o líquido isotrópico são definidas essencialmente por meio de suas propriedades de simetria e grau de ordem.

As mesofases que apresentam um ordenamento tridimensional dos centros de massa de seus constituintes básicos, próprio de uma rede cristalina, no entanto com desordem rotacional, são conhecidas como cristais plásticos ou mesofases cristalinas desordenadas. A maioria dessas substâncias é composta de moléculas na forma de glóbulos (forma aproximadamente esférica), para os quais a barreira à rotação é mais facilmente vencida com a elevação da temperatura, em comparação com a energia necessária para a ruptura da rede cristalina.

No caso dos cristais líquidos, que se constituem num dos mais interessantes exemplos de fluidos anisotrópicos supermoleculares, os seus constituintes básicos apresentam graus de ordenamento orientacional e em alguns casos mesmo posicional. A maioria das substâncias que apresentam fases de cristal líquido possuem moléculas alongadas. Existem, no entanto, substâncias com moléculas com formas de discos, que apresentam fases de cristal líquido, ditas colunares.

As substâncias líquido-cristalinas se dividem em duas grandes categorias, de acordo com os parâmetros mais relevantes nas transições de fase: os termotrópicos e os liotrópicos.

Mesofases Termotrópicas

As mesofases termotrópicas são obtidas por aquecimento de uma substância sólida, composta de moléculas de grande anisotropia de forma (moléculas alongadas ou em forma de discos). Apresentam uma fase isotrópica a alta temperatura. Os parâmetros relevantes para as transições de fase são a temperatura e a pressão. Essas substâncias são largamente utilizadas na confecção de dispositivos eletro-ópticos e sensores de temperatura e pressão.

Mesofases Liotrópicas

Em determinadas condições de temperatura e concentrações relativas dos seus componentes, uma mistura de moléculas anfífilas e um solvente podem originar mesofases líquido-cristalinas denominadas liotrópicas. Os principais parâmetros responsáveis pelas transições de fase são a temperatura, a pressão e as concentrações relativas dos componentes da mistura. As moléculas anfífilas, devido às suas características diferenciadas em termos de solubilização em um solvente (polar ou apolar), a partir de uma determinada concentração micelar crítica, formam aglomerados de moléculas. Esses aglomerados podem ter dimensões e formas diversas e, quando possuem uma anisotropia de forma não muito acentuada, são denominados micelas. As micelas podem ser consideradas como os constituintes básicos

de um cristal líquido liotrópico. As substâncias com características liotrópicas participam de uma série de processos biológicos vitais, tornando bastante interessante o estudo dessas mesofases.

A.3 Implicações Tecnológicas

Apesar dos cristais líquidos serem conhecidos desde o fim do século passado, o interesse em sua utilização na confecção de dispositivos (mosstradores, sensores de temperatura e pressão) só apareceu por volta da década de 60. No caso dos mostradores (conhecidos como LCDs - "Liquid crystal displays", a possibilidade de controlar a transmissão ou reflexão da luz emitida por uma fonte externa, com muito menor potência do que a necessária para a emissão de luz por materiais luminescentes, foi o principal incentivo para a pesquisa e o desenvolvimento desses dispositivos.

Do ponto de vista tecnológico a área de cristais líquidos é considerada estratégica pelas aplicações que estes materiais têm em dispositivos, em especial em dispositivos eletrônicos para exibição de informação analógica e digital, os "displays". O mercado desses dispositivos já chega a atingir 500 milhões de dólares anuais, sendo que apenas em 1986 cerca de 1 milhão de unidades foram fabricadas para aplicações em eletrônica de consumo e profissional.

As características de baixo consumo de potência, baixas tensões de operação, portabilidade, simplicidade de fabricação, baixo custo, excelente leitura sob iluminação ambiental intensa e alta confiabilidade conferem aos mostradores de cristal líquido uma posição destacada na corrida pelos painéis de grande área, em relação a seus competidores, os tubos de raios catódicos - CRTs, os displays a plasma - GPDs, os eletroluminescentes - ELDs e os fluorescentes - VFDs. As limitações de faixas de temperaturas de operação, ângulo de visada, brilho, contraste e resolução vêm sendo superadas através do desenvolvimento de novos materiais e processos de obtenção, bem como de novas alternativas de endereçamento, a exemplo das matrizes ativas de dispositivos de filmes finos que acionam diretamente cada ponto de imagem (pixel).

Pesquisas intensas vêm sendo realizadas em cristais de alta birrefringência ($n > 1,5$), de resposta mais rápida e operando em maiores intervalos de temperatura. O efeito da birrefringência supertorcida e os cristais líquidos ferroelétricos vem abrindo perspectivas importantes no sentido de contornar as limitações de elevadas taxas de multiplexagem no ângulo de visada, no brilho e no contraste.

As matrizes ativas de dispositivos de filmes finos eliminam os problemas de contraste e ângulo de visada, enquanto que os iluminadores posteriores ("backlighting") compensam a falta de brilho, a um sacrifício de custo evidentemente. Diversos materiais semicondutores vêm sendo utilizados para os dispositivos de filmes finos, entre eles o seleneto de cádmio, o silício policristalino e o silício amorfo. Filtros RGB vêm também sendo intensamente investigados para aplicações em televisores coloridos, com expressivos resultados já oferecidos no mercado.

A melhoria nas características ópticas dos "displays", sua maior confiabilidade e maiores faixas de temperatura de operação tem ampliado as aplicações dos mostradores para condições mais restritivas, como é o caso dos painéis de veículos automotivos, aeronaves e mesmo nas aplicações militares. Nesse sentido foi importante a contribuição da tecnologia de solda do circuito integrado de acionamento diretamente sobre o vidro (tecnologia do "chip on glass") usada tanto para matrizes ativas como nos "displays" passivos, a qual reduz significativamente o número de conexões entre o LCD e a placa de circuito impresso, conferindo maior confiabilidade ao sistema.

Novas aplicações dos cristais líquidos alinhados homeotropicamente são apresentadas no mercado, em "shutters" eletroópticos para "displays" estereoscópicos de CRTs, em janelas de edifícios e veículos, em telas de grande projeção.

As pesquisas em novos cristais líquidos, em polarizadores e em processos de produção têm sido e continuarão sendo fundamentais para reduzir os problemas do contraste, do tempo de resposta e da dependência dos parâmetros ópticos com a temperatura. Os avanços na tecnologia de fabricação de matrizes de dispositivos ativos têm permitido alcançar maior rendimento de fabricação dos dispositivos, o que abre perspectivas importantes para os "displays" de grande área com elevado contraste e maiores ângulos de visada. A tecnologia de solda do circuito integrado de acionamento sobre o vidro vem garantindo, por sua vez, maior confiabilidade aos painéis, além de reduzir dimensões finais.

Os desafios da tecnologia de LCDs na próxima década parecem estar em se alcançar grandes áreas - como indica o empenho do governo japonês ("Japanese Ministry of International Trade and Industry - MITI") no seu programa "display-on-a-wall" de muitos milhões de dólares. A tecnologia de ferroelétricos parece pronta para decolar com promessas de alta resolução monocromática sem necessitar das matrizes ativas, estando ainda sem resposta questões como viabilidade de fabricação em grande escala, preço, consumo de potência e confiabilidade.

A.4 Interação com a Indústria e a Sociedade

As relações entre essa área da Física, a indústria e a sociedade já são extremamente intensas em função do interesse tecnológico que os cristais líquidos apresentam para a importante indústria já instalada a nível mundial. As relações entre a pesquisa de novos materiais e de novos processos e a fabricação em si já são tão estreitas que os esforços de pesquisa e desenvolvimento são assumidos pelas próprias empresas fabricantes, que mantêm seus próprios laboratórios de pesquisa e desenvolvimento.

A tecnologia de mostradores é no entanto uma tecnologia de ponta que abrange diversas áreas do conhecimento, do processamento físico-químico de materiais e insumos às técnicas de confecção dos dispositivos, sua caracterização opto-elétrica, seu endereçamento eletrônico, passando pelas ferramentas para geração automática de máscaras. A capacidade de projeto e construção de equipamentos, jigs de teste e instrumentos de medida, bem como os processos de produção e automação da fabricação não

devem ser desprezados como linhas de grande interesse para o desenvolvimento de tecnologia como um todo, tendo seu domínio se constituído num trunfo importante da indústria japonesa, especialmente no que se refere à tecnologia de fabricação em grande escala.

Todavia, o desenvolvimento tecnológico da área depende de esforços contínuos de pesquisa para que seja mantido seu ritmo de evolução, competitividade e inovação em face às suas concorrentes.

B. Polímeros

B.1 Introdução

Polímeros são moléculas com estrutura em cadeias longas, lineares ou ramificadas, e que resultam da combinação química de certo número (tipicamente milhares) de unidades mais simples repetidas de maneira regular ou aleatória. Enquanto que polímeros naturais como a borracha são conhecidos desde tempos imemoriais, só no século XX, com a expansão da indústria química, se tornou possível a preparação em larga escala de polímeros sintéticos, com as mais variadas propriedades. Não apenas alterações na natureza química das unidades que se repetem (os monômeros), mas mesmo simples diferenças estruturais no tipo de organização da cadeia podem levar a moléculas com propriedades físicas e químicas profundamente distintas; isto explica a enorme diversidade de polímeros existentes. Proteínas, enzimas, e diversas outras moléculas poliméricas de interesse biológico, são ainda exemplos da grande variação possível tanto na natureza quanto nas funções e propriedades dos polímeros.

Em 1987 foram produzidas a nível mundial mais de 23 milhões de toneladas de plástico, fibras e borracha sintética. A importância desses materiais na civilização moderna torna fácil compreender o grande interesse econômico pelo estudo das propriedades dos polímeros. A interdisciplinaridade é uma característica desse esforço: além dos diversos ramos da química necessários à síntese, caracterização e produção de polímeros em escala industrial, cientistas e engenheiros de materiais têm um papel fundamental a desempenhar, por exemplo, na melhoria da processabilidade e da estabilidade mecânica e ambiental do material obtido.

B.2 Polímeros Tradicionais

O comportamento dos polímeros é determinado pela natureza química dos monômeros bem como de suas interações e organização ao longo da cadeia. As propriedades físicas dos polímeros estão tradicionalmente associadas a suas propriedades mecânicas especiais (por exemplo, plasticidade) e rigidez dielétrica (o que os torna material de escolha como isolantes na indústria elétrica/eletrônica, por exemplo). Sendo essas características do material no geral bem entendidas do ponto de vista da física básica envolvida, o controle das propriedades e dos processos de obtenção dos polímeros convencionais repousa quase que inteiramente nas mãos da Química e da Engenharia de Materiais. Esta razão é a

principal responsável pelo fato de que o estudo de polímeros é tradicionalmente visto como muito mais ligado a essas áreas de trabalho que à Física propriamente dita.

Recentemente, porém, uma física nova e de largo impacto industrial tem sido associada ao estudo das propriedades de fluxo (ou reológicas) de polímeros: efeitos como relaxação e memória de forma, viscoelasticidade e não-linearidade de fluxo têm sido estudados com o uso de técnicas mais modernas da física estatística. Teorias de fenômenos críticos têm sido aplicadas ao estudo das transições de fase e estabilidade de soluções e ligas poliméricas. Ao mesmo tempo, sendo as propriedades mecânicas de um polímero extremamente dependentes das orientações relativas das fibras, o estudo da física do crescimento, do ordenamento e da organização espacial das cadeias poliméricas experimenta hoje uma grande expansão e crescente interesse tanto do ponto de vista básico quanto aplicado.

B.3 Polímeros Não-Convencionais

Nos últimos 10 anos a nossa compreensão sobre a estrutura e propriedades de polímeros tem sido revolucionada pela descoberta de propriedades não convencionais em termos de condução elétrica e de absorção óptica não-linear em certas classes de polímeros orgânicos. Essas propriedades, pelo que apresentam de novo em termos de mecanismos básicos, trouxeram para a esfera da Física o estudo das propriedades desses materiais e o desenvolvimento de dispositivos que explorem as características especiais dessas novas classes de polímeros. No presente, é a Física a ciência de fronteira para o estudo dos polímeros não-convencionais.

Exemplo maior desses materiais não-convencionais é o poliacetileno. Esse plástico, que consiste essencialmente em fibrilas compostas por longas cadeias de carbono, cada um ligado a um átomo de hidrogênio, foi pela primeira vez preparado sob forma de filmes de boa qualidade em finais da década de 70. Logo se descobriu que uma vez expostos a agentes dopantes (no caso, substâncias químicas doadoras ouceptoras de elétrons) esses filmes apresentam condutividade elétrica variável, chegando a atingir níveis comparáveis a dos metais (de fato, amostras de poliacetileno altamente orientadas chegam a apresentar menor resistividade por peso que a do cobre). A existência de polímeros condutores veio reforçar a necessidade de melhor entendimento da física de materiais orgânicos desafiada ainda na década de 60 pela descoberta de alta condutividade elétrica anisotrópica (essencialmente unidimensionais) em certas classes de cristais orgânicos.

Do ponto de vista básico, o principal desafio consiste em se tentar entender os mecanismos responsáveis pelo fenômeno da condutividade orgânica. No caso de cadeias conjugadas (isto é, aquelas em que átomos de carbono consecutivos interagem através de ligações simples e duplas alternadas), o trabalho de W.P. Su, J.R. Schrieffer e A.J. Heeger no início da década de 80, foi de importância fundamental ao introduzir a idéia de que defeitos conformacionais (resultantes essencialmente da quebra do padrão de alternância das ligações) poderiam ser deslocalizáveis ao longo das cadeias poliméricas. Esse mecanismo daria então origem aos portadores de spin (ou carga, no caso de sistemas dopados)

capazes de responder pela variada gama de inusitadas propriedades de transporte descobertas para o poliacetileno. A semelhança do mecanismo proposto com a idéia de excitações não-dispersivas associou o nome de sólitons ao modelo. Embora sólitons não pudessem servir como mecanismo universal para a condutividade em polímeros (por razões associadas às exigências de alta simetria no material) extensões do modelo (pólarons) pareciam explicar boa parte da fenomenologia conhecida para esses materiais. Todavia, a descoberta de que a polianilina, um polímero orgânico de há muito conhecido, poderia atingir alta condutividade por efeito da protonação da cadeia polimérica, remeteu o problema às suas origens, pela dificuldade de enquadrar tais resultados dentro dos modelos adotados. Assim, a origem da condutividade orgânica permanece no presente uma questão ainda em aberto.

Por outro lado, propriedades ópticas não-lineares ultra-rápidas têm sido identificadas em diversas moléculas orgânicas. Em regime de alta frequência as contribuições induzidas por polarização devem dominar a resposta desses materiais. Em sistemas orgânicos não-saturados (isto é, aqueles em que átomos de carbono interagem entre si via ligações duplas ou triplas) elétrons deslocalizáveis do tipo π estão presentes. Polímeros orgânicos não saturados aparecem então como candidatos ideais à manifestação de intensas respostas ópticas não-lineares devido ao grande número de elétrons π e a natural anisotropia de sua distribuição ao longo da cadeia. O entendimento dos fatores que controlam a distribuição desses elétrons e sua polarizabilidade se encontra ainda em sua fase inicial.

Para a obtenção de materiais de boa qualidade óptica, necessário se faz que, tanto quanto possível, seja reduzido o número de defeitos. Polímeros obtidos por métodos de síntese orgânica ou eletroquímicos são em geral amorfos ou de baixa cristalinidade. Embora novas rotas de síntese (como a que utiliza matrizes de cristais líquidos orientados por campos externos) que buscam aumentar o grau de anisotropia do polímero obtido tenham sido desenvolvidas, uma técnica promissora de caráter mais geral e que permite obter amostras de melhor qualidade é a da preparação dos chamados filmes de Langmuir-Blodgett.

Essa técnica, que leva o nome de seus descobridores, foi desenvolvida já na década de 30 mas só recentemente redescoberta como de extrema conveniência para a obtenção de filmes poliméricos de alta qualidade para a indústria óptica ou eletrônica. Ela se baseia no uso do monômero desejado ao qual se provê terminais anfífilicos (isto é, de natureza química oposta, um hidrófobo); uma vez dispersas na superfície de um solvente (usualmente água ultra-pura), essas moléculas se orientam naturalmente em monocamadas de modo a minimizar a tensão superficial. A polimerização é então induzida (por luz, por exemplo) e dá origem a um filme polimérico altamente ordenado. Esses filmes podem ser sucessivamente transferidos para um substrato conveniente de modo a formar multicamadas praticamente isentas de defeitos. Assim, amostras de alta qualidade óptica ou com características que as tornem adequadas ao uso em componentes eletrônicos têm sido obtidas.

Filmes de Langmuir-Blodgett já foram utilizados para a obtenção de estruturas que simulam o comportamento de moléculas biológicas na recepção e transporte de excitações luminosas e elétricas. Estes são talvez os exemplos mais promissores da chamada eletrônica a nível molecular, tecnologia de nova geração em que o processamento da informação se dá pela mudança na conformação de moléculas.

B.4 Implicações Tecnológicas

Polímeros têm seu lugar assegurado na moderna tecnologia, seja como plásticos, resinas ou pigmentos. Para a expansão desse ramo da indústria química tradicional deverão contribuir desenvolvimentos que levem a melhorias nas propriedades reológicas, mecânicas e de estabilidade térmica desses materiais. O uso de polímeros convencionais na indústria eletrônica, seja como fotoresistências, em cavidades ópticas ou como guias de onda, aparece como um segmento extremamente promissor.

Por outro lado, ainda que os mecanismos básicos da condutividade orgânica não estejam suficientemente esclarecidos, diversas aplicações tecnológicas dos polímeros condutores têm sido aventadas, enquanto que os primeiros dispositivos à base desses materiais começam a aparecer no mercado. O caráter renovável e o baixo custo relativo de fabricação abrem para os polímeros orgânicos condutores excelentes perspectivas na substituição de metais pela possibilidade de reunir alta condutividade elétrica às convenientes propriedades mecânicas dos plásticos. Tal uso, porém, ainda não alcançou seu pleno potencial até o presente devido aos problemas enfrentados na melhoria da processabilidade e estabilidade ambiental dos polímeros condutores. Cumpre notar no entanto que a descoberta dos polímeros condutores é relativamente recente e que, portanto, grande progresso nessa direção pode ser esperado à medida que maior número de materiais com essas propriedades venham a ser produzidos e estudados.

A possibilidade de dopagem reversível dos polímeros condutores torna possível o uso desses materiais em dispositivos de armazenamento de carga e energia. Essas baterias teriam maior densidade de energia acumulada e seriam especialmente adequadas em situações em que considerações de peso ou volume (por exemplo na indústria espacial) se tornassem importantes. Desde finais de 1986 se encontram à disposição do mercado internacional baterias à base de polianilina; o uso de materiais orgânicos levou a concepções inovadoras na geometria do dispositivo, tendo uma das baterias comercializadas a forma e dimensões típicas de um cartão de crédito.

Uma importante área de aplicações de polímeros condutores tem sido como elementos ativos em sensores. A existência de efeitos como o termo e o eletrocromismo em alguns desses materiais, bem como a alta especificidade de reações químicas que alterem a estrutura das cadeias, e portanto suas propriedades, têm sido exploradas no desenvolvimento de variados dispositivos. Hoje, por exemplo, são comercializados tanto sensores de temperatura para a indústria alimentícia (onde a mudança de coloração do polímero é usada para indicar variação de temperatura durante o armazenamento do produto), quanto etiquetas de controle de estoque acionadas por radiação eletromagnética (em que o circuito eletrônico só se torna ativo caso o polímero haja sido exposto ao ambiente), além de sistemas de controle de processos para a indústria química com transistores à base de polímeros condutores.

Ao mesmo tempo, o uso de filmes de Langmuir-Blodgett à base de polímeros orgânicos tem se mostrado especialmente adequado na construção de sensores de radiação infravermelha, pela pequena massa térmica das camadas que funcionam como componente ativo do circuito. Mais recentemente, laboratórios industriais japoneses têm perseguido de modo ativo a idéia do registro óptico de informações pela mudança conformacional induzida em moléculas orgânicas depositadas em multicamadas de Langmuir-Blodgett.

Tal como ocorreu há cerca de duas décadas com os cristais líquidos, no presente, polímeros orgânicos não convencionais são objeto de crescente interesse industrial. Há previsões otimistas de que uma nova revolução tecnológica baseada em dispositivos que explorem as inusitadas propriedades desses materiais poderia ocorrer a médio prazo, chegando por fim aos limites da eletrônica a nível molecular, apontada como o "grau último" da miniaturização de circuitos de processamento de informação. A viabilidade dessa revolução tecnológica depende de que, no futuro próximo, dispositivos eficientes e confiáveis à base desses materiais venham a ser produzidos a custos competitivos em relação às tecnologias estabelecidas.

5.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Cristais Líquidos

A.1 Breve Histórico

As pesquisas em cristais líquidos no Brasil têm sua primeira referência em 1939 com a vinda do Professor Hans Zöcher ao Departamento Nacional de Produção Mineral do Rio de Janeiro. Ministrou aulas sobre coloides na Escola Nacional de Química e na Faculdade Nacional de Filosofia. Essa linha, no entanto, não teve continuidade. Em 1968 as pesquisas em cristais líquidos são efetivamente lançadas quando o Professor Loenard W. Reeves, da Universidade de Waterloo - Canadá, estabelece uma colaboração permanente com o Instituto de Química da USP (IQUSP) na linha de cristais líquidos liotrópicos. Surge então o grupo de RMN do IQUSP, liderado por J.A. Vanin.

Em 1971, no Departamento de Física da UFSC-Florianópolis é implantada a linha de pesquisa em cristais líquidos termotrópicos, com a vinda dos EUA de J.D. Gault e T. Taylor.

Em 1974 a colaboração com o Professor Reeves se estende ao Instituto de Física da USP (IFUSP) através do projeto de L.Q. Amaral.

Em 1986 é implantada a primeira linha aplicada, focalizada na confecção de mostradores de cristal líquido por A.P. Mammanna, no Centro Tecnológico de Informática - Instituto de Microeletrônica em Campinas - SP.

Na década de 80 dá-se a implantação de novos grupos de pesquisa com projetos de cooperação com o "Laboratoire de Physique des Solides" - Orsay (França), o Grupo de Óptica de Cristais Líquidos do IFUSP (1985) com A.M. Figueiredo Neto e o Grupo de Óptica e Espalhamento de Luz - Cristais Líquidos (1986), com M.B. Lacerda Santos.

A.2 - Situação Atual

Até o final de 1988 tínhamos 24 pesquisadores trabalhando na área de cristais líquidos, sendo 6 mestres e 18 doutores (três deles com formação em físico-química). O pessoal envolvido, incluindo apenas os estudantes em programas de mestrado e doutorado, é da ordem de 50 pessoas. Foram formados cerca de 56 mestres e 7 doutores.

As principais técnicas experimentais de medida e caracterização utilizadas são a microscopia óptica de luz polarizada, a difração de raios-X, a ressonância magnética nuclear e o espalhamento quase-elástico de luz.

No tocante às principais linhas de pesquisa atualmente existentes no Brasil temos o estudo de *propriedades ópticas e magnéticas de cristais líquidos liotrópicos* e estudo da estrutura e ordem local também dos liotrópicos. Os únicos laboratórios que atualmente investigam as propriedades físico-químicas dos termotrópicos são o da UFSC e o do IFUSP (GOCL).

A quase totalidade dos grupos tem privilegiado o aspecto experimental da pesquisa em cristais líquidos em especial os cristais líquidos liotrópicos.

Nesta área há um forte desequilíbrio entre o trabalho teórico e experimental: apenas 1 dos doutores é essencialmente teórico.

Entre os principais resultados obtidos no País em termos de pesquisa básica podemos citar as contribuições ao estabelecimento das propriedades magneto-ópticas dos liotrópicos e o desenvolvimento de novos cristais líquidos pelo grupo do IQUSP e os estudos da estrutura e ordem local dos liotrópicos pelos grupos do IFUSP.

Apesar dessa área possuir uma importante característica de área aplicada, a interação com empresas é praticamente inexistente. O grupo do CTI/IM assume hoje no Brasil um importante papel no sentido de superar tal situação. Visando dar suporte ao parque industrial que aqui vai se instalar, foi proposto um programa de pesquisa e desenvolvimento em tecnologia de mostradores, o qual conta com a colaboração de instituições de pesquisa e ensino e empresas interessadas na área. São resultados importantes a nível de laboratório:

1. Processos de obtenção de mostradores nemático-torcidos, a partir do vidro comum, estáticos e multiplexados e de dispositivos de filmes finos para matrizes ativas de acionamento de painéis de grande área e alta complexidade.
2. Processos de fabricação e técnicas de automação da produção em células flexíveis de manufatura (IA/CTI) auxiliada por computador e confecção automática de máscaras.
3. Implantação de uma linha piloto de fabricação para protótipagem rápida.

Em termos de investimento, o total instalado no Brasil (executando-se salários, bolsas, material de consumo e manutenção) é da ordem de US\$ 1.000.000,00 (um milhão de dólares).

Comparando a situação atual brasileira com a dos grandes centros de pesquisa notamos um novo desequilíbrio: nesses centros a pesquisa com cristais líquidos termotrópicos é altamente privilegiada em relação aos liotrópicos. Esse fato se deve às inúmeras aplicações tecnológicas dos termotrópicos. Os grandes laboratórios na Exterior, como o "Laboratoire de Physique des Solides" e o "Liquid Crystal Institute" têm uma interação bastante frutífera com a indústria local de modo que muitos temas de teses versam sobre problemas de grande interesse não só à Física (e físico-química) básica como também às aplicações tecnológicas. Por outro lado torna-se cada vez mais patente que as grandes empresas do ramo estão investindo maciçamente em estruturar seus próprios laboratórios de pesquisa (como nos EUA, Japão e Alemanha).

B. Polímeros

B.1 Breve histórico

No Brasil, a maior atividade na área de polímeros esteve tradicionalmente associada a grupos de química. Dentre esses merece destaque o Instituto de Macromoléculas da UFRJ que têm uma longa tradição de interação com a indústria química nacional. Mais recentemente, o grupo do Prof. Fernando Gallemebeck no Instituto de Química da UNICAMP teve um papel importante na formação de pesquisadores com interesse nas propriedades físico-químicas de polímeros; nesse grupo foram pela primeira vez observadas interessantes propriedades de permeabilidade em membranas poliméricas.

São poucos os exemplos de grupos de Física brasileiros com interesse pelo estudo das propriedades físicas de polímeros convencionais. O Grupo de Eletretos do Instituto de Física e Química da USP-São Carlos, por exemplo, evoluiu naturalmente seu interesse por polímeros dentro de um programa de caracterização elétrica de materiais, enquanto que uma das recentes linhas de trabalho do Grupo de Implantação Iônica do Instituto de Física da UFRGS tem sido o da modificação da resistência térmica de resinas poliméricas fotosensíveis pelo bombardeamento de íons.

A descoberta dos polímeros não-convencionais modificou esse panorama ao trazer a Física para a fronteira do desenvolvimento desses materiais. Em 1981, no Departamento de Física da UFPE foi iniciada uma linha de trabalho teórica voltada para o estudo da estrutura eletrônica de polímeros condutores: como consequência de uma política de formação e contratação de pessoal com horizonte de médio prazo, esse esforço evoluiu para a criação do Grupo de Polímeros Não-Convencionais que têm hoje linhas de trabalho teóricas e experimentais na preparação, caracterização e investigação das propriedades ópticas e de transporte de polímeros.

B.2 Situação Atual

O fato de que diferentes técnicas teóricas e experimentais podem ser aplicadas ao estudo da física de polímeros faz com que não apenas pesquisadores isolados como também grupos de pesquisa tenham hoje interesse nas propriedades mecânicas, físicas e ambientais desses materiais. Linhas de trabalho teóricas voltadas ao estudo das propriedades eletrônicas, estruturais e ópticas de materiais poliméricos existem hoje, dentre outras instituições, nos Institutos de Física da USP e da UNICAMP, na PUC-RJ, na UFPE e na UFRN. De um modo geral, porém, há no País necessidade de um maior desenvolvimento da *investigação experimental de polímeros*.

Um problema maior enfrentado pelos grupos experimentais da área, e para o qual diferentes encaminhamentos tem sido dados, reside na dificuldade de preparação de amostras. Pela pouca estabilidade ambiental da maioria dos polímeros de interesse, há a necessidade de produção local de amostras com bom grau de reprodutibilidade. A associação entre grupos de física e de química, além de pesquisadores na área de ciência e engenharia de materiais, naturalmente encontrada em laboratórios industriais ou instituições acadêmicas estrangeiras, é ainda no Brasil a exceção.

Dentre os grupos de Química com interesse na área, destaca-se o do Prof. Marco Aurélio de Paoli (Departamento de Química/UNICAMP) que lidera um grupo voltado à síntese eletroquímica de polímeros condutores e ao estudo das haterias plásticas. Já no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCAR há um grupo de 09 doutores com formação na área de polímeros.

O Grupo de Polímeros Não-Convencionais do DF-UFPE, além da continuação de seus trabalhos teóricos na área da estrutura eletrônica e propriedades ópticas de polímeros, iniciou em 1987 um esforço na preparação de polímeros condutores (inicialmente polianilina e polipirrol) por via eletroquímica, no estudo de suas propriedades ópticas não-lineares e de transporte (com interesse especial pela determinação do fator de anisotropia na condutividade de filmes de poliméricos e em medidas do coeficiente Hall, pelo que podem revelar sobre o mecanismo de condutividade nesses materiais). Junções polímero-metal e determinação dos parâmetros básicos de operação de baterias poliméricas completam as linhas de trabalho iniciais do grupo. Com a chegada de um equipamento tipo Langmuir-Blodgett prevista para o segundo semestre de 1989, o Grupo dará início a uma nova linha voltada à

preparação, caracterização e estudo teórico e experimental das propriedades ópticas de multicamadas poliméricas.

Já o Grupo de Eletretos do IFQUSC-USP, além da continuidade de seus trabalhos na caracterização elétrica de polímeros deverá iniciar em 1989 a preparação de filmes orientados de poliacetileno. Para os próximos anos está previsto o início de uma nova linha de trabalho dedicada à preparação de filmes de Langmuir-Blodgett.

B.3 Carências e Dificuldades

No momento apenas dois grupos brasileiros (UFPE e IFQUSP-São Carlos) se identificam como dedicados ao estudo de polímeros. Considerando o crescimento explosivo a nível internacional da área de polímeros especiais, em anos recentes surge de modo claro a necessidade urgente de aumentar de maneira substancial o número de doutores em atividade no Brasil, através de um coerente e regular programa de incentivo à formação de pessoal qualificado na área.

Por outro lado, a implantação de uma área nova como a de polímeros não-convencionais, que requer investimentos em equipamentos de síntese e caracterização, tem sofrido os efeitos da crise financeira por que atravessa o País na década de 80. Dificuldades na importação de equipamentos, reagentes e material de consumo em geral têm retardado o desenvolvimento dos trabalhos de consolidação dos grupos envolvidos.

Por fim, restrições financeiras também têm um impacto negativo importante ao dificultar o intercâmbio de pesquisadores, seja pela limitação ou proibição de viagens ao Exterior (mesmo em casos de apresentação de trabalhos em congressos), seja pela falta de recursos para trazer visitantes internacionais pra estadias de curto ou longo período.

Estas dificuldades comuns a todas as áreas de pesquisa básica ou aplicada adquirem caráter mais perverso em se tratando de áreas de implantação, em que a massa crítica de pesquisadores nacionais não foi ainda atingida.

5.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Cristais Líquidos

A.1 Planos dos Grupos (Próximos 5 anos)

Nas novas linhas de trabalho com perspectiva de serem implantadas há ainda a tendência dos grupos em manter a ênfase no estudo de cristais líquidos liotrópicos, com algumas poucas exceções que

objetivam uma ampliação de seu universo de pesquisa. O investimento (excetuando salários e bolsas) é relativamente modesto, da ordem de US\$ 1.000.000,00 (um milhão de dólares).

Com relação às aplicações tecnológicas, o grupo do CTI/IM prevê a confecção de painéis de LCD de grande área, mostradores coloridos e TV a cristal líquido, além dos mostradores estáticos e multiplexado. Os mostradores supertorcidos e duplamente torcidos devem ser investigados em futuro imediato, pretendendo-se iniciar a investigação em ferroelétricos. O investimento estimado nesse projeto é de US\$ 800.000,00 (oitocentos mil dólares). O laboratório mantém projetos de cooperação com os Estados Unidos, Japão e Alemanha no desenvolvimento de técnicas de obtenção, caracterização e modelagem de dispositivos e de matrizes ativas para o acionamento de painéis de grande área, nas tecnologias de Cd Se e de Si-a.

Um aspecto fundamental quanto a novas técnicas de pesquisa em cristais líquidos é a possibilidade de se efetuar estudos utilizando-se técnicas de radiocristalografia com radiação sincrotrônica. Muitos dos grupos possuem hoje projetos de cooperação bilateral com a França e EUA para a realização de experiências utilizando radiação sincrotrônica.

A.2 Recursos Humanos (RH) (próximos 5 anos)

Em termos de RH, os grupos apresentam um potencial de formação de 54 mestres e 33 doutores sendo que em termos de expansão dos grupos prevê-se em condições ideais a absorção de 12 mestres e 18 doutores. Dessa forma, no final de 1993 contaríamos com um contingente de 58 doutores na área.

A.3 Investimentos Necessários (próximos 5 anos)

Levando-se em conta o total estimado de investimentos (de equipamentos) necessários para levar a cabo os projetos dos grupos, da ordem de US\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de dólares) e o número de doutores (média no período estimada em 25 doutores) temos um investimento da ordem de US\$ 20.000,00 (vinte mil dólares) por doutor/ano. Esses números devem ser analisados com bastante cautela pois pode existir uma grande discrepância entre a presença de RH em um determinado grupo e o investimento referente a esse grupo.

Sem a menor sombra de dúvida o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron se constitui no mais importante investimento enquanto grandes equipamentos, para explorar o potencial da área, tanto no tocante às pesquisas básicas quanto às aplicadas. É importante salientar que esse tipo de projeto, um laboratório nacional, não seja realizado às custas dos demais investimentos menores, fundamentais à consolidação e sobrevivência dos atuais grupos de pesquisa.

O domínio da tecnologia de fabricação de mostradores de Cristais Líquidos depende de investimentos em materiais, equipamentos e em Recursos Humanos que permitam manter núcleos de excelência em pesquisa, desenvolvimento e formação de recursos humanos. Estes núcleos devem estar integrados de forma a dar suporte a curto, médio e longo prazos à indústria nascente na área, garantindo-lhe competitividade e capacidade de inovação. As dificuldades enfrentadas em países em desenvolvimento implicam em esforços enormes junto a indústria local que permitam criar fornecedores de insumos e matérias para o futuro parque industrial desses dispositivos.

A.4 Projeções e Recomendações para a Próxima Década

Levando-se em conta o panorama da área no mundo notamos o crescente interesse pela investigação científica dos cristais líquidos termotrópicos, em especial aqueles com aplicações tecnológicas já existentes ou em fase de desenvolvimento. Esse interesse envolve, tanto aspectos de física (e físico-química) básica, quanto de natureza tecnológica. Na última Conferência Internacional de Cristais Líquidos em Freiburg (RFA) em 1988, a ênfase na investigação de termotrópicos representou cerca de 85% das comunicações apresentadas.

Dentre as linhas de pesquisa com maior potencialidade e ainda pouco exploradas no Brasil podemos citar os estudos de superfície e interfaces, instabilidades, defeitos e o estudo de cristais líquidos colestéricos e os ferroelétricos. Estes últimos, além de apresentarem propriedades eletro-ópticas bastante interessantes estão despontando como excelentes para a confecção de LCD's. Além desses materiais, a área de cristais líquidos poliméricos também abre uma boa perspectiva de pesquisa básica e aplicada.

A física dos cristais líquidos é uma área que possui uma grande interface com a química. Tanto no Brasil quanto no Exterior o surgimento de grupos que estudam cristais líquidos têm, de alguma forma, uma ligação com grupos de químicos que também se dedicam ao estudo desses materiais. A experiência internacional nos mostra que esses vínculos devem obrigatoriamente ser estreitados. Em particular a síntese de novos (e mesmo os convencionais) cristais líquidos é um ponto de estrangulamento no Brasil. Torna-se, portanto, fundamental o apoio institucional à consolidação de novos grupos dedicados em especial à "engenharia molecular" para a síntese de novos materiais.

O contato internacional nos parece também fundamental ser incentivado, não apenas com a presença de pesquisadores brasileiros nas diferentes conferências internacionais mas, em especial, estabelecendo projetos de cooperação bilateral que possibilitem tanto a estadia mais duradoura de pesquisadores estrangeiros no Brasil, quanto de brasileiros em centros de excelência no Exterior.

As interações dentro do Brasil deveriam também ser incentivadas. Dessa forma poderiam surgir projetos que envolvessem de forma complementar diversos laboratórios com diferentes técnicas de medida.

Muito embora os números de doutores teóricos e experimentais na área evidenciem um desequilíbrio em favor dos experimentais, é importante salientar que as perspectivas futuras da área devem estar alicerçadas em um forte contingente de físicos (e químicos) experimentais. Esse fato, no entanto, não exclui a necessidade de se dispor de um número suficiente de físicos teóricos doutorados na área.

Dentro dessa perspectiva de pesquisas, seria viável no final de 1999 atingirmos a cifra de 100 doutores ativos na área. Considerando-se um investimento (excetuando-se salários e bolsas) médio de US\$ 20.000,00 (vinte mil dólares) por doutor/ano e um número médio de 65 doutores no segundo quinquênio da próxima década, o investimento total (em equipamentos) no período de 1989 a 1999 seria da ordem de US\$ 15.000.000,00 (quinze milhões de dólares). Levando-se em conta as necessidades de material de consumo e serviços, esse montante deveria ser acrescido de 70% do seu valor.

Do ponto de vista tecnológico, o interesse na criação de um parque nacional para fabricação de mostradores, aponta para a necessidade de uma maior integração de esforços a nível nacional abrangendo a pesquisa, o desenvolvimento e a fabricação propriamente dita.

Neste sentido faz-se necessário um programa integrado de P&D envolvendo as Universidades e os Centros de Pesquisa e Desenvolvimento, os quais deverão trabalhar em estreito contato com as empresas interessadas na área bem como com indústrias que potencialmente poderão se converter em futuros fornecedores de materiais, insumos e equipamentos para esse parque industrial.

A formação de recursos humanos em todos os níveis abrangendo desde o nível técnico médio, até o nível de pós-graduação, em diferentes áreas do conhecimento (física, química, engenharias, computação, etc) é um ponto importante para a capacitação nacional na área, envolvendo um volume substancial de recursos.

Recomendações específicas:

- intensificar o contato entre os diferentes grupos de físicos e químicos do Brasil talvez estabelecendo-se um programa institucional de síntese e caracterização de cristais líquidos. Esses resultados poderiam ser utilizados tanto no desenvolvimento da pesquisa básica quanto das aplicações tecnológicas. Poderiam, por exemplo, ser constituídos agrupamentos de laboratórios associados ao CNPq;
- intensificar o contato com a comunidade internacional trazendo especialistas do Exterior para participar de projetos de pesquisa em andamento no País;
- criar mecanismos que facilitem a importação de equipamentos e material de consumo, por parte das Universidades e entidades de financiamento à pesquisa;

- criação de um laboratório nacional que se ocupasse da síntese de moléculas para os diferentes grupos de pesquisa. Esse fato não exclui a necessidade de pequenos laboratórios de química por grupo, úteis nas sínteses já bem estabelecidas e mais simples;

- buscar meios de incentivar o contato entre o meio universitário e o empresarial;

-estabelecimento de um programa de doutoramento no Exterior.

B. Polímeros

B.1 Planos dos Grupos (próximos 5 anos)

Sendo a área de polímeros relativamente nova na física brasileira, os planos básicos dos grupos e pesquisadores se voltam para a consolidação de suas atividades. Em particular, para as linhas de trabalho experimentais há todo um programa de construção e importação de equipamentos destinados à preparação e caracterização de materiais que precisa ser assegurado.

Polímeros condutores e polímeros piezoelétricos são materiais de interesse. Linhas de pesquisa que estão em processo de implantação se referem às medidas de transporte (essenciais para o entendimento dos mecanismos de condutividade orgânica) e determinação de propriedades ópticas.

Uma linha de preparação de materiais em implantação na UFPE e planejada para o IFQSC-USP/ São Carlos é a da obtenção dos filmes de Langmuir-Blodgett. Pelas grandes possibilidades em física básica e aplicada que esses filmes orientados oferecem, essa linha de trabalho pode ter um impacto significativo sobre a área de materiais no Brasil na próxima década; o transbordamento para outras áreas será natural já que o uso de moléculas anfífilas é de importância, por exemplo, na preparação de cristais líquidos liotrópicos e na física de proteínas.

Linhas de trabalho aplicadas contempladas para os próximos cinco anos envolvem o estudo de junções polímero-metal, baterias, e materiais eletrocromicos. A viabilidade da implantação e/ou extensão dessas diversas linhas de trabalho repousará naturalmente na dependência de serem assegurados a formação de pesquisadores qualificados em número suficiente e o financiamento de suas atividades a níveis compatíveis com os planos elaborados.

B.2 Recursos Humanos

Mesmo se considerarmos os grupos que tem atividade apenas subsidiária na área de polímeros e também aqueles pesquisadores isolados com interesse em aspectos específicos da física de polímeros

(como, por exemplo, polímeros condutores como realização física de modelos de teoria de campo) fica claro o pequeno tamanho da comunidade de físicos brasileiros dedicados ao estudo desses materiais.

A importância crescente da física de polímeros a nível mundial torna desejável um programa nacional diferenciado de investimento na formação de recursos humanos na área. Com isso, poderíamos extrapolar a mera capacidade reprodutiva dos grupos já estabelecidos e melhorar tanto a competitividade quanto a capacidade da comunidade de físicos brasileiros em acompanhar os desenvolvimentos mais recentes na área básica e aplicada.

De fundamental importância para assegurar o desenvolvimento harmonioso da área seria garantir aos pesquisadores recém-formados, seja no País ou no Exterior, a possibilidade de implantação de seus laboratórios quando de seu retorno ou fixação em uma nova instituição; de outro modo, o investimento realizado na formação do pesquisador correria o risco de ser desperdiçado.

B.3 Investimentos Necessários

Os grupos estabelecidos listam necessidades da ordem de US\$ 1.000.000,00 (um milhão de dólares) para os próximos 5 anos. Esses recursos seriam basicamente destinados à infraestrutura de laboratórios e aquisição de equipamentos de preparação e caracterização.

Sendo alguns desses equipamentos de caracterização de uso comum para a investigação de outros tipos de materiais, aparece como uma recomendação natural estimular, sempre que possível, o trabalho na área de polímeros em centros ou laboratórios onde existam outros grupos com interesse na área de materiais: desse modo equipamentos e técnicas de caracterização (como por exemplo, microscopia eletrônica) poderiam ser compartilhados. Há propostas de criação de um programa de pós-graduação na área de materiais em São Carlos, e de um laboratório de materiais avançados no Recife.

Para os cinco anos seguintes, considerando-se uma demanda média de US\$ 20.000,00 (vinte mil dólares) por doutor/ano, a área necessitaria de um investimento em equipamentos da ordem de US\$ 6.000.000,00 (seis milhões de dólares). Levando-se em conta as necessidades de material de consumo e serviços, esse montante deverá ser acrescido em 70% de seu valor.

B.4 Projetos e Recomendações para a Próxima Década

A área de polímeros não convencionais tem experimentado crescimento explosivo em termos mundiais na última década. Praticamente desconhecidos há cerca de 15 anos, esses polímeros encontram agora aplicação comercial em baterias de baixo peso e alta densidade de energia acumulada, em dispositivos de blindagem de radiação, sensores de alta especificidade para produtos químicos e na substituição de metais em aplicações especializadas.

A possibilidade de respostas ópticas de alta intensidade em tempos ultra-curtos faz antever o uso de polímeros orgânicos em dispositivos de memória óptica e em sensores de radiação eletromagnética. Existe a possibilidade concreta de que uma revolução tecnológica importante com base nesses materiais venha a ocorrer nas próximas décadas. Se um sensato programa de financiamento e formação de recursos humanos nessa área ocorrer no Brasil, pesquisadores brasileiros poderão acompanhar essa evolução mantendo um bom nível de competitividade a nível internacional.

Recomendações Específicas:

- viabilizar a interação regular entre diferentes grupos de pesquisas dedicados ao estudo da física de polímeros de modo a permitir a definição consensual de um programa de desenvolvimento da área no Brasil.
- estabelecer um programa específico de formação de recursos humanos na área de polímeros, de modo a aumentar substancialmente dentro dos próximos dez anos o número de pesquisadores e grupos nacionais trabalhando na área.
- estabelecer uma política de financiamento que permita a consolidação dos grupos já em atividades na área e criação de mecanismos que permitam a pesquisadores recém-formados a instalação de seus laboratórios quando de seu retorno ou fixação em novas instituições.
- na medida do possível, estimular o desenvolvimento de centros integrados de pesquisa na área de materiais de modo a permitir o uso compartilhado de equipamentos e infra-estrutura de laboratórios.

Recomendações de Caráter Geral

- agilizar os procedimentos de importação de equipamentos e material de consumo por parte de pesquisadores com projetos de pesquisa já aprovados por órgãos de financiamento.
- eliminar restrições a saídas para o Exterior de pesquisadores e viabilizar a vinda de visitantes de curto e longo período de modo a permitir a intensificação de contato com a comunidade científica internacional.

TABELAS

5.1 Pessoal Científico e Produtividade

5.2 Linhas de Pesquisa e Técnicas mais Relevantes

5.3 Perspectiva para os Próximos 5 anos - Recursos Humanos

5.4 Perspectiva para os Próximos 5 Anos - Novas Linhas de Trabalho e Novas Técnicas

5.5 Perspectivas Futuras (Próximos 10 anos)

5.6 Dificuldades e Carências

TABELA 3.1
PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOUTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO		
	T	E	T	E	IC	M	D	M	D	78-82	83-87	88-89
UFPE Grupo de Polímeros Não Convencionais	1	1	-	-	12	1	-	1	1	1	12	5
UPRG Grupo Fenômenos não Lineares em Cristais Líquidos	-	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-
UnB Grupo de Espalhamento de Luz em Cristais Líquidos	-	1	-	-	1	1	-	-	-	1	5	-
IFUSP Grupo de Óptica de Cristais Líquidos Lab. de Cristalografia -Difração de Raios-X	-	1	-	-	5	2	3	-	-	-	15	3
				(*)								
IQUSP Cristais Líquidos- Química	-	2	-	-	1	-	2	3	5	20	7	1
IFQSC/USP Grupo de de Eletretos e Polímeros	2	3	-	1	6	8	6	21	6	-	25	8
CTI/A Lab. de Mostradores de Cristal Líquido	-	1	-	1	11	13	1	5	2	-	9	3
UERJ Cristais Líquidos	1	-	-	2	-	-	-	-	-	-	3	-
UFSC Cristais Líquidos e Cristalografia	-	7	-	2	-	-	-	34	-	-	32	4
UPROS Físico-Química de Superfície-Química	-	1	-	1	1	5	1	14	-	22	15	3

* Os dados se encontram na sub-área Cristalografia

TABELA 5.2
LINHAS DE PESQUISA E TÉCNICAS MAIS RELEVANTES

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFPE Grupo de Polímeros Não-Convencionais	1981	Estrutura Eletrônica de Polímeros	Medidas de resistividade	100.000
		Propriedades Ópticas de Polímeros	Síntese eletroquímica de Polímeros condutores	
		Propriedades de Transporte de Polímeros Condutores	Efeito Hall	
		Junções e Baterias	Preparação de Filmes de Langmuir Blodgett (em implantação)	
UFMG Fenômenos não Lineares em Cristais Líquidos (Laboratório de Óptica)	1986	Dinâmica de transições de fase em cristais líquidos (até 88) 54.70.Hd	Espalhamento quase-elástico de luz; correlação de fótons	
		Interface de crescimento nemático isotrópico 61.30.-v	Birefringência	
		61.30.By	Espalhamento Raman	
		Instrumentação (até 89) 06.90.-v	Dissimetria	
IFUSP Grupo de óptica de Cristais Líquidos	1985	Medidas de constantes elásticas e susceptibilidade diamagnética 61.30.Cd	Microscopia óptica de luz polarizada	100.000
		Medidas de parâmetros ópticos 64.70.Jd	Conoscopia Laser	
		Medidas de densidade 61.30.-v	Difração de raios X com fontes microtrônicas e convencionais	
		Ancoramento e hidrodinâmica de cristais líquidos 68.45.-v/68.10.-Ls		
		Estudo de ordem local e estrutura microscópica de cristais líquidos 61.30.Eb/61.10.-1		
		Estudo de cristais líquidos dopados com ferrofluidos 75.50.En		

TABELA 5.2
PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IFUSP Lab. Cristalografia - Difração de Raios-X	(*)			
IQUSP Cristais Líquidos - Química	1968	Estrutura de moléculas e íons orientados 76.60.-f Solubilização 61.30.-v Anfifílicos deutérios 76.60.-k Propriedades ópticas e magné- ticas de cristais líquidos 61.30.-d	Ressonância magnética Microscopia óptica de luz polarizada	200.000
IFQSC/USP Grupo de Eletretos e Polímeros	1970	Transporte de Carga de Polímeros Condutividade Induzida por Radiação Resposta Linear e Polarização Descarga Corona Polímeros Piezoelétricos	Accelerador de elétrons 25kV Medidas Eletrostáticas Correntes termo-estimuladas Crescimento de cristais orgânicos	
UnB	1989	Dinâmica de transição de fase em cristais líquidos (Linha iniciada na UFPA)	Correlação de Fótons (lenta)	40.000

TABELA 5.2
LINHAS DE PESQUISA E TÉCNICAS MAIS RELEVANTES

(Continuação)

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
CTI/15 Lab. de Mostradores de Cristal Líquido	1982	Processos físico-químicos de confecção de mostradores de cristais líquidos 61.30.-v	Obtenção de filmes finos Fotolitografia de alta resolução por via úmida e por plasma	
		Acionamento direto e multiplexado 61.30.-v	Técnicas de confecção de células	
		Caracterização dos mostradores 61.30.-v	Técnicas de acionamento elétrico	150.000
		Dispositivos de filmes finos 68.15.-w	Técnicas de caracterização óptica e elétrica	
		Processos de produção e autoação	Técnicas de microanálise química	
		Desenvolvimento de instrumentação e de equipamentos para caracteri- zação e fabricação	Técnicas de caracterização estrutu- (difração de RX)	
UER Cristais Líquidos	1988	Transições de fase 64.70.-R1	Microscopia óptica	10.000
UFSC Cristais Líquidos e Cristalografia	1972	Estudo de cristais líquidos lió- trópicos, termotrópicos e cris- talografia 61.30.-v	Microscopia óptica de luz polarizada Calorimetria	250.000
		61.10.-r1	Difração de raios-X	
			Técnicas ópticas	
UFRGS Físico-Química de Superfície-Química	1980	Estudo de micelas e cristais lí- quidos. Teórico e Experimental 61.30.-v	Tensiosmetria Viscosimetria Espectroscopia UV - visível	30.000

TABELA 3.3
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 3 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	R	D	R	D	R	D	R	D
UFPE Grupo de Polímeros Não-Convencionais	6	3	12	6	-	1	-	3
UFEC Fenômenos não Lineares em Cristais Líquidos	-	1	1	1	-	1	-	-
UnB Grupo de Espalhamento de Luz em Cristais Líquidos	1	-	2	1	-	-	-	1
IFUSP Grupo de Óptica de Cristais Líquidos	4	3	6	4	-	1	-	2
Lab. de Cristalografia Difração de Raios-X	(*)							
IQUSP Cristais Líquidos - Química	2	2	4	4	-	-	-	2
IFQSC/USP Grupo de Eletretos e Polímeros	-	-	-	-	-	1	-	-
CTI/IN Lab. de Mostradores de Cristais Líquidos	15	2	25	10	3	1	10	5
UEM Cristais Líquidos	2	1	1	3	1	2	-	2
UFSC Cristais Líquidos e Cristalografia	10	-	10	5	-	3	-	3
UFRGS Físico-Química de Superfície - Química	5	2	5	5	2	1	2	3

TABELA 3.4
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 3 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
UFPE Grupo de Polímeros Não-Convencionais	Fibras de Langmuir-Blochett ótica Não Linear de Polímeros Dispositivos Eletro-ópticos Baterias	Espectroscopia de infra-vermelho Elipsometria Preparação de Junções MS	600.000
DFEG Fenômenos não Lineares em Cristais Líquidos	Condições Atuais (CA) 61.30.0y Cálculo de energia de interface 68.15.+e Condições Ideais (CI) 78.35.+c 64.70.Ja.	Condições Atuais (CA) Técnicas Condições Ideais (CI) Microscopia óptica Processamento de Imagem	120.000
UnB Espelhamento de Luz em Cristais Líquidos	Soluções micelares, colóides, ferrofluídos	Correlação de Fótons (Rápida) Microscopia óptica	60.000
IFUSP Grupo de óptica de Cristais Líquidos	(CA) Ancoramento de cristais líquidos em superfícies tratadas 68.45.-v (CI) Estudo de cristais líquidos termó- trópicos e polímeros 61.30.-v Estudo de cristais líquidos ferro- elétricos 61.30.-v Estudo de ferrofluídos 75.50.Rn	(CA) Microscopia óptica com polarização micrométrica (CI) ótica não linear Difração de raios-X	50.000 150.000
Lab. de Cristalografia Difração de raios-X	(*)		

TABELA 5.4
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUICAO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TECNICAS	INVESTIMENTOS US\$
IQUSP Cristais Líquidos- Química	(CA)	(CA)	
	Medidas de densidade, viscosidade e tensão superficial de cristais líquidos 61.30.-v	Densitometria Viscosimetria Tensimetria superficial	
	(CI)	(CI)	
	Ressonância magnética nuclear	RMN de deutério	200.000
IQSCC/USP Grupo de Eletretos e Polímeros	Transporte e polarização em dielétricos Polímeros condutores Filmes de Langmuir-Blodgett	Medida de densidade de carga poro puzo de pressão	350.000

TABELA 5.4
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
CTI/IK Lab. de Rostradores de Cristal Líquido	(CA) Matrizes ativas de transistores de filmes finos 68.15.-v	Deposição de filmes finos: plasma CVD, foto CVD, sputtering RF, magnetron sputtering, evaporação térmica e por canhão, plasma assisted deposition, etc.	800.000
	painéis de LCD de grande área 61.30.-v	Fotolitografia seca (plasma etching)	
	Rostradores coloridos 61.30.-v	Caracterização de camadas: Auger, Esca, microsonda de elétrons, RBS, SIMS	
	(CI) Televisores a Cristal Líquido 61.30.-v	Caracterização dos displays: Cronômetros, mesas de posicionamento de precisão, câmaras com controle de temperatura, pressão e unidade para ensaios de vida	
	Síntese de cristais líquidos 61.30.-v	Modelagem dos transistores de filmes finos e simulação lógica e elétrica com computador	
		Modelagem do comportamento dinâmico dos cristais líquidos na célula; ângulo de inclinação e torção com a posição, para diferentes parâmetros constantes elásticas, viscosidade, tipo e tratamento da superfície de alinhamento, ângulo de ancoragem	
UFPA		Processos de produção: técnicas de automação CAM e CIM, célula flexível de manufatura, robotização dos pro- cessos.	2.000
UFSC			
Cristais Líquidos e Cristalografia			
UFRGS		(CI)	
Físico-Química de Superfície - Química		Espalhamento quase-elástico de luz	80.000

TABELA 5.5
PERSPECTIVAS FUTURAS (PROXIMOS 10 ANOS)

INSTITUIÇÃO GRUPO	SUGESTÕES/LINHAS DE PESQUISA
UFPR Fenômenos não Lineares em Cristais Líquidos	Ênfase na formação de recursos humanos, implantação de cursos de meios contínuos (mecânica clássica) e disciplina de pós-graduação. Exemplos: tópicos de matéria condensada voltados para a área (física dos cristais líquidos, hidrodinâmica).
IPUSP Grupo de óptica de cristais líquidos	Implantar as técnicas de investigação de encurvamento em superfícies Implantar estações de trabalho de óptica de cristais líquidos com controle de temperatura com $\Delta T = 0,001^{\circ}\text{C}$ Implantar técnicas de medidas magnéticas em cristais líquidos com campo presente Estudo de ferrofluidos Estudo de cristais líquidos ferroelétricos Seria necessário para a área a implantação de um grande laboratório de química (talvez nacional) para a síntese de moléculas.
Laboratório de Cristalografia-Difração de Raios-X	(*)
IQUSP Cristais Líquidos-Química	Estudo da natureza das forças intermoleculares em cristais líquidos colestéricos
CTI/IN Laboratório de Mostradores de Cristal Líquido	Novos mostradores com novas estruturas e novos materiais; processo de fabricação, automação de processos, robotização Novas alternativas para o acionamento elétrico Modelagem física e elétrica com recursos computacionais suportadas e DSTN, ferroelétricos.

TABELA 5.3
PERSPECTIVAS FUTURAS (PRÓXIMOS 10 ANOS)

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	SUGESTÕES/LINHAS DE PESQUISA
UFPA Cristais Líquidos	Consolidação da linha de pesquisa teórica e experimental
UFSC Cristais Líquidos e Cristalografia	--
UFRCX Física-Química de Superfícies - Química	Viabilizar o programa de doutorado em engenharia de materiais
UnB Espalhamento de Luz em Cristais Líquidos	No ensino: implantar disciplinas na Graduação de: Óptica Clássica e Mecânica dos Fluidos Na pesquisa: Estudos de sistemas isotrópicos por outras técnicas; Interação cristal-líquido/ferrofluido (visando Espalhamento de Luz)

TABELA 5.6
DIFICULDADES E CARENCIAS

INSTITUIÇÃO GRUPO	ATÉ AGORA	FUTURAS
UFRG Fundações não Lineares em Cristais Líquidos	.dificuldade de importação	.dificuldade de importação
UnB Espelhamento de Luz em Cristais Líquidos	.apoio técnico deficiente .recursos escassos	.apoio técnico deficiente
IFUSP Grupo de óptica de Cristais Líquidos	.dificuldade de importação de material .dificuldade na contratação de pessoal experimental (doutor)	.dificuldade de importação .dificuldade na contratação de pessoal .dificuldade na obtenção de moléculas (novos cristais líquidos)
Lab. de Cristalografia-Difração de raios-X	(*)	
IQUSP Cristais Líquidos-Química	.importação de materiais e re- agentes .acesso a equipamentos de RMN existentes .fixação de pessoal na Universi- dade	.disponibilidade de recursos .apoio institucional
CTI/USP Lab. de Mostradores de Cristal Líquidos	.aquisição de material (nacional e importado)	.recursos financeiros e espaço .dispor de um quadro técnico- científico permanente
VEN Cristais Líquidos	.aquisição de equipamentos .falta de pessoal qualificado	
UPSC Cristais Líquidos e Cristalografia	.importação de equipamentos	.aquisição de equipamentos
UPRGS Físico-química de superfícies- Química	.importação de equipamentos e reagentes	.disponibilidade de recursos para aquisição de equipamentos, reagentes e para manutenção

6. Cerâmicas Avançadas, Vidros e Cristais

6.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das civilizações tem sido, desde as eras mais remotas, limitado pela utilização de materiais então disponíveis. Não é por acaso que períodos de desenvolvimentos têm sido classificados como idade da pedra, idade do bronze e de idade do ferro. Sir George Thomson, Prêmio Nobel em 1937, em sua época afirmava que "o homem contemporâneo está entre a idade do ferro e a idade dos novos materiais".

Acreditamos que atualmente estamos na idade dos novos materiais, uma vez que estes constituem o fator limitante para o crescimento do desenvolvimento de nossa era. Metais como o titânio e o nióbio estão cada vez mais substituindo as ligas de ferro e competem com os compostos cerâmicos, plásticos e compósitos em diversas aplicações. A velocidade de inovação, é atualmente, tão rápida que torna-se errôneo afirmar que existe uma determinada idade. Entretanto, dependendo do ponto de vista e do interesse pessoal de cada autor tem-se ainda rotulado a era contemporânea como a idade atômica, eletrônica, do computador, etc... O desenvolvimento dessas novas áreas está, evidentemente, condicionado ao progresso na preparação de novos materiais, principalmente no que concerne a sua forma monocristalina.

O rápido desenvolvimento de novos materiais e a sua importância tecnológica levou a maioria das universidades e institutos de pesquisa à criação de uma nova área de conhecimento denominada "ciência dos materiais". Essa nova área congrega atualmente, em todo mundo, físicos, químicos, engenheiros e tecnólogos das mais diversas formações com o objetivo de se pesquisar novos materiais e aprimorar as propriedades dos materiais conhecidos cujos requisitos para novas aplicações tecnológicas são crescentes.

A grande maioria destes materiais são produzidos artificialmente em laboratórios em forma de cristais, cerâmicas, materiais amorfos e vidros. Os cristais têm geralmente uma aparência e forma externa regulares devido à repetição no espaço de "blocos de construção" idênticos. Nos casos mais simples (cristais de cobre, prata, etc.) estas unidades estruturais contêm um só átomo mas em geral estas estruturas podem conter mais átomos de diferentes elementos químicos (NaCl por exemplo) ou grupos de átomos idênticos (H₂ por exemplo). Por outro lado inúmeros materiais sólidos podem ser obtidos numa forma não cristalina ou amorfa congelando a desordem estrutural de uma fase líquida, aproveitando o caráter desordenado de uma fase gasosa ou desorganizando uma fase cristalina. Estes materiais conservam geralmente uma ordem a curta distância (6-8 Å) idêntica ou similar àquela das fases parentes cristalinas (por exemplo o tetraedro SiO₄ da sílica vítrea) mas que se arranjam numa rede espacial desordenada.

As cerâmicas e vidros tradicionais são materiais conhecidos pelo homem há milhares de anos. Entretanto, somente nas últimas décadas é que surgiram novas classes de materiais com propriedades físicas e químicas particularmente interessantes. Isto se deve à interação estreita existente entre as pesquisas científicas e as pesquisas tecnológicas que transformaram estes estudos em uma ciência de verdade. Todos os métodos da física e química estão sendo aplicados aos estudos das cerâmicas e vidros. Ao lado das aplicações clássicas que tornam estes materiais indispensáveis na economia moderna (construção, transporte, indústria química, eliminação, etc) nós assistimos à aparição de novas aplicações que aproveitam as suas propriedades elétricas, mecânicas, térmicas, ópticas e químicas, onde estes materiais trazem geralmente soluções originais.

A existência de uma grande quantidade de aplicações torna assim muito difícil a classificação e a definição destes materiais.

De acordo com a American Ceramic Society, cerâmicas são materiais inorgânicos, não metálicos, processados através de calor e/ou pressão. São materiais duros porém frágeis e têm um ponto de fusão muito alto. Desta forma a grande maioria desses materiais é produzido por sinterização de pó, ao invés de resfriamento de um líquido.

No Brasil, a Associação Brasileira de Cerâmica define materiais cerâmicos como todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, exceto os metais e suas ligas, que são utilizáveis geralmente submetendo-se a tratamento em temperaturas elevadas. Desta forma, sólidos não cristalinos, como os vidros, podem ser considerados como materiais cerâmicos.

Na classe de cerâmicas de alta tecnologia são considerados todos os materiais obtidos com matérias-primas puras, normalmente sintéticas e processadas em condições muito controladas a fim de fornecerem propriedades superiores. Exemplos de matérias-primas utilizadas em cerâmicas de alta tecnologia incluem: alumina, zircônia, carbeto de silício, nitrato de silício, titanatos de bário, estrôncio, chumbo, óxidos de zinco, titânio, estanho, etc.

Pelas suas condições especiais de processamento alguns materiais possuem definições próprias:

Muitos materiais amorfos são sólidos não cristalinos que apresentam o fenômeno de transição vítrea. Os vidros, em particular, são materiais amorfos obtidos da solidificação de um líquido (G.W. Morey, "The Properties of Glass", 2nd ed. p.28. Reinhold Publ. Co. New York, 1954). Estabeleceu-se a convenção de que os materiais com viscosidade de cisalhamento superior a $10^{14,6}$ poise são considerados sólidos. Esta marca divisória foi estabelecida arbitrariamente tomando-se por base a relaxação temporal de um dia (E.U. Cordon, Amer. J. Phys. 22, 43 (1984).

As vitro-cerâmicas são uma fase intermediária entre as definições acima mencionadas. Elas são obtidas através da cristalização controlada de certos vidros e são assim materiais inorgânicos policristalinos contendo uma fração minoritária de fase vítrea.

Uma maneira conveniente de classificar os materiais cerâmicos de alta tecnologia é considerá-los pelas funções que exercem, como a seguir:

CLASSIFICAÇÃO DE CERÂMICAS DE ALTA TECNOLOGIA

Materiais	Aplicações
Funções Elétricas	
1. Isolantes elétricos ($\text{Al}_2\text{O}_3, \text{BaO}, \text{MgO}$) 2. Ferroelétricos ($\text{BaTiO}_3, \text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) 3. Semicondutores incluindo termistores e eletrólitos sólidos ($\text{BaTiO}_3, \text{SiC}, \text{ZnO}, \text{SnO}_2, \text{V}_2\text{O}_5, \text{MoSi}_3$) 4. Varistores ($\text{ZnO}, \text{Bi}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{SiC}$) 5. Condutores iônicos ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3, \text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$) 6. Piezoelétricos (PZT, $\text{LiNbO}_3, \text{BaTiO}_3$)	substratos de circuitos integrados, substratos de interconexão eletrônica capacitores cerâmicos sensores de temperatura e calor, elementos de aquecimento, sensores de infra-vermelho, células solares eliminadores de ruído e sobretensão, para-raios medidores de pH, eletrólito sólido, sensores de O_2 e CO vibradores, osciladores, filtros, transdutores, geradores de faísca, umidificadores, ultra-sônicos, etc.
Funções Magnéticas	
1. Ferritas ($\text{Y} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{MnO}, \text{SrO}, \text{Fe}_2\text{O}_3$)	magnetos, cabeças magnéticas de gravação, memórias, fitas, núcleos de indutores e transformadores, dispositivos de microondas

FUNÇÕES ÓPTICAS

- | | |
|--|---|
| 1. Al_2O_3 translúcida | lâmpadas de vapor de sódio |
| 2. Magnésia e mulita translúcida | tubos de luz, transmissores de infravermelho, etc. |
| 3. Cerâmica ítria-tória | materiais para laser |
| 4. Titanato-zirconato de chumbo e lantânio | polarizadores, memórias ópticas, válvulas de luz, sistemas de memória e display |
-

FUNÇÕES QUÍMICAS

- | | |
|---|---|
| 1. Zircônia, alumina e sílica | reatores de alta temperatura |
| 2. Sensores de umidade ($TiO_2, Mg Cr_2O_4$) | elementos de controle de cozimento em forno de microondas |
| 3. Suporte de catalizadores (zeólitos, cordierita, alumina) | controle de combustão de veículos, suporte para enzimas |
| 4. Sensores de gases ($ZnO, Fe_2O_3ZrO_2, SnO_2$) | detectores de hidrocarbonetos, flúor carbonetos, vazamento de gases |
| 5. Eletrodos (titanatos, sulfetos, boratos) | processos fotoquímicos, produção de Cl_2 |
-

FUNÇÕES TÉRMICAS

- | | |
|--|--|
| 1. Zircônia, titânia, carbeto de alumínio, nitreto de alumínio | radiadores de infra-vermelho |
| 2. Alumina, sílon, nitreto de silício | refratários |
| 3. $TiAl_2ZrO_7$ | isolantes térmicos para fornos industriais |

FUNÇÕES MECÂNICAS E TERMODINÂMICAS

1. Ferramentas de corte (Al_2O_3 , TiC, TiN, ZrO_2 e WC)	ferramentas cerâmicas, tesouras, etc.
2. Materiais resistentes a desgastes (Al_2O_3 , ZrO_2)	selos mecânicos, esferas de rolina, guias-fio, sensores de pressão, etc.
3. Materiais resistentes ao calor (SiC, Al_2O_3 , Si_3N_4 , B_4C)	motores cerâmicos, lâminas de turbina, trocadores de calor, cadinhos, etc.

FUNÇÕES BIOLÓGICAS

1. Alumina, fosfatos, biovidro de hidroxiapatita	implantes, dentes artificiais, ossos articulações
--	---

FUNÇÕES NUCLEARES

1. UO_2 , UO_2PuO_2	combustíveis nucleares
2. SiC, C , B_4C , Al_2O_3	materiais para blindagem
3. H_2O	material moderador de nêutrons
4. C , SiC, B_4C	material para revestimento

de J.Varela, Brasil Ciência, Série 5, MCT - Brasília.

O mercado mundial de cerâmicas avançadas foi avaliado em US\$ 5,5 bilhões em 1985 em crescimento da ordem de 15 a 20% ao ano. A maior fatia do mercado é de cerâmicas eletrônicas (substratos para microeletrônica, capacitores cerâmicos, ferritas, etc.) Este grande mercado existente com um crescimento atrativo é uma das razões para o interesse intensivo nesses materiais.

O crescimento de cristais é uma área relativamente pequena, entretanto importante na ciência dos materiais. É mais difícil preparar um monocristal do que um material policristalino e esse esforço só se justifica se o monocristal apresentar vantagens relevantes para as aplicações tecnológicas. Essas vantagens dos monocristais estão principalmente relacionadas com a sua anisotropia, uniformidade na composição e ausência de contornos de grãos, presentes inevitavelmente nas formas policristalinas, que alteram muitas de suas propriedades físicas, como a sua absorção óptica ou espalhamento, aprisionamento de elétrons de condução, etc.. Os contornos de grãos também estão ausentes nos compostos amorfos como os vidros, mas a ausência de uma estrutura ordenada de longo alcance restringe suas aplicações tecnológicas. Desse modo, diversas aplicações tecnológicas só são possíveis com a utilização de monocristais e estes possuem fundamental importância para o entendimento e determinação das propriedades dos compostos.

A importância tecnológica dos monocristais está estreitamente relacionada com suas aplicações imediatas, tais como: circuitos integrados eletrônicos (Si;Ge;GaAs; etc.), circuitos integrados ópticos (LiNbO₃; etc.), memórias ópticas (LiNbO₃ : Fe), lasers de estado sólido (GaAs;Al₂O₃ : Cr;Y₃Al₅O₁₂ : Nd;YLiF₄ : Nd; etc.), defletores ópticos e guias de onda (LiNbO₃), detetores de radiação visível e UV (TGS;LiTaO₃;InSb;Hg_{1-x}Cd_xTe; etc.), detetores de radiação gama e X(Nal : Tl;Bi₄Ge₃O₁₂;BaF₂, etc.), dispositivos magnéticos (Y₃Fe₅O₁₂), supercondutores (Y-Ba-Cu-O;Bi-Sr-Ca-Cu-O, etc.) janelas para infravermelho (KCl;NaCl,KBr,KRS-5,etc.), ferramentas para corte e usinagem de refratários (diamante) e gemas (safira-Al₂O₃; rubi-Al₂O₃ : Cr; alexandrita-BeAl₂O₄ : Cr; esmeralda-Be₃Al₂(SiO₃)₆; topázio-Al₂(SiO₄); F ametista-SiO₂; etc.).

Para a grande maioria das aplicações tecnológicas são necessários monocristais homogêneos, de alta perfeição estrutural e baixa contaminação por impurezas incorporadas durante o processo de preparação. Esses requisitos mínimos, dificilmente são encontrados em monocristais naturais, onde o ambiente, a temperatura e outros importantes parâmetros do processo não são controlados. Dessa forma, a área de crescimento de cristais, é a responsável pela preparação de monocristais artificiais, onde os principais parâmetros envolvidos no processo são controlados. Portanto, a área de crescimento de cristais se reveste de uma enorme importância para o desenvolvimento científico-tecnológico em todos os setores onde a matéria está presente em seu estado sólido.

6.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

6.2.1 Vidros e Cerâmicas

É ainda pequeno o número de centros que dispõe de capacitação razoável para o desenvolvimento das cerâmicas avançadas e que possuem recursos humanos e laboratoriais em condições de desenvolver estudos para obtenção e caracterização de pós e o desenvolvimento de produtos de ponta. A quase totalidade destes centros necessitam de equipamentos mais adequados e raros são os projetos que cobrem desde a pesquisa até a fase piloto ou semi-industrial, uma vez que há pouca interação entre universidades e centros de P&D com o setor produtivo.

Num levantamento feito há dois anos e que inclui os grupos que fazem pesquisa e desenvolvimento na área de preparação de materiais em Departamentos de Física verificou-se que existem somente duas instituições que formam engenheiros de materiais com especialização em cerâmica em todo o País: o DEMA/UFSCar e a Universidade Federal da Paraíba. Em termos de pós-graduação apenas o DEMA/UFSCar oferece cursos regulares de mestrado e doutorado. Entretanto, em outros centros têm sido desenvolvidas teses de mestrado e doutorado na matéria ou temas correlatos como no IQ/UNESP, DEQ/EPUSP, IPEN, IFQSC/USP, ITA, UNICAMP, COPPE/UFRJ, PUC/RJ, DF/UFMG entre outros.

Além disto apenas oito instituições (universidades e centros de pesquisa) possuem capacitação e estão diretamente envolvidos com a caracterização, a preparação de pós e o processamento de cerâmicas avançadas como a UFSCar, IPEN, UNESP, CTA, IPT, INT, CETEC e IME. Nestes centros, 90 pesquisadores (30 PhD, 30 MSc e 30 MSc) estão diretamente envolvidos com pesquisas em cerâmicas avançadas, mas muitos deles também estão envolvidos com outras atividades como ensino e prestação de serviços.

Na área de preparação e caracterização de insumos cerâmicos avançados, outros 50 pesquisadores (15 PhD, 25 MSc) estão envolvidos em pesquisa em centros tais como CETEC, IFQSC/USP, FTI, EPUSP, DF/UFSCar, e outros 40 pesquisadores (10 PhD, 6 MSc) atuam na UNICAMP e no CETEC na área da tecnologia do quartzo. Mais 15 pesquisadores (5 PhD, 8 MSc) desenvolvem projetos em instituições como CPqD/TELEBRÁS, IPqM, INPe, CEPED e na Universidade Federal da Paraíba.

Entretanto, devido à importância que esses materiais vêm assumindo no cenário internacional (principalmente com a descoberta das cerâmicas supercondutoras) vários centros tradicionais de metalurgia, física e química ligados às universidades têm-se envolvido cada vez mais com as cerâmicas. Podemos assim estimar que hoje são cerca de 300 a 350 pesquisadores envolvidos em pesquisas na área de cerâmica avançada, quartzo e vidro nas instituições brasileiras. As tabelas 6.1 e 6.2 mostram alguns dados sobre os grupos de pesquisa em cerâmica e vidro em Departamentos de Física. Os grupos que usam técnicas de rotina para preparar materiais usados em seus programas de pesquisa ou que atuam em áreas específicas não estão incluídos nestas tabelas, mas foram relacionados nos Capítulos anteriores.

O número de empresas atuantes em cerâmicas avançadas é cerca de 25, sendo que entre estas, 10 são multinacionais, destacando-se que as empresas de tecnologia mais avançada são as multinacionais atuando principalmente em cerâmica eletrônica. Em geral o nível de tecnologia utilizado no País não é de ponta. As fibras ópticas provavelmente são a única exceção. Na realidade os produtos se enquadram mais na área de cerâmica técnica e todos foram desenvolvidos ou descobertos no exterior e apenas adaptados no País.

Entretanto, existe atualmente um movimento de diversificação ainda bastante lento, provavelmente em função de incertezas a nível da economia do país, insegurança quanto ao mercado potencial e falta de entrosamento entre ciência, tecnologia e setor industrial, carência de pessoal técnico e científico com formação adequada e desconhecimento dos empresários quanto as potencialidades das instituições de pesquisas e dos projetos em desenvolvimento.

Num recente relatório a Comissão de Cerâmica Avançada da Associação Brasileira de Cerâmica ressalta a falta de informações e de conscientização na formação dos técnicos de nível superior na área das ciências exatas em relação à área de cerâmica avançada. O Brasil se encontra hoje muito defasado e com poucas perspectivas a curto e médio prazos para atingir o estágio dos países mais desenvolvidos.

6.2.2 CRISTAIS

Nos últimos 15 anos Grupos de Crescimento de Cristais têm se dedicado à preparação de diversos materiais em sua forma monocristalina. Esta atividade tem permitido a pesquisadores brasileiros, de outras áreas de pesquisas, a publicação de vários trabalhos científicos, a formação de mão-de-obra especializada, a elaboração de teses e dissertações e o desenvolvimento de dispositivos onde os monocristais são utilizados como elementos ativos e passivos.

Devido à enorme importância que os monocristais óxidos e suas soluções sólidas, preparados pelo método de fusão, representam para a tecnologia nacional em aplicações como: laser, detectores, moduladores, filtros ópticos, óptica integrada, memórias ópticas, etc., grupos de pesquisas nacionais (IFQSC e UFMG) vêm se dedicando à preparação destes compostos, com ênfase nos niobatos e tantalatos de lítio e suas soluções sólidas. O sucesso obtido na preparação destes compostos na forma monocristalina tem motivado diversos grupos de pesquisas nacionais a desenvolverem importantes dispositivos ópticos, acústicos, térmicos e eletrônicos, nos quais os substratos são utilizados como elementos ativos.

Outro método rotineiramente utilizado no País para preparação de monocristais óxidos é o de solução em altas temperaturas - HTS. A principal vantagem deste método é que o crescimento do cristal ocorre a uma temperatura menor que a utilizada no método de fusão. Esta redução na temperatura é necessária sempre que o material a ser obtido em sua forma monocristalina apresentar fusão incongruente, transições de fase estruturais, altas pressões de vapor na temperatura de fusão e constituintes voláteis. Outra vantagem deste método está relacionada com o fato de que os cristais não são submetidos a fortes gradientes térmicos durante o processo de preparação, evitando o aparecimento de tensões térmicas e favorecendo o desenvolvimento de faces naturais. Esses fatos, combinados com a baixa temperatura de crescimento, oferece, como resultado, cristais de melhor qualidade com respeito a defeitos pontuais, densidade de deslocamentos e contornos de grão.

Atualmente grupos de crescimento de cristais nacionais (IFQSC, IPEN e IF-UNICMP) utilizam o método HTS para a preparação de monocristais supercondutores dos sistemas YBaCuO e BiSrCaCuO com relativo sucesso. Esses resultados, entretanto, são relevantes uma vez que os problemas de crescimento desses compostos em dimensões razoáveis e de alta perfeição estrutural ainda não estão resolvidos quanto à escolha conveniente do fluxo, da temperatura, da velocidade de crescimento e do processo químico de remoção dos monocristais.

Monocristais semicondutores de Silício estão sendo preparados de forma rotineira em São Paulo (IMEL-Poli, Heliodinâmica) e os compostos semicondutores do grupo III-V no IF-UNICAMP, na UFMG e no IFQSC (Laboratório em implantação). Entre estes compostos o GaAs é, atualmente, o material de maior uso em componentes que necessitam de alta velocidade e robustez. Na expectativa de um rápido crescimento no mercado de utilização desse material, proliferam, nos países desenvolvidos, indústrias voltadas para a preparação de monocristais e à industrialização de dispositivos baseados neste

composto. Em suas aplicações em "chips" lógicos e em dispositivos eletroópticos estima-se que o mercado americano em 1992 será da ordem de 2 bilhões de dólares (Eletró Óptics-may 1989-pg.35). No Brasil, desenvolvem-se atualmente diversos programas de crescimento epitaxial de GaAs por feixe molecular (MBE), como no DF/UFMG, em Belo Horizonte, na UNICAMP-CPQd e na USP-São Paulo, partindo de substratos importados, pois ainda não existe um programa nacional para preparação sistemática desses substratos.

Monocristais metálicos são atualmente preparados no País (IF-UFSCar) para estudos de suas propriedades magnéticas.

Monocristais de halogenetos alcalinos puros e dopados são preparados nos laboratórios nacionais (IFQSC, IPEN, IF-UNICAMP) devido à sua importância científica e tecnológica. A simplicidade estrutural desses compostos permite que pesquisadores e estudantes desenvolvam, com facilidade, modelos teóricos simplificados para o entendimento de seu comportamento físico e químico. Esse fato tem sido explorado, por estudantes de diversos centros de pesquisa brasileiros, na elaboração de dezenas de teses de mestrado e doutorado e em trabalhos científicos publicados em revistas internacionais nos últimos 15 anos. As aplicações tecnológicas destes compostos estão relacionadas com sua transmitância em uma larga região do espectro, onde são usados como janelas, e quando dopados, são potencialmente candidatos a aplicações em lasers sintonizáveis e comercialmente em detectores de raios X e Gama.

Dados sobre os grupos de pesquisas dos Departamentos de Física encontram-se nas tabelas 6.1 e 6.2. Nelas não estão incluídos os grupos que atuam nas áreas específicas (semicondutores, cristais magnéticos, cristais líquidos, polímeros, etc.) e que estão relacionados nos Capítulos anteriores.

6.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

6.3.1 Vidros e Cerâmicas

A comissão da ABC recomenda que seja criado um modelo para capacitação científica na área das cerâmicas de alta tecnologia que deve induzir à formação de uma base sólida em termos de recursos humanos e laboratoriais de qualidade. Por isso será imprescindível:

1. Integrar os projetos de pesquisas entre os centros de P&D de forma a cobrir todos os aspectos básicos essenciais;
2. Procurar equipar as instituições em equipamentos considerados básicos, além dos específicos nas respectivas áreas de competência. Os equipamentos de alto custo ou utilização esporádica poderiam ser distribuídos regionalmente (consórcio de equipamentos);

3. Adequar os currículos das universidades a nível de graduação e pós-graduação a uma realidade, a fim de fornecer pessoal para a pesquisa e desenvolvimento e para a indústria a fim de que esta possa absorver e desenvolver as tecnologias e o controle de qualidade;

4. Iniciar uma divulgação ampla usando a conscientização da importância das cerâmicas avançadas através de palestras, cursos, escolas, simpósios, etc.

As perspectivas dos grupos ligados a Departamentos de Física para os próximos 5 anos são mostradas nas tabelas 6.3 e 6.4.

6.3.2 CRESCIMENTO DE CRISTAIS

A preservação dos Grupos de Crescimento de Cristais nacionais e criação de facilidades para os seus desenvolvimentos, nos próximos anos, são fatores de fundamental importância para a pesquisa na área do estado sólido no País, pois estes constituem a principal fonte nacional de fornecimento de amostras monocristalinas para os pesquisadores brasileiros que atualmente as utilizam para as mais diversas aplicações científicas e tecnológicas. Os Grupos de Crescimento de Cristais, além disso, mantêm pesquisas dirigidas na preparação e caracterização de compostos monocristalinos através de convênios internacionais, oferecimento de cursos a nível de pós-graduação e desenvolvimento de teses de mestrado e doutorado para a formação de novos pesquisadores na área. Essa dinâmica adotada pelos Grupos faz com que a atividade de preparação de amostras, que é de fundamental importância para os pesquisadores brasileiros, não seja um fato isolado, integrando o estudo das propriedades e das aplicações tecnológicas às pesquisas na área de preparação e caracterização. Dentro dessa filosofia de trabalho, as principais perspectivas para a próxima década são (ver também Tabelas 6.3 e 6.4):

- Implantação definitiva de preparação de monocristais de Silício para utilização em micro-eletrônica;
- Otimização dos processos de preparação dos monocristais de LiNbO_3 e suas soluções sólidas para aplicações em dispositivos eletroópticos e eletroacústicos;
- Otimização dos processos de corte e polimento de substratos monocristalinos para aplicações científicas e tecnológicas;
- Preparação, de modo sistemático, de monocristais de LiTaO_3 e suas soluções sólidas;
- Preparação de monocristais de Y AG: Nd pelo método CZ, para aplicações em lasers e mini-lasers de estado sólido;

- Otimização dos processos de crescimento de monocristais pelo método de HTS, será adotada na preparação de monocristais como $GdAlO_3$, NAB e as suas soluções para aplicações científicas e tecnológicas;
- Preparação de amostras monocristalinas de halogenetos alcalinos para aplicações científicas e tecnológicas;
- Otimização dos processos de preparação, caracterização e determinação de propriedades elétricas de monocristais supercondutores de alta Tc dos sistemas Y-Ba-Cu-O e Bi-Ca-Sr-Cu-O;
- Obtenção de monocristais homogêneos, de alta perfeição estrutural e de grandes dimensões pelo método de solução aquosa, para aplicações ópticas e térmicas, através da modernização dos equipamentos de preparação;
- Preparação e caracterização de monocristais semicondutores III-V, direcionado para os compostos GaAs e InSb e preparação de seus substratos monocristalinos;
- Desenvolvimento de novos materiais de importância tecnológica.

6.3.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sabe-se que a Ciência de Materiais desenvolver-se-á no mundo inteiro com grande êxito na próxima década. O Brasil não pode ficar fora desta competição e precisa investir tanto em recursos humanos como em equipamentos de preparação e caracterização de novos materiais. Hoje é ainda pequeno o número de centros que dispõe de capacitação razoável para estes desenvolvimentos; o número de especialistas (tecnólogos, engenheiros, mestres e doutores) está crescendo mas é insuficiente para seguir os desenvolvimentos recentes. Por outro lado os grupos atuais sofrem da falta de equipamentos modernos de caracterização de rotina; além disto os equipamentos de porte maior e de alto custo são praticamente inexistentes, o que prejudica muito o desenvolvimento das pesquisas e de protótipos. O Brasil deveria urgentemente criar 5 a 6 centros de excelência nas regiões onde se manifestam as melhores esperanças para o desenvolvimento da Ciência de Materiais. Esses centros a serem localizados por exemplo nas regiões de São Carlos, São Paulo, Campinas, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, região Nordeste e Sul do País com investimentos financeiros da ordem de US\$ 10 a 15 milhões cada um, deveriam suprir as comunidades científicas com técnicas modernas de caracterização e dar apoio técnico-científico de alto nível profissional.

TABELA 6.1
GRUPOS DE PESQUISA EM CERÂMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

INSTITUIÇÃO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFCE	Crescimento de Cristais Caracterização de Cristais e vidros Síntese e caracterização de pós cerâmicos, filmes e fluidos mag- néticos	C	Espectroscopia Raman	150.000
		C	Luminescência	60.000
		I	Foto-capacitância	20.000
			Espectroscopia Moebauer	30.000
			Medidas elétricas	50.000
			Medidas magnéticas	50.000
			Raio-X	100.000
			Evaporadora	40.000
	TOTAL		500.000	
UFRGH	Desenvolvimento de partes, peças e componentes a base de cerâmica e metais refratários	I	DTA-IG	120.000
			Resistividade Elétrica	15.000
			Capacitância	10.000
	TOTAL		145.000	
UFES Materiais Carbonosos	Propriedades físicas de Materiais Carbonosos Sólidos	C	Preparação de amostras e carac- terização com análises físicas químicas mais simples	15.000
		I C/I	Resistividade elétrica	10.000
			Outras técnicas em cooperação com outros laboratórios	
	TOTAL		25.000	
IPEN/CNEN-SP Divisão Materiais Cerâmicos	Desenvolvimento de eletrólitos sólidos à base de zircônia e toria Propriedades elétricas de cerâmicas avancadas Desenvolvimento de compósitos com matriz cerâmica Desenvolvimento de whiskers para reforço de cerâmicas	C	Sputtering	7.000
			BET	1.000
			Difratometria de Raio-X	120.000
		I	Microscopia óptica	20.000
		I	NEV	120.000
		I	NET	450.000
		I	Microscopia Eletrônica	200.000
		I	Ensaio Mecânicos	150.000
	Condutividade elétrica	30.000		
	TOTAL		1.098.000	

TABELA 6.1
GRUPO DE PESQUISA EM CERAMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

Continuação

INSTITUICAO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	ESTAGIO	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IPEN/CNEN-SP Divisao de Optica Aplicada	Sintese de Cloretos e Fluoretos	C	Hidroclorinaçao e Hidro- fluorinaçao	50.000
	Purificacao e Refino de Cloretos	C	Refino por Zona sob HCl e HF	50.000
Lab. de Crescimento de Cristais	Crescimento de mono-cristais de Haletos Alcalinos em geral para pesquisa, janelas opticas e lasers	C	Czochralski	80.000
		C	Bridgman Dinamico	20.000
		C	Bridgman Estatico	20.000
	Crescimento de Cristais de Fluor- etos de fusao congruente (LiF, CaF ₂) para aplicacoes laser	C	Czochralski	20.000
		C	Bridgman Estatico	30.000
	Tratamentos termicos programaveis de mono-cristais	C	Controle Fino da Teraica	20.000
	Crescimento de Fluoretos de Fusao Incongruente tipo YLiF ₄ , BeLiF ₃ , alfabeticos para aplicacoes laser	C	Czochralski	50.000
	Crescimento de Fluoroperovskitas	:	Czochralski	20.000
	Crescimento de Cristais multipli- cadores de frequencia tipo KDP, KTP	C/I	Soluçao a Baixas Temperaturas	50.000
	Preparacao de Bastoes Laser	C/I	Corte, Polimento, Interferometria Laser	50.000
Sintese de Compostos Super- condutores de Alto T _c	C	Reaçao cuica de estado solido	20.000	
Crescimento de Mono-Cristais Supercondutores de Alto T _c	C	Fluxo/Czochralski	50.000	
Caracterizacao Cristalografica	C	Difracao de Raios-X	150.000	
			TOTAL	680.000

TABELA 6.1
GRUPOS DE PESQUISA EM CERAMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

CONTINUAÇÃO

INSTITUIÇÃO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	ESTÁGIO	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IFQSC-USP Grupo de Materiais	Desenvolvimento de vidros, filmes finos, pós e cerâmicas pelo pro- cesso sol-gel	C	Espectroscopia espectral-óptica	120.000
			espectroscopia fotoacústica	30.000
			Impedanciometria	50.000
			Bet e quimisorção	50.000
			Porosimetria	70.000
	Desenvolvimento e caracterização de vidros de fluoretos	I	Sedigrafia	60.000
			DTA-TG	120.000
			Picnometria	8.000
			Difração de Raios-X	120.000
			SAIS	20.000
		Autocorrelação de fótons	70.000	
		Preparação de Vidros (fornos, etc.)	100.000	
		TOTAL	815.000	
Grupo de Crescimento de Cristais	Preparação e caracterização de mono-cristais óxidos e suas so- luções sólidas	C	Czochralski	500.000
			Bridgman	20.000
			Refinamento por zona	10.000
			Solução a altas temperaturas (fluxo)	115.000
	Preparação e caracterização de mono-cristais de halogenetos alcalinos	C	Solução a baixas temperaturas (evaporação do solvente e es- friamento lento)	15.000
	Preparação e caracterização de monocristais via solução aquosa	C	Laser probe	10.000
	Preparação e caracterização de monocristais de InSb	C	Resistividade elétrica	15.000
Preparação e caracterização de monocristais de GaAs	I	Corrente termo-estimulada	20.000	
		Czochralski para semicondutores III-V	500.000	
		TOTAL	1.305.000	

TABELA 6.1
GRUPOS DE PESQUISA EM CERAMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

CONTINUAÇÃO

INSTITUIÇÃO GRUPO	LINHAS DE PESQUISA	ESTÁGIO	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IF-UFRGS Grupo de Física de altas Pressões	Síntese de materiais superduros diamante e CBN, monocristalino e policristalino, por altas pressões	C	Câmaras de alta pressão para até 80 Kbar e 2000°C Espectroscopia óptica	100.000 30.000
	Sintetização de materiais super- duros e afins	I	Câmaras de pressão tipo "diamond anvil cell" Difração de raios-X, "in situ" e fora da câmara	30.000 50.000
	Transformação de fase em materiais cerâmicos em altas pressões	C	Ceramografia e Análise de Imagem	10.000
	Síntese de diamante por CVD	I	Microdureza	10.000
	Propriedades Fotoelásticas de materiais	C		
TOTAL				230.000
IF-USP Grupo Centros de Cor	Estudo da cinética de decaimento de diversos centros paramagnéticos oriundos de defeitos intrínsecos e de impurezas, induzidos por ir- radiação de vidros aluminoboratos de bário e óxido de arsênio.	C	Ressonância paramagnética eletrônica Espectroscopia óptica Ressonância de quadrupolo nuclear	60.000
	Estudo da recombinação entre elé- trons e buracos em vidros aluminoboratos de bário irradiados com raio-X.	C	Termoluminescência Ressonância paramagnética eletrônica	5.000
	Propriedades dielétricas em solu- ções sólidas de titanato de bário e estrôncio.	C	Impedanciometria	15.000
	Propriedades ópticas e eletrônicas de semicondutores amorfos calcoge- netos de antimônio e arsênio.	C	Espectroscopia óptica Espectroscopia de deflexão fototérmica Análise térmica diferencial	15.000
TOTAL				95.000

TABELA 6.2
 PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE EM CERAMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS 78-88		ARTIGOS EM REVISTAS C/ ARBITRO 78-87 83-89	
	T	E	T	E	IC	R	D	R	D		
UFCE	-	8	-	5	10	8	2	11	-	6	20
UFROX	-	1	-	1	5	2	-	-	-	-	5
UFES	-	1	-	2	3	-	-	-	-	-	2
IPEN-CNEN-SP Divisao de Materiais Ceramicos	-	3	-	1	6	4	0	5	0	5	10
IPEN/CNEN-SP Divisao de Optica Aplicada - Lab. de Crescimento de Cristais	-	1	-	2	2	3	2	2	2	2	5
IFQSC-USP Grupo de Materiais	2	7	-	-	14	4	13	18	6	14	56
Grupo de Crescimento de Cristais	-	2	-	-	2	5	2	4	-	-	24
DF-UFSCAR	-	2	-	1	4	1	-	-	-	-	-
IF-UFRRS Grupo de Fisica de Altas Pressoes	-	2	-	4	5	1	3	2	-	-	11
IF-USP Grupo Centros de Cor		4			4	7	5	14	4	14	14

TABELA 6.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$	
UFCE	Consolidação da Pesquisa Atual Espectroscopia de Resolução Temporal	Microscopia Eletrônica	200.000	
		Espectroscopia Visível e Ultravioleta	50.000	
		Medidas de Susceptibilidade Magnética	50.000	
		Geração e detecção de pulsos rápidos	250.000	
TOTAL			550.000	
UFRCR	Estudo de Modelos de Sinterização Desenvolvimento de Capacitores Dinâmicos	Fornos especiais de Sinterização	50.000	
		Susceptibilidade Magnética		
		TOTAL		50.000
UFES	<u>CONDIÇÕES ATUAIS</u>			
	Filmes espessos	Sistemas de preparação de amostras e tratamentos térmicos (informatização, etc.)	50.000	
	Tenso-redutores e eletrodos	Técnicas de análises físicas e químicas como calorimetria, dilatometria e outras Outras técnicas em cooperação com outros laboratórios	50.000	
	<u>CONDIÇÕES IDEAIS</u>			
	Materiais intercalados	Sistemas de preparação de amostras e tratamentos térmicos	70.000	
	Fibras de carbono e compósitos	Técnicas de análises físicas e químicas como cromatografia e outras	150.000	
		Outras técnicas em cooperação com outros laboratórios		
	TOTAL			320.000

TABELA 6.3
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE PESQUISA	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$		
IPEN/CNEN-SP Divisão de Materiais Cerâmicos	Consolidação da Pesquisa Atual	Microscopia Eletrônica de Varredura	350.000		
		Difusividade Térmica	250.000		
		Impedância Complexa	60.000		
		Porosimetria de Hg	60.000		
		Análise sedigráfica	80.000		
		Spray drier	25.000		
		TOTAL	825.000		
IPEN/CNEN-SP Divisão de óptica Aplicada	Consolidação da Pesquisa Atual	Interferometria	50.000		
		Controle de qualidade de Bastões Lasers	100.000		
		Lab. de Crescimento de Cristais	Czochralski com controle de diâmetro por gravimetria	150.000	
			Czochralski	250.000	
		Crescimento de Monocristais oxidos para Aplicações Laser	Fornos para síntese e fusão		250.000
		TOTAL	600.000		
IFQSC-USP Grupo de Materiais	Consolidação da Pesquisa Atual	Microscopia Eletrônica Sem	500.000		
		Microsonda EDX - UDX			
		Estudos de Superfície por Esca, SIES, etc.	300.000		
		Dilatometria	120.000		
		Elipsometria	120.000		
				TOTAL	1.040.000

TABELA 6.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
IFQSC-USP Grupo de Crescimento de Cristais	Preparação e caracterização de substratos monocristalinos óxidos e outros componentes eletroópticos e eletroacústicos		100.000
	Preparação e caracterização de mono- cristais semicondutores III-V		500.000
	Preparação de monocristais óxidos para aplicações em lasers		100.000
	Caracterização elétrica e magnética de sólidos monocristalinos		100.000
		TOTAL	800.000
DF-UFSCAR	Cerâmicas eletro-ópticas	Medidas de potência do campo acústico	20.000
	Compostos cerâmicos-polímero		
	Desenvolvimento de cabeçotes ultra- sônicos	Mapeamento	20.000
	Ultra som aplicado à medicina	Pressagem a quente	220.000
		Caracterização dielétrica	60.000
		TOTAL	320.000
UF-UFMS Grupo de Física de Altas Pressões		H.I.P	100.000
		Microanálise Raman	130.000
		Câmaras de alta pressão com grande volume	200.000
		TEM	Institucional
		SEM	100.000
		TOTAL	530.000

TABELA 6.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
UNICAMP Laboratório de Cristalografia	Multicamadas ordenadas de moléculas anifílicas	Método de preparação Deposição por sublimação	50.000
UNICAMP Grupo de Vidro	Estudo e preparação de vidros foto- sensíveis Vidros silicatos fotocromáticos		100.000
IFGW-UNICAMP Grupo de Propr. Mecânicas	Consolidação da Pesquisa Atual	Ensaios em temperatura e umidade controlada	70.000
IF-GSP Grupo Centros de Cor	Preparação de vidros especiais para laser e concentrador solar luminescente.	Fornos especiais Isopendacêntrica	120.000
	Luminescência resolvida no tempo de calcogenetos amorfos de antimônio e arsênio e de vidros especiais para laser e concentrador solar luminescente.	Espectrofluorimetria resolvida no tempo	200.000
	Ressonância magnética opticamente detectada de calcogenetos amorfos de antimônio e arsênio e de vidros especiais para laser e concentrador solar luminescente.	Espectroscopia de ressonância magnética opticamente detectada	300.000
	Preparação de filmes finos de calcogenetos amorfos semicondutores.	Técnicas de deposição em alto vácuo	50.000
		TOTAL	670.000

TABELA 6.4
 PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM CERÂMICAS, VIDROS E CRESCIMENTO DE CRISTAIS

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO		CONDIÇÕES IDEAIS		EXPANSÃO DO GRUPO		CONDIÇÕES IDEAIS	
	R	D	R	D	R	D	R	D
UFCE	10	4	15	6	5	3	8	5
UFRN	2	-	3	6	2	2	3	4
UFES	-	-	5	2	2	1	2	3
IPEN/CNEN-SP Divisão de Materiais Cerâmicos	7	2	9	6	1	3	4	6
IPEN/CNEN-SP Div. de Óptica Aplicada Lab. de Crescimentos de Cristais	2	2	4	4	2	1	4	2
IFQSC-USP Grupo de Materiais	4	13	8	15	6	6	6	6
IFQSC-USP Grupo de Crescimento de Cristais	4	3	7	10	4	4	4	4
DF-UFSCAR	3	2	7	2	1	1	3	2
IF-UFGRS Grupo de Física de Altas Pressões	1	4	4	4	1	2	3	4
IF-USP Grupo Centros de Cor	8	4	20	10	-	4	-	10

7. Física Estatística e Teoria de Sólidos

7.1 DESCRIÇÃO

A física teórica da matéria condensada aborda uma grande variedade de problemas, utilizando idéias básicas da mecânica quântica e da mecânica estatística. A moderna teoria dos sólidos se iniciou através do estudo das propriedades eletrônicas dos cristais perfeitos, dotados de simetria translacional, possibilitando uma compreensão bem fundamentada dos fenômenos de condução, com enormes repercussões tecnológicas. Certos problemas teóricos da física da matéria condensada - como a investigação dos estados eletrônicos e das propriedades de transporte de metais e semicondutores - acabaram produzindo áreas de estudo que estão descritas em capítulos separados. Da mesma forma, o estudo das propriedades dos materiais magnéticos, de interesse básico e aplicado, está descrito no capítulo referente ao magnetismo. Vamos, portanto, nos restringir principalmente à descrição de problemas onde há poucas fronteiras entre a física estatística e a física da matéria condensada.

A física estatística fornece os elementos para o estudo dos sistemas complexos, organizados, a partir de seus componentes mais simples. A física do século XX se desenvolveu prioritariamente no sentido de descobrir os componentes últimos ou elementares da matéria. A física estatística, por outro lado, representa uma tendência complementar, que reconhece a necessidade da introdução de novas leis e regularidades para explicar o comportamento dos sistemas complexos.

No final do século XIX, a termodinâmica já se havia estabelecido como a grande teoria macroscópica, capaz de explicar o comportamento térmico, "visível", da matéria na presença de agentes externos. A segunda lei da termodinâmica, que define um sentido temporal inequívoco, representa um exemplo do comportamento característico da matéria macroscópica (pois as leis da mecânica, que se aplicam às partículas que constituem a matéria, nunca distinguem entre o passado e o futuro). A mecânica estatística tem sua origem na formulação da chamada teoria cinética, que procura explicar as propriedades térmicas dos gases (lei de Boyle, calores específicos, coeficientes de transporte) através de um modelo constituído por partículas em movimento, governadas pelas leis da mecânica clássica. A equação de Boltzmann, proposta em 1872, que constitui o protótipo dos métodos cinéticos modernos, representa uma tentativa de construir a função entropia da termodinâmica com base nas leis da mecânica. Foi o próprio Boltzmann quem percebeu a importância da introdução de conceitos probabilísticos e propôs a famosa definição estatística de entropia, $S = k \log W$, onde W é o número de estados microscópicos igualmente prováveis. A moderna mecânica estatística de equilíbrio foi formulada por Gibbs, no início do século, e praticamente não sofreu qualquer transformação com a necessidade de reconhecer que o mundo microscópico é na realidade governado pelas leis da mecânica quântica. A formulação de uma termodinâmica ou de uma mecânica estatística para processos fora do equilíbrio, no entanto, ainda é objeto de pesquisa e continua sujeita a pontos de vista diferentes.

Não há fronteiras distintas entre a física estatística e a física da matéria condensada. Um dos primeiros triunfos práticos da física estatística foi a utilização de dados espectroscópicos para calcular a entropia e o calor específico de um grande número de substâncias. Fenômenos de transportes em meios materiais (condutividade térmica, condutividade elétrica, viscosidade) também foram amplamente estudados com o auxílio de técnicas cinéticas. O estabelecimento das estatísticas quânticas (Fermi-Dirac e Bose-Einstein) possibilitou uma enorme gama de aplicações, desde o estudo de propriedades térmicas de metais e de semicondutores até a proposta de uma explicação para a transição superfluida no hélio líquido. As grandes teorias modernas sobre o comportamento térmico da matéria condensada, entre as quais se sobressaem as teorias do paramagnetismo e do diamagnetismo e a teoria da supercondutividade, têm sido formuladas no âmbito da mecânica estatística quântica.

O estudo moderno das transições de fases constitui um exemplo do tipo característico de abordagem da física estatística. Desde o início do século são conhecidas teorias fenomenológicas para as transições em fluidos (Van der Waals), materiais magnéticos (Curie-Weiss), ligas metálicas (Bragg-Williams) etc. Cumpre à mecânica estatística estabelecer modelos microscópicos em termos dos quais seja possível explicar transições desta natureza. O modelo de Ising, proposto inicialmente por Lenz para explicar o ferromagnetismo, constitui o melhor exemplo não trivial de um empreendimento nesta direção. O estudo das propriedades físico-matemáticas do modelo de Ising, principalmente na medida em que se constatou o caráter universal do comportamento crítico da matéria, tem despertado o interesse de uma parcela considerável de pesquisadores na área da física estatística nos últimos trinta anos. Em particular, a solução exata do modelo de Ising bidimensional na ausência de um campo, publicada por Onsager em 1944, representa um dos grandes triunfos da física teórica contemporânea. Embora a solução exata do modelo de Ising em três dimensões continue representando um grande desafio, o estudo de suas conexões com a teoria de campos resultou na chamada teoria do grupo de renormalização, proposta por Wilson no início da década de setenta, que tem tido uma enorme repercussão na área. Deve-se assinalar que, apesar da natureza quântica das interações a que estão sujeitos os componentes elementares da matéria, a utilização de modelos clássicos de spins, abandonando quaisquer regras de comutação, tem levado a um notável avanço na compreensão de transições de fases e fenômenos críticos em magnetismo.

Em meados da década de sessenta, técnicas experimentais mais sofisticadas haviam possibilitado medidas detalhadas de grandezas termodinâmicas associadas à "matéria crítica". Substâncias aparentemente muito diferentes, como fluidos, ferro e antiferromagnetos, ligas metálicas, pareciam se comportar de maneira idêntica nas vizinhanças da criticalidade. Por outro lado, ficava cada vez mais patente que as teorias clássicas (Van der Waals, Curie-Weiss, etc.) produziam resultados incorretos na região crítica. Houve então enorme interesse no estudo dos fenômenos críticos. Logo se formulam as hipóteses de universalidade (o comportamento crítico depende de pouquíssimos fatores, como a dimensionalidade ou a simetria dos sistemas físicos) e as equações de escala. Também se reconhece a grande relevância de resultados e cálculos rigorosos para modelos estatísticos simplificados. Finalmente, a teoria do grupo de renormalização produz resultados quantitativos, passíveis de verificação experimental e justifica a universalidade e as leis de escala, constituindo um grande triunfo da moderna mecânica estatística.

Vamos relacionar outros tópicos que têm despertado grande interesse nos últimos anos:

1. Fenômenos multicríticos e diagramas de fases de sistemas complexos, incluindo polímeros, colóides, micro-emulsões e diversos tipos de cristais líquidos. Transições de fases em modelos de percolação e sistemas definidos através de vínculos geométricos. Uma variedade de pontos multicríticos, que não se resumem ao "terminus" de uma linha de coexistência de fases, tem sido descoberta e estudada nos últimos anos. As técnicas de grupo de renormalização têm sido aplicadas, com grande sucesso, principalmente para identificar as classes de universalidade e explicar o comportamento de escala nas vizinhanças dos pontos tricríticos ou bicríticos. Há um grande interesse no estudo de sistemas com interações ou períodos competitivos, dando origem a fases com modulações espaciais e a fenômenos de transição do tipo comensurável - incommensurável. Sistemas mais complexos - muitas vezes de interesse tecnológico - têm sido abordados com técnicas clássicas, do tipo campo médio, que geralmente fornecem os aspectos qualitativos dos diagramas de fases, ou com as técnicas mais modernas de grupo de renormalização. Simulações numéricas também têm sido utilizadas na investigação das propriedades de sistemas complexos.

2. Sistemas de baixa dimensionalidade. Fenômenos de superfície (adsorção de gases em substratos sólidos; transições superficiais) e propriedades de sistemas com interações extremamente fracas em uma ou duas dimensões, efetivamente produzidos em laboratório, têm sido intensamente estudados através de soluções exatas, técnicas tradicionais de muitos corpos, e diversas versões do grupo de renormalização no espaço real. As teorias de fusão bidimensional - com a possibilidade do aparecimento de uma nova fase da matéria - têm despertado grande interesse. Também têm despertado grande atenção o efeito Hall quântico, o comportamento de sistemas eletrônicos bidimensionais e o estudo de sólitons e instabilidades dinâmicas em sistemas unidimensionais. Recentemente se percebeu, na área teórica, a importância de certas idéias de invariância conforme, desenvolvidas inicialmente no âmbito das teorias de campo - atualmente já existe uma classificação e um catálogo dos expoentes críticos de praticamente todos os modelos estatísticos significativos em duas dimensões.

3. Sistemas desordenados. O sucesso inicial da física teórica dos sólidos se baseou na consideração de cristais perfeitos, translacionalmente invariantes. Cumprida esta etapa, foi possível estudar as características de defeitos isolados, que desempenham um papel importante nos fenômenos de transporte. Nos últimos anos cresceu o interesse no estudo do comportamento termodinâmico de sistemas na presença de impurezas fixas, aleatoriamente distribuídas. Por exemplo, houve grande interesse no estudo das propriedades de um sistema aparentemente simples, constituído por uma liga metálica com impurezas magnéticas, que se denomina vidro de spin. Modelos teóricos para estes sistemas, incluindo interações magnéticas competitivas, têm sido intensamente investigados. As soluções mais simples - que se reduzem ao cálculo do efeito médio ou efetivo das impurezas - envolvem uma série de sutilezas que ainda não estão totalmente controladas. Um problema aparentemente ainda mais simples, representado por um modelo de Ising ferromagnético na presença de um campo aleatório, com implicações experimentais no estudo de antiferromagnetos diluídos, também tem se mostrado

extremamente difícil. Recentemente foi possível estabelecer um contato entre os modelos de Ising para vidros de spin e modelos para redes neuronais, de interesse em neurobiologia e teoria de aprendizagem, que talvez forneçam as bases para o projeto de uma nova geração de computadores.

4. Física computacional. Com o aperfeiçoamento e a maior disponibilidade dos computadores, têm sido utilizados diversos métodos numéricos (Monte Carlo, dinâmica molecular e suas variações) para simular o comportamento de modelos representativos de sistemas da física da matéria condensada. Fenômenos de agregação e crescimento têm sido numericamente estudados com base em modelos definidos através de regras computacionais. Nos últimos anos tornaram-se populares os chamados autômatos celulares, que podem simular o comportamento hidrodinâmico de sistemas complexos. Simulações de Monte Carlo, acopladas a técnicas de grupo de renormalização, têm sido utilizadas com sucesso para estimar grandezas delicadas como os parâmetros críticos dos modelos de transição de fases.

5. Fenômenos fora do equilíbrio. Fenômenos ligeiramente fora do equilíbrio ou propriedades de transporte em fluidos suficientemente diluídos podem ser tratados através de métodos convencionais. Novas técnicas de física estatística têm sido desenvolvidas para tratar problemas de cinética química ou de transporte em fluidos densos. No entanto, a própria formulação geral da mecânica estatística dos processos fora do equilíbrio constitui um tópico aberto, sujeito a diferentes abordagens. Instabilidades, bifurcações e a ocorrência de estruturas fractais e de caos determinístico têm sido estudadas em diferentes circunstâncias, através de técnicas matemáticas analíticas e de recursos numéricos recentemente disponíveis.

6. Sistemas eletrônicos fortemente correlacionados. Novos fenômenos têm sido investigados em sistemas eletrônicos desordenados (transição metal-isolante, problemas de localização) ou altamente correlacionados (que dão origem aos férmions pesados). Técnicas de muitos corpos, que já haviam sido úteis no estudo dos líquidos quânticos, são novamente empregadas no tratamento destes sistemas. Os modelos para os problemas de localização apresentam sutilezas similares aos modelos de vidros de spin. Por outro lado, a descoberta recente dos compostos supercondutores a temperaturas altas está exigindo novos esforços na compreensão das propriedades de modelos quânticos. Neste sentido, pouco se avançou além das teorias clássicas de ondas de spin. Há grande interesse no estudo das propriedades do modelo de Hubbard, que se refere a um sistema de elétrons itinerantes. Os novos supercondutores apresentam uma estrutura de camadas que conduz à consideração de um modelo de Hubbard em duas dimensões - no entanto, não se conhece nem o estado fundamental do modelo antiferromagnético de Heisenberg em duas dimensões (correspondente ao limite de Hubbard para acoplamentos fortes).

7.2. SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

A pesquisa em física teórica dos sólidos no Brasil se inicia na década de sessenta, nos grupos estabelecidos na USP, em São Paulo e em São Carlos. O grupo de São Paulo foi organizado sob a inspiração de Mario Schömberg, com o concurso de Newton Bernardes, que havia trabalhado em líquidos quânticos no exterior. O grupo de São Carlos foi implantado por Sérgio Mascarenhas, físico experimental que havia trabalhado com Gross e Costa Ribeiro no Rio de Janeiro, contando com a liderança teórica de Roberto Lobo, especialista na utilização de técnicas de muitos corpos para investigar problemas de física da matéria condensada. O grupo teórico de São Paulo, mais tarde sob a liderança de Luiz Guimarães Ferreira, proporcionou a formação de diversos pesquisadores que se dedicam principalmente ao cálculo de propriedades eletrônicas de sólidos. Roberto Luzzi, que depois se fixa na UNICAMP, estudando propriedades ópticas de semicondutores, e Affonso Gomes, que se fixa no CBPF, estudando propriedades de materiais magnéticos, iniciaram os seus trabalhos de pesquisa em São Paulo, sob a orientação de A. De Graaf, e foram responsáveis pela formação de diversos pesquisadores nas suas áreas de trabalho.

Em meados da década de sessenta, surge um grande interesse no estudo das transições de fases e fenômenos críticos. No Brasil, os primeiros trabalhos sobre transições de fases são fortemente influenciados pelas pesquisas mais tradicionais em magnetismo. Analisam-se dados experimentais, obtidos no País ou no Exterior, sobre transições de fases magnéticas. O pessoal teórico do grupo de Recife (Maurício D. Coutinho, Ivon P. Fittipaldi, Marco A.G. de Moura) completa o doutoramento no País estudando problemas de magnetismo, mas realiza estágios de pós-doutoramento no Exterior, estudando transições de fases em sistemas magnéticos. Sergio Rezende, especialista em magnetismo, tem grande influência nos trabalhos desenvolvidos em Recife. O grupo de SÃO Paulo (Silvio R.A. Salinas e Mario J. de Oliveira) tem vários contatos no Exterior, mas é influenciado pelos trabalhos experimentais em magnetismo realizados no Laboratório de Baixas Temperaturas do IFUSP. Em Porto Alegre, Claudio Scherer trabalha com modelos magnéticos. Em meados de setenta, Lindberg L. Gonçalves retorna para Fortaleza, após completar um doutoramento em sistemas magnéticos de baixa dimensionalidade. Pascal Lederer, especialista em magnetismo, visita o Brasil e dá vários seminários sobre o grupo de renormalização, influenciando o trabalho de físicos do CBPF e da PUC-RJ (Affonso Gomes e Carlos Maurício Chaves trabalham com Lederer). Em São Carlos, no entanto, as técnicas de muitos corpos aplicadas aos líquidos quânticos é que influenciam os primeiros trabalhos na área de mecânica estatística (Sylvio G. Rosa Jr., doutorado nos Estados Unidos, colabora com Roberto Lobo e Oscar Hipólito). Posteriormente se estabelece em São Carlos uma linha de trabalho utilizando técnicas de grupo de renormalização para estudar o comportamento de modelos de mecânica estatística e de teoria de campos, sob a liderança de Roland Köberle, originário da área de partículas e campos, contando com o apoio de Jorge A. Swieca, que havia se transferido para a Universidade Federal de São Carlos. Em Belo Horizonte há um grande empenho no estudo, tanto experimental quanto teórico, de fenômenos de transição de caráter ferroelétrico (Francisco C. de Sá Barreto e Alaor Chaves, doutorados nos Estados

Unidos, lideram o grupo mineiro, que também contou, diversas vezes, com a colaboração do físico iugoslavo R. Blinc). Constantino Tsallis, doutorado na França, vem para Brasília em 1975, trabalhando com modelos magnéticos e estruturais, mas depois se transfere para o CBPF, iniciando uma linha de pesquisa sobre fenômenos de percolação e magnetismo aleatório. Mais tarde, Walter e Alba Theumann, formados em Nova York, se estabelecem em Porto Alegre, utilizando técnicas de grupo de renormalização e teoria de campos. As áreas mais tradicionais da mecânica estatística, que se caracterizaram, no Exterior, por progressos menos espetaculares durante os últimos anos, permanecem muito pouco desenvolvidas no Brasil. Apesar de esforços isolados no estudo de fenômenos fora do equilíbrio, até recentemente apenas se destacavam os trabalhos sobre semicondutores do grupo da UNICAMP, sob a liderança de Roberto Luzzi.

B. Situação Atual

Atualmente há grupos de pesquisa em física teórica da matéria condensada em praticamente todas as universidades brasileiras. Vários estudantes dos núcleos mais antigos foram absorvidos nas suas instituições de origem ou se fixaram em novos locais de trabalho.

No Nordeste, o grupo mais antigo, de Recife, teve um pequeno crescimento e continua muito ativo, estimulado pelos trabalhos experimentais nas áreas de magnetismo e óptica não linear. Em Recife pesquisam-se propriedades de sistemas desordenados, semicondutores magnéticos e o comportamento de modelos para explicar o magnetismo itinerante (em sistemas condutores). Pesquisam-se também propriedades de sistemas com interações competitivas, vidros de spin, fractais, caos e efeitos não lineares. Em Fortaleza, há trabalhos em sistemas magnéticos de baixa dimensionalidade e fenômenos fora do equilíbrio. Na área experimental, realizam-se medidas ópticas que dão informações sobre transições estruturais. Em Natal, sob a liderança pioneira de Liacir Lucena, há trabalhos sobre modelos de percolação e autômatos celulares (em colaboração com os grupos de Maceió e do CBPF). Há também pesquisadores teóricos investigando o espalhamento de luz em materiais magnéticos. O grupo de João Pessoa se dedica a estudos de vidros de spin e sistemas desordenados. O grupo de Maceió tem trabalhos em sistemas magnéticos, fractais e autômatos celulares. O grupo de Salvador tem se dedicado ao estudo de efeitos não lineares, física estatística fora do equilíbrio e sistemas magnéticos. Nos últimos anos tem se realizado, com regularidade, um simpósio de física do Nordeste, possibilitando um intercâmbio mais expressivo entre os pesquisadores desta região.

Em Belo Horizonte há pesquisas sobre fenômenos não lineares e propriedades estáticas e dinâmicas de modelos para sistemas de spins. Têm sido realizados cálculos de relevância experimental para a análise de efeitos não lineares em sistemas quase unidimensionais. Na UFMG há também grupos ativos nas áreas de física matemática, com interesse em resultados rigorosos em mecânica estatística, e de física de semicondutores. O esforço anterior em ferroeletricidade cedeu lugar à física dos semicondutores. Em Brasília há um grupo teórico voltado para a física dos semicondutores e de modelos para sistemas

magnéticos e ligas metálicas. A criação recente de um Centro Internacional de Física da Matéria Condensada deverá ter impacto considerável na área.

Na região do Rio de Janeiro há pesquisa em física teórica da matéria condensada no CBPF, na PUC, na UFRJ e na UFF. O grupo do CBPF tem vários interesses, com atividades mais antigas em transições de fases e fenômenos críticos em sistemas magnéticos isolantes e modelos de percolação, e interesses mais recentes em sistemas dinâmicos não lineares, caos e fractais. No CBPF há também diversos pesquisadores teóricos com longa tradição no estudo das propriedades de modelos para o comportamento magnético de metais e ligas metálicas. O grupo da PUC é bastante diversificado - há pesquisadores ativos no estudo de sistemas magnéticos com diluição, fenômenos de percolação e transições geométricas, propriedades eletrônicas de semicondutores, magnetismo itinerante e fenômenos de adsorção. Alguns pesquisadores da PUC têm se dedicado a problemas de simulação numérica em modelos de teoria de campos e de física da matéria condensada. Na UFF, em Niterói, o grupo teórico conseguiu se expandir, dedicando-se a diversos problemas - física de semicondutores, propriedades de superfícies e interfaces, propriedades eletrônicas e magnéticas de sistemas eletrônicos fortemente correlacionados, vidros de spin e sistemas desordenados e autômatos celulares. Na UFRJ a atividade teórica é reduzida (propriedades magnéticas de sistemas de terras raras), mas há um dos poucos grupos experimentais com trabalhos diretamente relacionados com a física estatística. O Laboratório de Baixas Temperaturas, implantado por Eugênio Lerner, se dedica ao estudo de fenômenos de adsorção e molhabilidade em sistemas de gases nobres adsorvidos em grafite e propriedades de sistemas magnéticos desordenados ou de baixa dimensionalidade.

Em São Paulo, há grupos teóricos ativos nos dois "campus" da USP. São Paulo e São Carlos, na UNICAMP, e na Universidade Federal de São Carlos. No "campus" de São Paulo há laboratórios bem estabelecidos, principalmente na área de magnetismo em baixas temperaturas, com contribuições significativas para o estudo de fenômenos críticos. Os pesquisadores do IFUSP têm longa tradição no estudo de propriedades eletrônicas de metais e semicondutores. Na área de física estatística, têm sido abordados modelos para fenômenos multicríticos, sistemas com interações competitivas, vidros de spin e sistemas desordenados, modelos estatísticos para transições em polímeros e cristais ferroelétricos. Tem havido um certo grau de interação entre o grupo teórico e os grupos experimentais (no estudo de diagramas de fase de cristais antiferromagnéticos isolantes e cristais líquidos termotrópicos). Em São Paulo há também um grupo ativo na área de física matemática, com interesse em resultados rigorosos para sistemas desordenados. O grupo do Instituto de Física e Química de São Carlos tem longa tradição na aplicação de técnicas de muitos corpos para o estudo de problemas da física da matéria condensada. Além dos trabalhos em semicondutores, atualmente há atividade expressiva na área de sistemas eletrônicos fortemente correlacionados, relevantes para a compreensão dos fenômenos de supercondutividade nos novos materiais cerâmicos. A pesquisa em vidros de spin e sistemas desordenados está dando origem em São Carlos a um grupo de trabalho em redes neuronais (em cooperação com o grupo da UFRGS). No IFQSC-USP ainda se estudam diagramas de fase, fenômenos multicríticos e fractais, utilizando técnicas de grupo de renormalização e simulações numéricas. Na Universidade Federal de São Carlos, cujo grupo sempre teve um grande contato com os pesquisadores da

USP, estudam-se propriedades eletrônicas de sistemas bidimensionais e heteroestruturas, bem como se utilizam técnicas numéricas para estudar sistemas estatísticos bidimensionais à luz das teorias de invariância conforme. Finalmente, ainda no Estado de São Paulo, há vários grupos teóricos na Universidade Estadual de Campinas. Há atividades mais antigas e bem estabelecidas, na área de física estatística fora do equilíbrio, com aplicações em fenômenos de transporte e propriedades ópticas de semicondutores, e no estudo de propriedades de materiais magnéticos. Também há atividades no cálculo de dinâmica de redes cristalinas e em física de semicondutores. Mais recentemente, estabeleceu-se na UNICAMP um grupo teórico com interesses em problemas de dinâmica quântica e caos, localização, metais e ligas e sistemas eletrônicos fortemente correlacionados.

Na região Sul do Brasil, há pesquisas em física teórica da matéria condensada na UFRGS, na UFSM, na UFSC e na UFPR. Em Porto Alegre, estudam-se fenômenos multicríticos, vidros de spin e sistemas desordenados, problemas de localização, propriedades de metais e ligas magnéticas, fenômenos fora do equilíbrio e, mais recentemente, em colaboração com o grupo de São Carlos, propriedades de redes de neurônios. O grupo de Santa Maria se dedica ao estudo de semicondutores e de propriedades magnéticas de metais e ligas metálicas. Na UFSC há pesquisas teóricas em transições de fases em modelos magnéticos e propriedades magnéticas de superfície. Em Curitiba, na Universidade Federal do Paraná, há um grupo teórico que utiliza técnicas de termodinâmica e teoria cinética para estudar o espalhamento de luz em fluidos.

C. Carências e Dificuldades

A área de física estatística teve um crescimento rápido nos últimos dez anos, com uma produção científica profissionalmente aceita em nível internacional. Atualmente há cerca de oitenta doutores ativos na área, distribuídos geograficamente por quase todo o país, trabalhando em problemas suscitados pela física da matéria condensada. As atividades teóricas são absolutamente preponderantes.

Os pesquisadores da área têm tido uma participação ativa nos Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada e têm conseguido realizar algumas reuniões específicas. Há uma boa dose de intercâmbio entre os grupos nacionais, dinamizado pelas reuniões de trabalho. Neste ano deverá estar sendo realizada no Rio de Janeiro a XVII Conferência Internacional de Termodinâmica e Física Estatística, patrocinada pela IUPAP.

Apesar do progresso da área no país, podem-se apontar diversos problemas. Continuam muito fracos os contatos entre os grupos experimentais e os grupos teóricos. Na realidade, ao contrário do que ocorre nos Estados Unidos ou na Europa, há pouquíssimos grupos experimentais estudando novos problemas e propondo questões aos teóricos. Estas circunstâncias obrigam muitas vezes os grupos teóricos a se dedicarem ao estudo de problemas mais abstratos, cuja própria relevância pode ser questionada. A médio prazo, o fortalecimento da área no Brasil passa necessariamente por uma maior independência na geração de problemas e questões que possam ser estudados no País, tanto teórica quanto

experimentalmente. No momento já se nota uma certa diversidade nos problemas que têm sido abordados pelos pesquisadores da área. No entanto, as linhas de pesquisa em física teórica da matéria condensada ainda precisam se ampliar, incluindo novos temas, como fenômenos fora do equilíbrio, processos de agregação e crescimento e modelos mecânico-estatísticos de novos materiais. É absolutamente necessário melhorar a nossa capacidade computacional e realizar um certo esforço no desenvolvimento de técnicas de simulação numérica.

Quase todos os grupos da área têm sofrido com a falta crônica de recursos para material bibliográfico, intercâmbio e aquisição de equipamentos. Há vários anos a atuação do CNPq vem sendo criticada. No estágio atual de desenvolvimento da área é importante assegurar um nível mínimo de intercâmbio com o Exterior, tanto convidando pesquisadores estrangeiros quanto enviando delegações expressivas às principais conferências internacionais. O fortalecimento da área certamente depende de um apoio decidido a todos os projetos experimentais. Os grupos teóricos se ressentem de uma grande carência de recursos computacionais. Este fato é particularmente grave na área de física estatística, em que o computador tem desempenhado um papel central em muitos desenvolvimentos recentes. Dentro deste quadro, o trabalho científico e o treinamento de pessoal nas novas técnicas computacionais estão sendo seriamente prejudicados.

7.3. PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Planos dos Grupos

Certamente é muito difícil planejar a atividade de pesquisa científica, principalmente numa área básica, de cunho eminentemente teórico. Os grupos menores estão preocupados com a sua consolidação, planejando atrair pessoal para reforçar as atividades existentes. Os grupos mais bem estabelecidos estão preocupados em reforçar certas áreas de trabalho que, subitamente, se tornaram extremamente importantes. Há poucos anos era quase impossível prever que as pesquisas em supercondutividade, relegadas a poucos laboratórios, iriam renascer com tamanha intensidade. Os grandes progressos na compreensão dos fenômenos críticos em modelos de sistemas magnéticos somente se verificaram na medida em que as regras quânticas foram abandonadas, considerando-se os spins como entidades clássicas. A supercondutividade, no entanto, é um fenômeno eminentemente quântico, exigindo um retorno às pesquisas sobre os modelos estatísticos quânticos. Vários grupos têm condições para se adaptar aos desafios desta pesquisa.

Os trabalhos em transições de fases e fenômenos críticos se desenvolveram em diversos centros do País, acompanhando o grande interesse suscitado por estes problemas em nível internacional. No entanto, áreas mais tradicionais da física estatística, caracterizadas por progressos menos espetaculares no Exterior, permanecem quase inexploradas no Brasil. Os grupos experimentais também não acompanharam o ritmo de crescimento dos núcleos teóricos. Esta situação leva a distorções sérias, que se constituem num reflexo do atual estágio de desenvolvimento do País. A interação entre teóricos e

experimentais é um processo absolutamente necessário para uma prática científica forte e com algum grau de autonomia. No entanto, este é um processo complexo, que não vai ocorrer através de uma simples manifestação de intenções. É preciso fortalecer os grupos experimentais a fim de que a produção, tanto quantitativa quanto qualitativamente, exija e estimule a participação dos teóricos. Por outro lado, nas condições brasileiras, atingida uma certa competência teórica em certas áreas, é preciso a todo custo manter o que já existe. A falta de apoio a grupos teóricos de indiscutível qualidade, muitas vezes até trabalhando em problemas abstratos, poderá acarretar um grande prejuízo à física brasileira.

Na área teórica é fundamental que todos os grupos se esforcem para manter um alto nível de excelência na aplicação de técnicas modernas da física estatística em problemas relevantes da física da matéria condensada. Torna-se imprescindível atrair o maior número possível de bons estudantes de pós-graduação e incrementar o intercâmbio científico com outros grupos do País e do Exterior. Também é fundamental melhorar o nível das facilidades computacionais.

Na área experimental, é fundamental que surjam novos grupos de pesquisa nos diversos ramos da física da matéria condensada. O apoio aos novos grupos, no entanto, deve levar em conta que os trabalhos experimentais mais significativos em transições de fases e fenômenos críticos no Brasil vêm sendo realizados nos laboratórios de baixas temperaturas do IFUSP e da UFRJ. Em São Paulo, há planos de expansão em *supercondutividade e física experimental de semicondutores*. No Rio de Janeiro também se planeja uma expansão na área de supercondutividade, além de desenvolvimentos em filmes finos, análise de superfícies e métodos de calorimetria AC. Estes planos são bastante concretos e devem se realizar se não houver absoluta falta de recursos. Os grupos experimentais reclamam de um excesso de burocracia na obtenção de verbas, das dificuldades de importação, e da falta de uma infraestrutura de apoio mais adequada. Certamente seria pelo menos sensato atentar para que estes grupos obtivessem o apoio suficiente para manter o seu nível de atividade. Qualquer recuo neste apoio - em nome de atividades mais aplicadas ou de supostas repercussões tecnológicas - poderia ocasionar danos sérios à ciência brasileira.

B. Recursos Humanos

Os grupos teóricos têm condições de formar um número adequado de alunos, inatidos o valor e as quotas das bolsas de estudo. Na área teórica, devido à maior oferta no mercado de trabalho, as instituições científicas poderão contratar docentes de um padrão cada vez mais elevado. É fundamental, no entanto, que se intensifiquem as atividades de intercâmbio científico e pós-doutoramento no Exterior. Alguns alunos de excepcional qualidade talvez ainda pudessem ser estimulados a fazer o doutoramento em grandes centros do Exterior. Na área experimental a situação é completamente diferente - há uma grande carência de pessoal qualificado.

C. Investimentos Necessários

Nos laboratórios existentes os investimentos necessários certamente são pequenos, da ordem de uns US\$ 5 milhões. Na área computacional exigem-se investimentos maiores, principalmente se for possível pensar num centro de supercomputação científica e no aparelhamento mínimo dos grupos existentes. Estes investimentos, no entanto, teriam repercussões em todas as áreas da física.

TABELA 7.1
PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOUTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO	
	T	E	T	E	I	M	D	M	D	78-82	83-87
UFCE	2	0	0	0	2	1	0	3	0	10	20
UFRN Mecânica Estatística	5	0	1	0	5	1	0	1	0	12	36
UFPB Mecânica Estatística	4	0	0	0	0	1	1	3	0	8	10
UFPE Física Estatística e Teoria da Matéria Condensada	7	0	0	0	7	6	2	15	9	34	51
UFAL	8	2	1	5	8	0	0			30	120
UFSE Regnetisao	1	0	1	0						2	1
UFBA 1. Física Teórica 2. Física de Superfícies	4	0	4	0	1	6	1	3	1	3	17
	2	0	0	0	2	1	0	0	0	0	6
CBPF Física Estatística	3	0	0	0	0	2	8	5	7	33	65
PUC-RJ Matéria Condensada	9	0	0	0	14	3	3	12	7	52	63

TABELA 7.1
 PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE

Continuação

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	R	D	A	D	78-82	83-87
UFF											
Fisica Estatistica	5	0	2	0	2	0	5	3	0	25	46
UFRJ											
1. Matéria Condensada	1	0	1	0	7	5	1	8	1	1	2
2. Baixas Temperaturas	0	6	0	2							19
UFMG											
Fisica da Matéria Condensada	12	0	0	0	2	4	5	23	8	43	77
UNB											
Teoria da Matéria Condensada	5	0	0	0	3	4	0	2	0		21
USP - SP											
1. Fisica Estatistica	7	0	0	0	3	3	6	11	4	19	30
2. Teoria da Matéria Condensada	1	0	0	0							
UNICAMP											
1. Fisica Estatistica	7	0	0	0	0	0	2	6	6	14	27
2. Fisica Teorica	6	0	0	0	0	6	1	3	2		30
3. Fisica da Matéria Condensada	2	0	0	0	1	0	0			15	3
4. Propriedades Eletrônicas	3	0	0	0	0	1	7	1	5	19	14
5. Propriedades Té- micas e Magnéticas	2										
6. Fisica Atômica e Molecular	4										
7. Eletroquímica	1										

TABELA 7.1
PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	R	D	M	D	78-82	83-87
USP-SBo Carlos	8	0	0	0	0	3	6	17	10	63	66
UFSCAR											
1. Física Estatística	1	0	0	0	1	2	1	0	1	12	22
2. Matéria Condensada	5	0	0	0	1	3	3	3	1	18	11
UFPR											
Física dos Fluidos	1	0	0	0	0	3	1	2	0	7	5
UFSC	2	0	0	0	1	2	0	3	0		
UFRGS											
1. Física Estatística e Teoria dos Sólidos	2	0	0	0	1	1	6	5	1	13	14
2. Propriedades eletrô- nicas de sólidos	6	0	1	0	8	1	1	3	4	14	24
UFSP											
Física da Matéria Condensada	2	0	2	1						0	5
TOTAL	128	6	13	9	65	59	60	132	67	447	805

TABELA 7.2
GRUPOS E LINHAS DE PESQUISA

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFCE	1977	Sistemas de baixa dimensionalidade Fenômenos fora do equilíbrio		
UFRN	1979	Fenômenos críticos e transições de fases; caos; autômatos celulares; redes de neurônios; vidros de spin; fractais		
UFPB Mecânica Estatística	1975	Fenômenos críticos Vidros de spin		
UFPE	1975	Transições de fases e fenômenos críticos Sistemas desordenados magnéticos e geométricos Magnetismo itinerante Semicondutores magnéticos Interações competitivas, caos e efeitos não lineares em sistemas magnéticos		
UFAL	1978	Transições de fases e fenômenos críticos Sistemas desordenados Magnetismo de superfície Sistemas fractais Autômatos celulares		
UFSE Magnetismo	1985	Física estatística de sistemas magnéticos de elétrons itinerantes		
UFBA 1. Física Teórica	1984	Sistemas dinâmicos Sistemas fractais Transições de fases Sistemas fora do equilíbrio Fundamentos de mecânica clássica e quântica		

TABELA 7.2
GRUPOS E LINHAS DE PESQUISA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INICIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
2. Física de Superfícies	1986	Microscopia iônica de campo Estrutura de superfícies Físico-química de catalizadores		
CBPF Física Estatística	1977	Sistemas magnéticos localizados Percolação, Teoria de grafos Fractais, sistemas dinâmicos não lineares, caos Redes de neurônios Biogênese Autômatos celulares Magnetismo itinerante e supercondutividade		
PUC-RJ Matéria Condensada	1971	Transições de fases e fenômenos críticos Propriedades eletrônicas de sólidos		
UFF Física Estatística	1981	Técnicas estatísticas Redes de neurônios Propriedades eletrônicas e magnéticas de sistemas com correlação forte Sistemas desordenados Autômatos celulares Supercondutividade	Grupo de renormalização Simulações com computadores	
UFRJ 1. Matéria Condensada 2. Baixas Temperaturas	1985 1972	Propriedades magnéticas de sistemas de terras raras Adsorção e solubilidade Sistemas magnéticos desordenados e de baixa dimensionalidade Instrumentação científica Calor específico de gases adsorvidos Supercondutividade a temperaturas altas.	Medidas criogênicas. Refrigerador de diluição Medidas de calor específico, magnetização e susceptibilidade magnética, condutividade térmica e elétrica. Técnicas de adsorção volumétrica, medidas de capacitância e perdas dielétricas.	1.000.000

TABELA 7.2
GRUPOS E LINHAS DE PESQUISA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS BÁSIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFRG Física da Matéria Condensada	1971	Transições de fases Fenômenos não lineares Sistemas abertos		
UNB Teoria da Matéria Condensada	1982	Semicondutores Metais e ligas Física estatística Magnetismo		
USP-SP 1. Física Estatística	1974	Transições de fases e fenômenos críticos Interações competitivas, sim- letras desordenados, fractais		
2. Teoria da Matéria Condensada	1976	Estados eletrônicos e proprie- dades magnéticas de ligas e metais amorfos Sistemas supercondutores		
UNICAMP 1. Física Estatística	1970	Fenômenos de relaxação em semi- condutores Transporte ultra-rápido em semi- condutores Propriedades ópticas de semi- condutores Hidrodinâmica generalizada Transporte não linear Metodologia em mecânica estatís- tica de não equilíbrio		
2. Física Teórica	1983	Dinâmica quântica de sub-sistemas Dinâmica quântica de caos Localização Espectro de sistemas caóticos Estrutura eletrônica Metais e ligas - propriedades eletrônicas		

TABELA 7.2
GRUPOS E LINHAS DE PESQUISA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UNICAMP				
3. Física de Matéria Condensada	1970	Supercondutividade a altas temperaturas Dinâmica de rede em metais		
4. Física de Matéria Condensada	1978	Magnetismo e fenômenos críticos Supercondutividade Valências intermediárias Efeito Jahn-Teller		
USP-São Carlos	1960	Transições de fases e fenômenos críticos Sistemas desordenados Redes neuronais Férrons pesados e supercondutividade		
UFSCAR	1981	Transições de fases e fenômenos críticos Sistemas eletrônicos de baixa dimensionalidade Propriedades de sistemas de muitos corpos Dinâmica molecular		
UFPR Física dos Fluidos	1985	Termodinâmica, teoria cinética e espalhamento de luz em fluidos		
UFSC	1979	Diagramas de fases de sistemas antiferromagnéticos Propriedades de superfícies		

TABELA 7.2
LINHAS E GRUPOS DE PESQUISA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INICIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFRGS 1. Física Estatística e Teoria dos Sólidos	1982	Fenômenos críticos em sistemas ordenados e desordenados Redes de neurônios Localização Supercondutividade		
2. Propriedades Eletrô- nicas de Sólidos		Valências intermediárias Liga metálicas e semicondutoras Férmions pesados e superconduti- vidade Autômatos celulares e agregados fractais		
UFPA Física de Matéria Condensada	:1982	Semicondutores Magnetismo Valência intermediária Implantação em sólidos		

TABELA 7.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 3 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO		CONDIÇÕES IDEAIS		EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	R	D	R	D	R	D	R	D
UFCE*	-	-	-	-	-	-	-	-
UFRN*	3	0	10	0	0	1	0	2
UFPB	-	-	-	-	-	-	-	-
UFPE	-	-	-	-	-	-	-	-
UFAL**	5	-	10	-	-	2	-	4
UFSE**	0	1	0	1	2	0	2	4
UFBA	15	2	30	4	0	2	0	4
CBPF	6	10	6	10	0	0	0	2
PUC-RJ	20	10	20	10	0	1	0	3
UFF	10	5	10	5	0	2	0	2
UFRJ	-	-	-	-	-	-	-	-
(1)	-	-	-	-	-	-	-	-
(2)	6	3	10	6	0	2	2	0
UFMG	18	10	25	15	0	1	0	3
URB*	10	0	15	5	0	2	0	3

TABELA 7.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO	CAPACIDADE DE FORNECIMENTO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	M	D	M	D	M	D	M	D
USP-São Paulo								
(1)	3	6	6	10	0	1	0	3
(2)					0	1	0	2
UNICAMP								
(1)	2	3	2	3	0	0	0	1
(2)	-	-	-	-	-	-	-	-
(3)	-	-	-	-	-	-	-	-
(4)	2	5	3	6	0	1	0	2
USP-São Carlos	8	8	10	12	0	1	0	2
UFSCAR*								
(1)	4	2	6	3	0	0	0	2
(2)	5	5	10	8	0	1	0	3
UFPR	10	5	10	5	1	3	3	3
UFSC**	-	-	-	-	-	-	-	-
UFRGS								
(1)	2	7	6	10	0	1	0	3
(2)	7	3	12	6	0	0	0	3
UFPA**	3	2	0	5	0	2	0	4
TOTAL	135	67	201	124	3	24	3	58

* Só tem programas de mestrado

** Não tem programas de pós-graduação

- Não há resposta

8. Cristalografia e Estrutura de Sólidos

8.1 DESCRIÇÃO

A. Introdução

A Cristalografia é considerada atualmente como uma disciplina básica na Física da Matéria Condensada. Como área de pesquisa, tem-se organizado desde a década de 40, agrupando uma comunidade científica com identidade própria que conta hoje com quase 9.000 cristalógrafos em todo o mundo (cerca de 100 no Brasil). As contribuições da Cristalografia à Mineralogia, Física, Química, Biologia, Ciência e Engenharia de Materiais tem estabelecido ligações estreitas entre os cientistas destas diversas áreas de pesquisa. A criação, em 1944, da União Internacional de Cristalografia, o aparecimento da Acta Crystallographica em 1948 e a liderança e empenho de grandes cientistas como O.L. Bragg, P.P. Ewald e outros, mantiveram a Cristalografia como disciplina distinta dentro das diversas áreas em que ela atua.

O nascimento da Cristalografia moderna é marcado pela descoberta da difração de raios-X por cristais pelo grupo de Max von Laue em 1912 e a determinação da primeira estrutura cristalina por W.L. Bragg no mesmo ano. A nova técnica de difração de raios-X permitiu a verificação experimental das teorias existentes sobre estruturas cristalinas devidas ao Abade René Just Hauy (1743-1826), as teorias de Navier, Cauchy e Poisson sobre deformação nos sólidos, e abriu caminho para o desenvolvimento da obra fundamental de Born sobre a dinâmica de redes (Dinamik der Kristallgitter, 1914).

Devido à íntima interrelação entre as propriedades físicas e o arranjo dos átomos nos líquidos e sólidos, o conhecimento estrutural da matéria, incluindo os aspectos estáticos e dinâmicos, as estruturas médias atômicas e magnéticas e as imperfeições (defeitos pontuais, deslocções, interfaces), é essencial para a pesquisa em Física da Matéria Condensada. A Cristalografia tem como finalidade principal a determinação da estrutura da matéria, nos diferentes graus de ordenação que ela pode apresentar e nas diferentes escalas (atômica e superatômica). As técnicas experimentais de difração e de espalhamento de raios-X são, na maioria dos casos, as ferramentas principais em Cristalografia. A interação dos raios-X com a matéria dá lugar também a outros fenômenos que originaram aplicações, também importantes, nos estudos estruturais, tais como as espectroscopias de emissão (fluorescência) e absorção (EXAFS). A difração e o espalhamento de nêutrons e de elétrons ocupam também um lugar relevante entre as técnicas usadas pelos cristalógrafos.

A análise e interpretação dos resultados de difração e espalhamento de raios-X exige conhecimentos aprofundados da interação da radiação com a matéria, de formalismos de Física e Matemática teóricas e aplicadas (transformadas de Fourier e técnicas computacionais de transformadas inversas) e de Física da Matéria Condensada. É necessário um conhecimento específico em Cristalografia para se poder extrair

das técnicas cristalográficas o conteúdo científico necessário às pesquisas interdisciplinares. É este fato que define a necessidade dos pesquisadores formados em física básica e interessados nestes temas, de estarem diretamente vinculados aos laboratórios de Cristalografia.

B. Aplicações em Pesquisa

A escolha da técnica a ser utilizada para registrar a difração de raios-X, nêutrons ou elétrons, depende do tipo de informação desejada. Os métodos de cristal único são os mais apropriados para a determinação de estruturas médias e para o estudo das imperfeições da rede cristalina.

Os estudos da estrutura média de cristais únicos visam a determinação do grupo de simetria, os parâmetros de rede e as posições atômicas da unidade assimétrica. Progressos importantes nesta área foram a introdução de novas técnicas matemáticas de resolução estrutural (métodos diretos) e o desenvolvimento de diversos métodos de determinação de fases das reflexões de Bragg, como os de substituição isomórfica, espalhamento anômalo e difração múltipla. O conhecimento parcial do conjunto de fases facilita o processo de síntese de Fourier que conduz à determinação da estrutura atômica dos sólidos cristalinos.

A utilização de técnicas de pó cristalino representa, muitas vezes, o único caminho para obter difratogramas no caso de amostras em que é difícil obter monocristais ou para o estudo de mudanças de estrutura e transições de fase em amostras submetidas a altas pressões, campos magnéticos, variações de temperatura, etc. Os avanços recentes nos métodos de análise dos dados provenientes da difração por pó cristalino (método de Rietveld e outros) tem possibilitado a determinação de algumas estruturas com precisão comparável à obtida nas experiências de cristal único.

Muitas propriedades físicas são mais sensíveis às imperfeições da estrutura do que ao tipo de arranjo atômico médio. Por isso, além de pesquisar as estruturas atômicas médias dos cristais, os cristalógrafos estudam as características dos defeitos de periodicidade estáticos (associados a impurezas, vacâncias, superfícies externas, interfaces), e dinâmicos (fônons). A detecção e análise do espalhamento inelástico de nêutrons e, recentemente, de raios-X com fontes de síncrotron (Peisl, 1988), são realizadas para a determinação das funções de dispersão de sólidos cristalinos.

Os métodos de difração de nêutrons, e recentemente também de raios-X, são também utilizados para a determinação da estrutura magnética dos sólidos cristalinos.

A difração produzida por líquidos e sólidos amorfos consiste em bandas difusas em contraposição com as reflexões nítidas e estreitas dos materiais cristalinos. Um tratamento cuidadoso da intensidade espalhada eliminando contribuições parasitas, permite obter dados estruturais a partir da função de distribuição radial (RDF). As distâncias entre primeiros vizinhos e o número de coordenação podem ser obtidos para sólidos amorfos simples. No estudo de sistemas amorfos de vários componentes, o uso do

método de substituição isomórfica e do efeito de dispersão anômala utilizando o espalhamento obtido com feixes de dois comprimentos de onda diferentes, perto dos limiares de absorção das várias espécies atômicas e outro afastado das mesmas, permite simplificar o tratamento analítico do problema para a obtenção das funções parciais (associadas a cada tipo de átomo) de distribuição radial. Atualmente o estudo de estruturas amorfas com 3 ou mais componentes continua sendo tema em aberto.

Diversos materiais moleculares apresentam fases cuja estrutura tem um ordenamento parcial, com um grau intermediário entre os dos sólidos cristalinos e amorfos. Trata-se das mesofases dos cristais líquidos (termotrópicos e liotrópicos), cujo ordenamento molecular pode ser apenas orientacional ou também posicional em 1, 2, 3 dimensões. Estes tipos de estrutura são também observadas em sistemas micelares e membranas biológicas. Os diagramas de difração de raios-X (ou nêutrons) produzidos por estes materiais são variados, podendo ser constituídos somente por domínios difusos ou incluir também reflexões bem definidas, dependendo do grau e tipo de ordenamento. As experiências de difração permitem em geral a elaboração de modelos estruturais moleculares ou supermoleculares que permitem explicar diversas propriedades físico-químicas e as anisotropias observadas nestes materiais. Elas contribuem também à compreensão das funções das micelas e membranas biológicas.

A estrutura dos polímeros se caracteriza também por um grau de ordenamento intermediário entre os sólidos cristalinos e amorfos. Estes materiais tem, em geral, estrutura heterogênea com regiões mais ordenadas ("cristalinas") e desordenadas, sendo as frações de cada fase dependente do processo de obtenção. As fases cristalinas podem ter correlações orientacionais. A difração de raios-X é comumente utilizada para a caracterização estrutural dos polímeros (determinação da fração de fase cristalina, orientação preferencial, etc).

As técnicas espectroscópicas, EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure), XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) e SEFAXS (Surface Sensitive Extended X-ray Absorption Fine Structure) são baseadas na análise da estrutura fina oscilatória que aparece no lado das altas energias das descontinuidades nos espectros de absorção de raios-X. A análise se estende até várias centenas de eV a partir do limiar de absorção no caso de EXAFS e SEFAX, ou se limita a alguns eV no caso do Xanes. As aplicações principais destas técnicas têm sido as determinações de estrutura atômica de materiais amorfos, estruturas locais ao redor de impurezas em materiais cristalinos e estruturas de catalizadores. Atualmente, a técnica de SEXAFS, usando radiação de síncrotron, está sendo utilizada para estudo de superfícies e interfaces em sistemas epitaxiais, adsorção física e química em superfícies, etc.

O espalhamento central difuso de raios-X (SAXS, Small Angle X-ray Scattering) e o espalhamento de nêutrons a baixos ângulos (SANS, Small Angle Neutron Scattering) são técnicas bem estabelecidas para o estudo de sólidos porosos ou com segregação de fases e de partículas em solução. A determinação de parâmetros dimensionais e de forma das heterogeneidades nesses materiais (poros, agregados ou partículas) é feita a partir da análise das curvas de intensidade, por métodos de cálculos apropriados a cada sistema. Recentemente a técnica de SAXS vem se aplicando com sucesso ao estudo de processos de

formação de estruturas fractais a partir de soluções monoméricas ou de colóides. A técnica de SAXS se beneficia particularmente da radiação síncrotron devido, em geral, às baixas intensidades do espalhamento e às possibilidades que oferece de se obter resultados experimentais livres de aberrações ópticas de se poder realizar experiências cinéticas com uma resolução até de milissegundos.

Finalmente, entre os temas de pesquisa de fronteira, devemos mencionar o estudo de fases quasi-cristalinas (quasi-crystals), a determinação das características de fases incomensuráveis, a cristalografia de poucas camadas atômicas (eventualmente monocamadas) sobre superfícies sólidas e a determinação das estruturas de moléculas biológicas complexas. A disponibilidade da radiação de síncrotron, junto com o desenvolvimento de novos métodos computacionais e complexos sistemas de coleta de dados, e o uso de estações gráficas tem levado recentemente à resolução da estrutura dos vírus causantes de diversas doenças como a gripe e a poliomielite. A determinação da estrutura dos centros de reação fotossintética, complexos de proteínas e pigmentos responsáveis pela fotossíntese, representou para os autores a obtenção do Prêmio Nobel de Química em 1988. Este é o 24o. Prêmio Nobel em Física ou Química que é associado a pesquisas com técnicas cristalográficas.

C. Aplicações Tecnológicas

As técnicas cristalográficas e outras técnicas experimentais utilizadas na física da matéria condensada, são imprescindíveis em laboratórios dedicados à pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Os métodos de difração são comumente utilizados em pesquisas tecnológicas e até em processos industriais de obtenção e controle de qualidade de materiais. As aplicações mais relevantes nas áreas com implicações tecnológicas são: determinação de composição de fases cristalinas, análise de textura, determinação de tamanho de cristais, determinação de densidade de deslocamentos (topografia), estudo de defeitos pontuais em silício livre de deslocamentos, orientação de monocristais, análise de tensões residuais em peças, determinação de austenita retida em aços, mineralogia e petrologia de solos, caracterização de catalizadores, caracterização de produtos naturais e fármacos, engenharia de proteínas e outras.

D. Instrumentação

As possibilidades de aplicação das técnicas cristalográficas em estudos estruturais têm avançado enormemente nas últimas duas décadas. Desde as primeiras experiências de difração de raios-X, em 1912, até a década de 60, os progressos quanto aos meios disponíveis para os estudos cristalográficos foram escassos, utilizando-se durante 50 anos fontes e detectores similares. A partir de fins da década de 60 os progressos técnicos e metodológicos foram dramáticos. A disponibilidade de fontes mais potentes (geradores de anodo rotatório e fontes de luz síncrotron), computadores de grande porte e detectores sensíveis à posição, permitiram progressos enormes nas pesquisas de estrutura da matéria condensada.

A disponibilidade de computadores de grande porte possibilitou a aplicação de métodos de resolução de estrutura, que haviam sido desenvolvidos no passado, mas que requeriam complexos cálculos. O exemplo mais evidente é o método de Karle e Hauptmann, que foi desenvolvido na década de 50 mas que somente começou a se difundir com o uso de grandes computadores. Isto fez com que Karle e Hauptmann recebessem o prêmio Nobel pelo seu trabalho teórico 30 anos depois de sua publicação.

As fontes de raios-X clássicas utilizam tubos selados de potência nominal da ordem de 1 KW. A partir da década de 60 começaram a ser utilizados os geradores de anodo rotatório com uma potência de 6 a 100 KW e, na década de 70, as fontes de luz síncrotron. Estas fontes são constituídas por um anel de acumulação de elétrons ou pósitrons. Os anéis com elétrons de energia da ordem de 2 GeV ou superior e corrente da ordem de 100 mA, geram um espectro de radiação eletromagnética intenso que inclui fótons com energia da ordem de 10 KeV, que são utilizados correntemente nas experiências de difração e espalhamento de raios-X. Estas fontes produzem um espectro contínuo, pulsado e polarizado de intensidade 10⁴ vezes maior que a das linhas de emissão características das fontes de raios-X convencionais e entre 10² e 10³ vezes maior que as fontes de anodo rotatório. Esse fator de acréscimo é bem maior se compararmos os espectros de emissão das fontes de luz síncrotron com a região contínua dos espectros das fontes convencionais. Isto fez com que as técnicas que utilizam feixe branco como a de Laue, EXAFS e XANES se desenvolvessem significativamente.

Os detectores de raios-X utilizados até a década de 60 eram filmes fotográficos e detectores de gás (Geiger-Muller, câmaras de ionização ou proporcionais). A partir da década de 60 começaram a ser utilizados os detectores de estado sólido Ge(Li) e Si(Li), permitindo uma resolução em energia superior à dos detectores a gás, e os detectores sensíveis à posição a gás ou de estado sólido (CCD e Reticon). Os detectores sensíveis à posição equivalem a aproximadamente 100 detectores clássicos em paralelo.

A associação de fontes de síncrotron e detectores sensíveis à posição permitiram a realização de experiências impossíveis antes da disponibilidade destes instrumentos. Citaremos dentre elas os estudos de reconstrução de estrutura superficial de semicondutores, estrutura de interfaces e de monocamadas adsorvidas, cinéticas de EXAFS (variações estruturais rápidas), estruturas magnéticas, espalhamento inelástico, segregação superficial, dinâmicas de deslocamentos e de cristalização, etc.

A Cristalografia atravessa um momento de forte progresso já que a potência das fontes e a eficiência e resolução dos novos detectores em construção, e em desenvolvimento, não cessam de aumentar. As fontes de luz síncrotron de 3ª geração e de alta energia ($E > 6$ GeV) em construção na França, USA e Japão, constituídas por onduladores inseridos em anéis de acumulação, fornecerão um ganho de brilhância adicional de no mínimo 10⁴ com respeito aos anéis atualmente em uso. Estas fontes estarão em operação a partir de 1993. Por outro lado, prevê-se para um futuro próximo a produção comercial de um detector que reúne as condições ideais quanto à resolução espacial, à eficiência e ao intervalo dinâmico. Trata-se das "imaging plates" desenvolvidas recentemente no Japão e cuja difusão levará, provavelmente, a substituir com vantagem a maior parte dos detectores atualmente em uso.

Os progressos tecnológicos associados às fontes de raios-X (anodos rotatórios, síncrotron) e também de nêutrons, aos detectores e aos meios de cálculo, fazem com que os laboratórios de Cristalografia possam realizar pesquisas com maior resolução espacial e temporal e estudos estruturais mais complexos. Evidentemente os equipamentos necessários para a realização de muitos tipos de pesquisas de fronteira na Cristalografia moderna, têm custo e complexidade bem maior que os convencionais. Isto faz com que a implantação de novos laboratórios, ou a modernização dos atuais, precise necessariamente de investimentos relativamente importantes e de um maior esforço de formação de pessoal científico e técnico, assim como de uma infraestrutura de apoio mais completa.

8.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

As pesquisas utilizando técnicas de difração de raios-X tiveram início nos anos 50, quando E.Távora, após doutoramento nos EUA com M.J. Buerger no MIT, retornou à Faculdade Nacional de Filosofia do Rio de Janeiro. As suas pesquisas contribuíram à formação de físicos e químicos nesta área. É o caso de Y. P. Mascarenhas quem, após formação no Rio e em Pittsburgh, EUA, deu início em 1961 à instalação do Laboratório de Cristalografia de São Carlos, com ênfase em cristalografia estrutural de cristais únicos. A partir das atividades desse laboratório e dos contatos internacionais efetuados através dele, alguns novos grupos se instalaram no País. C.Cusatis, após mestrado nos EUA (1969), doutoramento no IFQSC-USP e pós-doutoramento em Bristol, Inglaterra, implantou a linha de óptica de raios-X na UFPr. A. Craievich, após doutoramento em Orsay, França, foi convidado para se fixar em São Carlos, onde iniciou pesquisas por espalhamento de raios-X em baixo ângulo de sólidos amorfos na início da década de 70.

No início dos anos 70, dois laboratórios começaram pesquisas em cristais naturais: o de Física dos Cristais da UFGO (A. Ghirardi) e o de Cristalografia da UFBA, este com a vinda de Z. Baran da Polônia.

Em 1963 o IEA (atual IPEN) decidiu iniciar pesquisas na área de Física da Matéria Condensada. Foi assim implantado o grupo de difração de nêutrons (C. Parente) e, no final da década de 60, o grupo de difração de raios-X, com a vinda de S. Caticha-Ellis do exterior, que começou a investigar defeitos produzidos por irradiação em monocristais.

A transferência de S.Caticha-Ellis para Campinas, em 1971, definiu o início do Laboratório de Cristalografia da UNICAMP, com atividades centradas, principalmente, em Cristalografia Física, defeitos em cristais e teoria da difração. A incorporação de S. Chang e I. Torriani, chegados dos Estados Unidos em 1974, marcou o começo nesse grupo de diversas aplicações da difração múltipla de raios-X e da difração e espalhamento de raios -X em baixo ângulo.

Em 1974, a partir das atividades inicialmente desenvolvidas no IEA, se formou o Laboratório de Cristalografia do IFUSP, com pesquisas sobre defeitos em cristais (C.A. Pimentel) e em cristais líquidos (L.Q. Amaral).

Na década de 1980 cerca de uma dezena de novos laboratórios de Cristalografia foram implantados, a maior parte dos quais não atingiram um grau satisfatório de desenvolvimento devido às dificuldades de se obter financiamento para os projetos de pesquisa.

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) começou as suas atividades em 1987 e prevê a construção de uma fonte e radiação de amplo espectro (ultra-violeta e raios-X) num prazo de 6 anos. Esta fonte deverá ser utilizada por pesquisadores de diversas áreas de pesquisa em Física, Química, Biologia e Ciência dos Materiais. Um número significativo de cristalógrafos já realizaram experiências com fontes de luz síncrotron no exterior, o que permite prever um potencial significativo de aplicação futura da fonte do LNLS na área de Cristalografia.

B. Situação Atual

Existem atualmente várias dezenas de laboratórios nas áreas de pesquisa de Física, Química, Biofísica, Geologia e Ciência dos Materiais que dispõem de laboratórios de difração de raios-X. Muitos deles utilizam a difração como técnica experimental auxiliar, por exemplo na caracterização de minerais, obtenção e desenvolvimento de novos materiais ou o estudo de propriedades físicas e químicas várias. Dentre eles contam-se aproximadamente 20 laboratórios de Cristalografia cujos objetivos principais são as pesquisas de estrutura de sólidos cristalinos e amorfos, imperfeições, etc., utilizando frequentemente outras técnicas auxiliares (espectroscopia, ATD, ATG, MET, MEV, SAD, microanálise de raios-X) para a elaboração de modelos estruturais e, às vezes, realizando medidas físicas ou correlacionando os estudos estruturais com propriedades físicas já estudadas.

No Quadro 1, estão listados os 15 grupos que responderam o questionário da Sociedade Brasileira de Física, que pesquisam, principalmente, aspectos estruturais da matéria condensada e as suas linhas de pesquisa e técnicas relevantes. Outros grupos que utilizam técnicas de difração, e que também responderam o questionário, não foram incluídos no quadro por serem as suas atividades associadas à Cristalografia de interesse apenas parcial. Eles são: IPD/CTA (Materiais), UNESP-Araraquara (Materiais), DEMA-UFSCar (Materiais polímeros e cerâmicos), UNESP-Riô Claro (Petrologia) e UNICAMP (Grupo de Carvão e Combustíveis Alternativos).

Dos 15 grupos da área de Cristalografia listados no quadro 1, 12 utilizam técnicas de difração e espalhamento de raios-X, 1 (IPEN) dispõe de facilidades para o estudo de difração de nêutrons e 2 (IFUSP, Propr. Mec., UFPR), utilizam a microscopia e/ou a difração eletrônica. Vários deles utilizam a microscopia óptica e outras técnicas auxiliares. A fonte de nêutrons do IPEN, em funcionamento há mais de 20 anos, é a única existente na América do Sul destinada a estudos da estrutura da matéria

TABELA 8.1
GRUPOS DE PESQUISA - SITUAÇÃO ATUAL

INSTITUIÇÃO GRUPO	ESTAGIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFPA Química	C I I	Determinação de estruturas de monocristais Crescimento de cristais Dinâmica molecular	Espectrofotometria Microscopia óptica	s/d
UPBA Física	I I I	Teoria da difração de raios-X Metodologia experimental em técnicas de difração Física e caracterização de defeitos em cristais	Difratometria de policristais Topografia de raios-X Técnicas de Laue e Debye-Scherrer	200.000
UNB Geologia	C I	Estrutura de nióbio-tantalatos e laferitos Cristalografia de gemas	Microscopia óptica Difratometria de raios-X	s/d
UFGO Física	I I	Cristalografia por difração de raios-X Cristalografia óptica	Difratometria de raios-X Espectrofotometria Refratometria	140.000
UFMG Química	I	Determinação de estruturas de monocristais	Difratometria de monocristais (Câmara de Weissenberg)	s/d
UFRJ Física	C I I I	Propriedades estruturais de compostos moleculares Determinação de estruturas cristalinas Instrumentação para difração de raios-X Métodos computacionais associados à difração de raios-X	Difratometria de policristais Difratometria de monocristais	450.000
CBPF	C I	Transições de fase e estrutura de sólidos iônicos e cristais moleculares Instrumentação	Difratometria de policristais SAXS (Kratky) Câmara de Guinier	250.000
UNESP-Físico-Química Araraquara	I	Determinação de estruturas de monocristais	s/d	s/d

TABELA B.1
GRUPOS DE PESQUISA - SITUAÇÃO ATUAL

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	ESTAGIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IFQSC - USP Física	C	Cristalografia de pequenas moléculas (monocristais)	Difratometria de policristais SAXS	800.000
	I	Cristalografia estrutural (Rietveld)	Difratometria de monocristais (Câmara de Weissenberg)	
	I	Caracterização de monocristais	Difratometria (autoética) de monocristais	
	C	Matérias amorfas e soluções		
UNICAMP Física	C	Teoria de espalhamento de raios-X. Laser de raios-X	Difratometria de policristais Difração múltipla (monocristais)	600.000
	C	Espalhamento de raios-X por sólidos porosos e macromoléculas em solução	SAXS Topografia de raios-X	
	C	Difração de raios-X por polímeros e sistemas biológicos		
	C	Difração múltipla de raios-X		
	C	Caracterização de materiais semicondutores		
IPEN- Física Dif. de Nêutrons	C	Difração múltipla de nêutrons	Difratometria de nêutrons	400.000
	C	Análise de texturas cristalinas	Técnicas de baixas temperaturas	
IFUSP Cristalografia	C	Cristais líquidos e sistemas azelares	Difratometria de policristais SAXS	400.000
	C	Defeitos em semicondutores	Difratometria de Laue, monocristais	
	C	Amorfos	Microscopia óptica	
	I	Polímeros	Difratometria de duplo cristal	
	C	Vídeos e gás		
	I	Membranas óptica de cristais líquidos		
IFUSP Microscopia Eletrônica	C	Transformações de fase a altas temperaturas	Microscopia eletrônica de transmissão	500.000
	C	Biofísica	Microscopia eletrônica de varredura Difração eletrônica de área selecionada (no RET) Canalizações eletrônicas Microanálise de raios-X	

TABELA 8.1
GRUPOS DE PESQUISA - SITUAÇÃO ATUAL

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	ESTÁGIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFPR Física Cristalografia	C C	Óptica de raios-X Instrumentação	Interferometria de raios-X Sistemas de precisão para orientação e corte de monocristais Difratometria de duplo cristal e topografia	500.000
UFPR Física-Propriedades Mecânicas	C I	Ação de radiações e implantação de íons Crescimento de cristais	Microscopia óptica Dispositivo para microdureza Fornos para tratamentos térmicos	32.000

s/d: sem dados

condensada. Existem no Brasil outros laboratórios de microscopia e difração de elétrons, mas eles não estão, em geral, em Departamentos ou Institutos de Física.

As pesquisas em Cristalografia de pequenas moléculas (estrutura atômica de celas unitárias) continuam recebendo o interesse principal no grupo do IFQSC, onde foram começadas na década de 60. Além deste grupo vários outros se interessam por estas pesquisas como o da UNESP (Araraquara), UFAJ e UFMG. Estes grupos trabalham em colaboração com o IFQSC utilizando o seu difratômetro automático de monocristais, que é o único em funcionamento no Brasil. Um segundo está atualmente sendo reativado no Instituto de Física da UFRJ.

Os estudos de cristais naturais recebem interesse particular dos grupos da UFGO, UFBA e UnB.

As pesquisas de defeitos em cristais naturais mediante técnicas de espalhamento de raios-X, são realizadas nos grupos da UNICAMP e UFBA.

A técnica de SAXS foi implantada no IFQSC, na UNICAMP e no IFUSP, para estudos estruturais de separação de fases em vidros e proteínas em solução (IFQSC), proteínas em solução e membranas biológicas (UNICAMP), micelas e cristais líquidos litotrópicos (IFUSP).

Os métodos de difração de Laue monocromático e de microscopia óptica são utilizados no IFUSP para o estudo de cristais líquidos.

A difração múltipla de raio-X (UNICAMP) e nêutrons (IPEN) é utilizada para pesquisas de defeitos em sólidos diversos.

Os defeitos em monocristais são estudados com técnicas de topografia (IFQSC, UNICAMP, UFPr), difração rasante (UNICAMP), espalhamento difuso e perfil de reflexão (UNICAMP, IFUSP, UFPr). A implantação de equipamentos para a obtenção de semicondutores heterogêneos (MBE, MOCVD) em diversos laboratórios, fez crescer o interesse de vários grupos de Cristalografia pela pesquisa desses materiais.

Recentemente o interesse generalizado pelos supercondutores de alta temperatura também se manifestou nos laboratórios de Cristalografia. Foram realizadas pesquisas cristalográficas nestes materiais nos grupos do IFQSC, UNICAMP, UFRJ e CBPF.

O LME do IFUSP estuda as transformações de fase em altas temperaturas (até 1500°C) de minerais não metálicos e materiais sintéticos visando a obtenção de novos materiais.

A microscopia óptica é utilizada como técnica principal para estudos de defeitos em sólidos pelo grupo de Propriedades Mecânicas da UFPr e como método complementar na maior parte dos laboratórios.

Outras técnicas e aplicações importantes da difração de raios-X foram implantadas ou estão em processo de implantação. Elas são: interferometria de raios-X (UFPr), cristalografia de proteínas (IFQSC) e estrutura atômica de sólidos amorfos (IFUSP).

A situação atual nos laboratórios de Cristalografia varia segundo o grau de desenvolvimento dos mesmos. Se considerarmos como laboratórios "consolidados" aqueles que dispõem de um número significativo de doutores (orientadores), uma infraestrutura experimental satisfatória, uma produtividade científica relevante a nível internacional, e um número importante de teses concluídas, vemos a partir dos dados dos Quadros 1 e 2, que somente os grupos de Cristalografia do IFQSC, UNICAMP e do IFUSP atingiram esse nível. Em cada um deles trabalham entre 5 e 11 doutores, foram formados na última década entre 14 e 23 alunos de pós-graduação e publicaram nos cinco últimos anos entre 40 e 62 artigos científicos em revistas internacionais com árbitro.

Vários grupos de Cristalografia implantados na década de 70 se encontram ainda "em consolidação" já que eles não atingiram, até o presente, o tamanho crítico quanto ao seu volume e produtividade. Eles são os do IPEN, UFPr, UFGO, UNESP - Araraquara e UnB. Estes grupos tiveram maiores dificuldades que os já consolidados para a instalação da infra-estrutura experimental, contratação de recursos humanos e formação de pesquisadores, por razões várias.

Finalmente, existe um conjunto de grupos de Cristalografia "em implantação", que inclui os novos laboratórios formados na presente década. Eles são os do CBPF, UFRJ, UFAI e UFMG. Aos acima mencionados devemos adicionar os grupos incipientes que não responderam o questionário e que estão começando a implantar laboratórios de Cristalografia em numerosas instituições. Eles são, em geral, liderados por doutores ou mestres formados nos grupos consolidados. Existem laboratórios incipientes na UNESP-Presidente Prudente, UNESP-S.José do Rio Preto, U.E. Maringá, USP-Ribeirão Preto, USP-Baurú, UFSC e outros.

A disponibilidade de fontes de radiação de síncrotron em numerosos centros do Exterior e as possibilidades singulares que elas oferecem, fizeram que um importante número de físicos e químicos em geral, e cristalógrafos, em particular, se interessassem na utilização deste equipamento experimental. Pesquisadores do IFQSC, UNICAMP, IFUSP, UFBa, UFPr, UFGO e CBPF já realizaram projetos experimentais relacionados com Cristalografia em centros de radiação síncrotron de diversos países.

Os dados do Quadro 2, referente à pessoal científico e produtividade, permitem concluir que existe uma clara concentração de pesquisa em Cristalografia no Estado de São Paulo, onde estão localizados os grupos consolidados (IFQSC, UNICAMP, IFUSP). Nestes laboratórios foram realizadas as pesquisas que correspondem a mais de 75% das publicações científicas na área. Uma das razões responsáveis por esta concentração é o auxílio da FAPESP, que contribuiu sensivelmente ao desenvolvimento dos diversos grupos de Cristalografia do Estado de São Paulo.

TABELA 8.2
PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO		OBSERVAÇÕES
	T	E	T	E	IC	M	D	M	D	78-82	83-87	
UFAL Química	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	12	Grupo implantado em 1983
UFBA Física	3	1	1	0	0	2	0	4	0	6	4	
UNB Geologia	0	3	0	2	1	0	0	0	0	3	2	
UFGO Física	0	3	0	2	2	0	0	0	0	2	5	
UFSC Química Química	0	2	0	3	2	0	0	0	0	0	2	Grupo implantado em 1985
UFRJ Física	0	1	2	1	0	0	3	0	0	0	0	Grupo implantado em 1986
CSPP	0	1*	0	2	1	0	2	2	0	0	24	Grupo implantado em 1982 * Até 1986
UNESP Fis.-Química Araraquara	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	3	
IFQSC-USP Física e Química	0	11	0	0	4	3	3	12	6	44	62	
UNICAMP Física	2	5	0	0	0	7	4	20	3	28	50	

TABELA B.2
 PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO		OBSERVAÇÕES
	T	E	T	E	IC	M	D	M	D	78-82	83-87	
IPEN-Física Dif. Nêutrons	0	1	0	1	1	2	1	3	0	0	2	
IFUSP Cristalografia	0	3	0	0	5	3	4	8	6	8	40	
IFUSP Microscopia Eletrônica	0	3	0	2	2	1	3	3	1	15	10	
UFPR Física/Cris- talografia	0	2	0	1	3	2	0	0	0	2	2	
UFPR Física-Propr. Mecânicas	0	1	0	3	1	4	0	4	0	4	3	
TOTAIS	5	43	3	17	22	24	20	56	16	117	221	
		48		20		66		72		338		

Todos os grupos mantêm colaborações várias, tanto a nível nacional como internacional. A possibilidade de uso do difratômetro automático do IFQSC é aproveitada por pesquisadores de vários grupos. A existência no laboratório da UFPr de facilidades para a fabricação de monocromadores e um programa de instrumentação, permitiu colaborações concretas com vários outros grupos. Foram realizados neste laboratório monocromadores para a UFBA, goniômetros de duplo eixo para o IFUSP, IFQSC e Telebrás, módulos eletrônicos para o IFQSC e o LNLS. O grupo do CBPF colaborou com o do IFUSP na realização de um detector sensível à posição. Há uma colaboração entre o IFQSC e o LNLS para o desenvolvimento e construção de um difratômetro de líquidos.

As interações envolvem não somente os laboratórios de Cristalografia. Existem numerosas colaborações com laboratórios de outras áreas da Física, Química, Biologia e Engenharia de Materiais.

Todos os grupos de Cristalografia mantêm contatos com instituições estrangeiras, alguns deles mediante convênios formais e outros num esquema informal. A maior parte tem contatos com laboratórios de radiação síncrotron: IFQSC - Daresbury, UNICAMP - LURE e Daresbury, IFUSP-LURE e Brookhaven, UFBA e UFPr - LURE.

O único laboratório que realiza uma colaboração direta com a indústria, em caracterizações sistemáticas de matérias primas e materiais cerâmicos, é o de Microscopia Eletrônica do IFUSP. A colaboração da maioria dos grupos com a indústria é, no presente, episódica e se reduz à caracterização de materiais (cerâmicas, catalizadores, fármacos) mediante técnicas de difratometria de policristais. A maior parte dos grupos manifesta interesse e menciona as aplicações potenciais das técnicas de difração em problemas industriais. A pouca interação parece se dever à falta de conhecimento recíproco quanto aos problemas tecnológicos que podem ser resolvidos e ao potencial das técnicas cristalográficas. Uma colaboração concreta, efetiva e de vulto com a indústria precisa de contatos mais estreitos e de um crescimento dos laboratórios de pesquisa (em equipamento e pessoal). Provavelmente outra razão que reduz a colaboração é a tendência das grandes indústrias de dispor de laboratórios próprios para suas necessidades. Existem equipamentos de difração de raios-X em numerosos laboratórios industriais de pesquisa, desenvolvimento e controle de qualidade. Citaremos dentre eles o CENPES (Petrobrás), Cia Vale do Rio Doce, Rhodia (Santo André), ABC XTAL (Rio de Janeiro), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (São Paulo), EMBRAPA (Rio de Janeiro), Telebrás (Campinas), FTI (Lorena), diversas indústrias metalúrgicas, etc.

C. Carências e Dificuldades

A Cristalografia no Brasil cresceu significativamente nas últimas duas décadas, sendo o seu nível atual claramente superior ao dos outros países da área latino-americana. O volume de atividades é, porém, inferior ao dos países desenvolvidos. Na área de Cristalografia houve um apreciável investimento em formação de recursos humanos, no Exterior e no Brasil, mas os recursos adicionais imprescindíveis para

a manutenção e renovação de equipamentos e contratação de pessoal não foram suficientes para a consolidação de uma fração apreciável dos grupos formados.

O número de estudantes de pós-graduação é de aproximadamente 2 por doutor nos laboratórios consolidados. A dificuldade de contratação faz com que a maior parte dos formados não permaneça nos grupos. Eles se dirigem a outras instituições, geralmente de grau de desenvolvimento menor ou em implantação e, em geral, sem a infra-estrutura necessária para realizar pesquisa a curto prazo.

As carências e dificuldades mais apontadas pelos grupos consolidados são relacionadas com a contratação de pessoal científico e técnico, as demoras nas importações e a impossibilidade de renovação de equipamentos e reposição de acessórios.

Os grupos não consolidados apontam dificuldades várias, tais como, falta de equipamentos de pesquisa, exagerada burocracia, muito envolvimento em tarefas docentes, falta de recursos mínimos para manutenção de equipamentos, escassez de bibliografia, impossibilidade de contratações e, em alguns casos, falta de apoio institucional para a realização de pesquisas.

Os investimentos realizados nos laboratórios "consolidados" e "em consolidação", incluindo os equipamentos principais e acessórios, vão de US\$ 300.000,00 (trezentos mil dólares) a pouco mais de US\$ 1.000.000,00 (um milhão de dólares). A sofisticação crescente dos equipamentos experimentais faz com que a modernização dos laboratórios necessite de investimentos relativamente importantes. Os detectores sensíveis à posição uni e bidimensionais, geradores de raios-X de anodo rotatório de alta potência, computadores, "work-stations" e outros equipamentos, atualmente utilizados correntemente no Exterior, são de custo relativamente elevado o que dificulta a sua aquisição nas condições financeiras atuais dos organismos de apoio à pesquisa.

8.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Planos dos Grupos

A maior parte dos grupos de pesquisa inclui nos seus planos a consolidação dos programas em andamento, o que reflete uma preocupação pela manutenção, nas circunstâncias atuais de dificuldades financeiras, do nível presente de atividades. Quase todos os grupos manifestam, porém, a intenção clara de expandir as suas atividades e abrir novas linhas de pesquisa.

As novas linhas de pesquisa dos diversos grupos estão listados no Quadro 3. O projeto de implantação de um programa de Cristalografia de proteínas no IFQSC, é de clara importância para a Biologia Molecular. Os trabalhos teóricos sobre laser de raios-X e fontes de raios-X internas, a implantação de novas técnicas de importância para o estudo de semicondutores (ondas estacionárias) e os estudos de

TABELA 8.3
PERSPECTIVAS PARA OS PROXIMOS 5 ANOS - TÉCNICAS E INVESTIMENTOS

INSTITUICAO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS E APARELHOS	INVESTIMENTOS US\$
UFAL Química	Estudos de argilas ativadas Estrutura de polímeros	s/d	s/d
UFBA Física	Física e Caracterização de defeitos em sólidos Dinâmica de defeitos em tempo real Aplicação da teoria dinâmica de raios-X à difração de elétrons de fonte externa (microscopia eletrônica) e interna (estado sólido)	Utilização de fontes de luz síncrotron Técnica de feixe divergente Topografia de cristal duplo e tempo real	130.000
UNB Geologia	Consolidação de linhas existentes	Difratometria automática de raios-X	s/d
UFGO Física	Consolidação de linhas existentes	Topografia de raios-X Difração e fluorescência de raios-X	120.000
UFMG	s/d	s/d	s/d
UFRJ Física	Transições de fase de cristais moleculares a altas e baixas temperaturas Estudos de defeitos em mono e poli-cristais Estudo de monocristais a altas pressões por difração de raios-X	Difratometria de alta e baixa temperatura e alta pressão para estudos de defeitos Espalhamento de raios-X a baixos ângulos	200.000
CBPF	Estrutura de polímeros	Detector de localização unidimensional	30.000
UNESP Fis.-Química Araraquara	Consolidação das linhas existentes	Difratometria automática de raios-X	350.000

TABELA B.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS - TÉCNICAS E INVESTIMENTOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS E APARELHOS	INVESTIMENTOS US\$
IFQSC-USP Física	Cristalografia de proteínas Refinamento de estrutura cristalina pelo método de Rietveld	Difração com gerador de anodo rotatório Workstation gráfica Detector de área Facilidades para preparação de amostras Utilização de fontes de luz síncrotron	1.150.000
UNICAMP Física	Teoria dinâmica para fontes de raios-X internas Cristais finos Multicamadas e filmes finos Ondas estacionárias Laser de raios-X Polímeros	Técnicas de filmes finos por difração resante Detectores uni e bidimensionais Utilização de fonte de radiação síncrotron	500.000
IPEN-Física Dif. de Nêutrons	Determinação de estruturas magnéticas Transições de fases magnéticas	Análise estrutural por difração múltipla de nêutrons Difratometria de nêutrons com detector sensível à posição	300.000
IFUSP Cristalografia	Ciência dos materiais Físico-química de sais e membranas EXAFS de sólidos amorfo e cristalinos Difração resante por semicondutores	Difratometria de raios-X com anodos normais e rotatório Detector sensível à posição uni e bi-dimensionais Utilização de fontes de radiação síncrotron	600.000

TABELA 8.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 3 ANOS - TÉCNICAS e INVESTIMENTOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS E APARELHOS	INVESTIMENTOS US\$
IFUSP Microscopia Eletrônica	Microscopia e difração eletrônica de novos materiais Modelos teóricos de estruturas de materiais não metálicos	Microscopia analítica (microscopia eletrônica de transmissão associada à micro-análise por raios-X)	700.000
UFPR - Física Cristalografia	Caracterização de novos materiais e defeitos cristalinos	Espectroscopia de raios-X Utilização de radiação síncrotron Difratometria de múltiplos eixos Ondas estacionárias	300.000
UFPR - Física Prop. Mec.	Crescimento de cristais orgânicos	Microscopia de duplo feixe Microscopia quantitativa a alta temperatura	40.000

filmes finos e multicamadas, indicam uma grande variedade de projetos na UNICAMP. No grupo de Cristalografia do IFUSP há duas direções para as atividades futuras: as pesquisas de materiais de interesse biológico (micelas e membranas) e a expansão das pesquisas de materiais inorgânicos semicondutores e amorfos. Prevê-se também no IFUSP a implantação de técnicas de EXAFS. Os projetos do grupo do IPEN visam o estudo de estruturas e transições de fase em sólidos magnéticos, no grupo de Microscopia Eletrônica da USP haverá uma focalização dos estudos em novos materiais e na UFBA há interesse em se estudar a dinâmica de defeitos cristalinos em tempo real. No CBPF, na UFAI e na UNICAMP, se projeta desenvolver pesquisas de estruturas de polímeros e, na UFRJ, há interesse na estudo de defeitos e transições de fase em sólidos a temperatura e pressões variáveis.

Os planos dos grupos para a próxima década visam, em consequência, consolidar as linhas de pesquisa existentes e iniciar outras que requerem, em geral, instrumentação mais complexa.

As novas linhas de pesquisa são similares às que estão em processo de implantação, ou que foram recentemente implantadas, em muitos laboratórios de Cristalografia em países avançados. Há um claro interesse em vários grupos pelas pesquisas de "novos materiais" de interesse tecnológico (semicondutores, cerâmicos), por sistemas orgânicos (proteínas, bio-polímeros, membranas) e por diversas novas técnicas experimentais ainda não implantadas no Brasil.

Todos os laboratórios "consolidados" e vários "em consolidação" prevêem começar ou continuar pesquisas utilizando fontes de radiação síncrotron.

B. Recursos Humanos

Examinando os dados do Quadro 4, correspondentes a 13 grupos que responderam esta parte do questionário, conclui-se que eles têm capacidade de formar um total de aproximadamente 30 novos doutores e 40 mestres nos próximos 5 anos nas condições atuais.

A variedade e complexidade dos projetos e das novas técnicas experimentais que se pretende implantar na próxima década, exige um incremento sensível do número de pesquisadores em todos os grupos. A estimativa da capacidade dos grupos nas condições ideais para os próximos 5 anos permitiria a formação de aproximadamente 100 novos pesquisadores. Considerando que há, nos 15 grupos que responderam o questionário, 69 pesquisadores contratados, conclui-se que a capacidade de formação estimada, em condições ideais, permitiria pelo menos duplicar nos próximos 5 anos o número de pesquisadores que, uma vez contratados, poderiam contribuir em tarefas de responsabilidade e liderança para a execução dos projetos planejados.

TABELA 6.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS - PESSOAL

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO				OBSERVAÇÕES
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		
	N	D	N	D	N	D	N	D	
UFAL Química	0	0	2	0	0	0	0	4	
UFPA Física	2	0	5	0	2	1	4	2	
UNB Geologia	n/d	n/d	n/d	n/d	1	0	1	1	
UFGO Física	0	0	2	0	1	2	4	4	
UFMG Química	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
UFRJ Física	0	3	2	4	0	0	2	1	
CBPF	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
UNESP Físico-Química Araraquara	0	0	2	0	0	0	3	2	
IFSC-USP Física	8	8	12	12	0	8	0	10	
UNICAMP Física	7	4	10	6	0	7	2	10	
IPEN-Física Dif. de Nêutrons	3	2	5	3	1	1	3	2	

TABELA 8.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS - PESSOAL

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO		CONDICÕES IDEAIS		EXPANSÃO DO GRUPO		CONDICÕES IDEAIS		OBSERVAÇÕES
	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS	CONDIÇÕES ATUAIS		
	R	D	R	D	R	D	R	D	
IFUSP Cristalografia	4	4	6	3	0	1	1	4 *	Não inclui as perspectivas do grupo de óptica de Cristais Líquidos
IFUSP Microscopia Eletr.	4	4	6	6	2	2	4	4	
UFPR-Física Cristalografia	6	1	10	2	1	2	1	4	
UFPR-Física Prop. Mec.	10	0	12	0	2	1	2	3	

n/d: sem dados

C. Investimentos Necessários

Os investimentos em equipamentos de porte realizados até o presente pelos grupos de Cristalografia foram indicados no Quadro 1. Adicionando uma estimativa dos investimentos realizados por grupos que não forneceram esses dados, concluímos que o total investido é de US\$ 5.000.000,00 (cinco milhões de dólares). No Quadro 3 estão listadas as previsões de 12 grupos para equipamentos. Após uma análise das propostas e de valores estimativos para os grupos que não forneceram esses dados, concluímos que, em condições atuais, seria necessário investimentos da ordem de US\$ 6.000.000,00 (seis milhões de dólares) para os próximos cinco anos.

A necessidade de recursos para equipamentos em condições ideais foi estimada em US\$ 10.000.000,00 (dez milhões de dólares). Para realizar esta estimativa foram incluídos recursos necessários para:

- equipamento dos vários laboratórios incipientes que não foram incluídos no levantamento por não terem respondido o questionário;
- aquisição do equipamento necessário para atender o incremento do número de pesquisadores previstos em condições ideais;
- implantação de novas técnicas experimentais de estudos estruturais não incluídos nas previsões como microscopia de tunelamento e microscopia eletrônica de alta resolução;
- construção de estações experimentais correspondentes a técnicas cristalográficas associadas à luz síncrotron.

Nos investimentos previstos não estão incluídos os relacionados com computação, já que os grupos utilizam, em geral, as facilidades de cálculo centrais dos Departamentos, Institutos e Universidades.

Diversos grupos manifestaram o interesse na existência de centros interdisciplinares, com laboratórios e facilidades de preparação e caracterização de amostras. Os investimentos necessários para a implantação e a utilização destes centros não foram quantificados.

D. Comentários e Recomendações

Nas respostas de diversos grupos ao questionário da Sociedade Brasileira de Física, se percebe uma certa falta de credibilidade quanto à possibilidade real de se conseguir, a curto ou médio prazo, os recursos para renovação dos equipamentos existentes, aquisição de novos equipamentos e contratação de pessoal científico e técnico necessários para os novos projetos.

Os grupos manifestam também apreensão quanto à possível continuação das dificuldades atuais para as importações, incerteza quanto ao futuro e dificuldades no recrutamento de estudantes de bom nível interessados na pesquisa científica.

As principais dificuldades previstas pelos grupos para a realização dos projetos são o apoio insuficiente dos órgãos de financiamento e das próprias instituições, para renovação e instalação de equipamentos e para contratação de pessoal científico e técnico. Certamente uma repetição na década de 90 da situação dos anos 80, inviabilizaria uma parte significativa dos projetos de expansão.

O conjunto de propostas dos diferentes grupos levarão a Cristalografia brasileira a uma situação bem melhor do que a atual, mas permanecendo ainda aquém do volume de atividade dos países desenvolvidos. Segundo levantamento realizado pela International Union of Crystallography (IUC) existem nos países desenvolvidos (USA, URSS, Japão, Alemanha, Inglaterra) mais de 500 pesquisadores utilizando técnicas cristalográficas (nos EUA cerca de 2000). Países em desenvolvimento como a China e Índia têm da ordem de 300. Nos registros da IUC há apenas 80 cristalógrafos no Brasil.

Os planos para os primeiros 5 anos da próxima década foram elaborados numa época de sérias dificuldades para a realização de pesquisa, principalmente relacionadas com a escassez de recursos para equipamentos e contratações. Nessas condições o crescimento proposto pelos diversos grupos pode ser considerado como modesto se se pretende que a Cristalografia brasileira atinja no ano 2000 níveis comparáveis aos de países desenvolvidos. Deve-se notar que vários temas, técnicas e aplicações cristalográficas, que já formam parte das atividades correntes de laboratórios em países desenvolvidos, não estão incluídos nos projetos ou são de previsão insuficiente no Brasil. Deve-se citar nesse particular a área teórica de predição de estruturas moleculares e de diagramas de fase a partir de primeiros princípios, aplicação das técnicas de espalhamento anômalo à determinação de estruturas cristalinas e amorfas, pesquisas estruturais de quasi-cristais e fases incommensuráveis, estudos de segregação em ligas metálicas, estrutura de líquidos, etc.

As medidas que os órgãos governamentais, instituições de auxílio à pesquisa, Universidades e Institutos de pesquisa deveriam tomar, para conseguir um desenvolvimento significativo da Cristalografia brasileira na próxima década, são as seguintes:

- Atribuição de recursos para a renovação ou a substituição de equipamentos obsoletos.
- Possibilidade de contratações para permitir o crescimento dos grupos.
- Atribuição de recursos financeiros para aquisição de equipamentos compatíveis com os requeridos pelos grupos.
- Simplificação e aceleração dos mecanismos para importação de equipamentos científicos.

- Atualização dos níveis salariais dos jovens pesquisadores para contribuir ao incremento do interesse dos bons estudantes pelo trabalho de pesquisa.
- Incentivo ao desenvolvimento local de instrumentação, incluindo novos detectores e monocromadores de raios-X e nêutrons.
- Fornecimento de recursos para facilitar a colaboração entre os grupos de Cristalografia e com pesquisadores de outras áreas (química, biologia, mineralogia).
- Incentivo à colaboração entre os grupos de Cristalografia e os laboratórios interessados no desenvolvimento de novos materiais (semicondutores, materiais amorfos, cerâmicos supercondutores, etc.)
- Apoio à implantação de facilidades para a preparação de amostras, anexas aos laboratórios de Cristalografia.
- Incentivo aos grupos para o desenvolvimento de pesquisas em áreas ou com técnicas de desenvolvimento ainda insuficientes ou inexistentes no Brasil.
- Apoio aos grupos incipientes ou "emergentes" para a implantação da infra-estrutura necessária para a pesquisa e para facilitar a interação e colaboração com grupos consolidados.
- Apoio a iniciativas de utilização por cristalógrafos de fontes de luz síncrotron no Exterior.
- Apoio a propostas de desenvolvimento de instrumentação e estações experimentais para serem instaladas no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.
- Incentivo para a implantação de técnicas de microscopia modernas, ainda não utilizadas no Brasil, como a microscopia eletrônica de alta resolução e a microscopia de tunelamento.
- Apoio à realização de doutoramento no Exterior utilizando técnicas cristalográficas ainda pouco desenvolvidas no Brasil.
- Apoio à criação de centros interdisciplinares (física, química, biologia molecular, ciência dos materiais) com equipamentos de difração de raios-X, microscopias, facilidades para a preparação de amostras e para estudos de materiais sob diversas condições de temperatura, pressão e ambiente físico-químico.
- Apoio às pesquisas de desenvolvimento de novos materiais em laboratórios existentes e, se for viável, criação de centros de pesquisa e desenvolvimento de novos materiais específicos.

A concretização das propostas dos diversos grupos, permitirá que a área de Cristalografia no Brasil chegue ao fim da década de 90 em condições francamente superiores às atuais. Ter-se-ia 10 a 15 grupos consolidados, modernos e em forte interação, 1 ou 2 laboratórios regionais interdisciplinares e uma participação apreciável, junto com pesquisadores de outras áreas, na utilização do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Poder-se-ia chegar ao ano 2000 com um número de cristalógrafos com experiência, da ordem de 200, o que implicaria uma situação ainda modesta se comparada com os países desenvolvidos, mas bastante promissora. Atingindo-se os objetivos propostos para a década de 90, ter-se-á dado um passo importante para que a área de Cristalografia possa aspirar, a médio prazo e em condições favoráveis, um nível de desenvolvimento comparável aos dos países do primeiro mundo.

9. Ressonância Magnética

9.1 DESCRIÇÃO

Ressonância Magnética no sentido usual denota ao mesmo tempo um fenômeno e um grupo de técnicas espectroscópicas. O interesse básico é a observação de transições, induzidas por um campo magnético dependente do tempo, entre os níveis de energia de dipolos magnéticos que interagem com o campo magnético estático. A origem dos dipolos pode ser eletrônica ou nuclear, enquanto que os campos magnéticos podem ser aplicados externamente ou gerados internamente. Quando os dipolos magnéticos são de origem eletrônica, é também usual estabelecer uma divisão adicional entre sistemas paramagnéticos e sistemas magneticamente ordenados (ferromagnetos ou antiferromagnetos).

Podemos resumir as diferentes técnicas experimentais que normalmente compõem a sub-área da seguinte maneira:

Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE)

Ressonância Ferro e Antiferromagnética (RFM, RAFM)

Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Ressonância Dupla Eletrônica - Nuclear (ENDOR)

Ressonância Quadrupolar (RQN)

Esta subdivisão é basicamente operacional, reunindo um conjunto de técnicas espectroscópicas que operam numa faixa definida do espectro eletromagnético que vai da região de radiofrequência até a região de microondas.

A exclusão de técnicas como a detecção óptica de ressonância magnética é motivada por este critério.

Por outro lado, a Ressonância Quadrupolar Nuclear, que envolve transições entre níveis de energia resultantes de uma interação eletrostática e não propriamente magnética, é normalmente incluída no grupo pelas suas semelhanças operacionais.

Históricamente o fenômeno de Ressonância Magnética teve sua origem nos experimentos de Rabi e colaboradores com feixes atômicos e moleculares (1937). A técnica cresceu enormemente em importância após a detecção do fenômeno na matéria em seu estado normal. A primeira observação do fenômeno de Ressonância Magnética Nuclear, produzido pelos núcleos de Hidrogênio num bloco de parafina, teve lugar em 1945 em Harvard, pelo grupo de E. Purcell e colaboradores. No mesmo ano em

Stanford, F. Bloch e colaboradores observaram o fenômeno de RMN nos núcleos de hidrogênio da água e, pouco antes (1944), E Zavoisky, na URSS, realizou a primeira observação do fenômeno de Ressonância Paramagnética Eletrônica.

A primeira vista, a única diferença que existiria entre a Ressonância Magnética e outras técnicas espectroscópicas, seria a região do espectro eletromagnético em que ele opera. Sem dúvida esta diferença tem importantes consequências no que diz respeito ao tipo de processos físicos que podem ser estudados usando a técnica. Entretanto, para fazer justiça no aspecto histórico, é necessário apontar uma outra diferença que colocou a Ressonância Magnética numa posição de especial importância sob o ponto de vista conceitual. Esta importância no contexto da física, decorreu do fato de que os experimentos de Bloch e Purcell ilustraram pela primeira vez a relação entre estados quânticos e precessão coerente. A abordagem espectroscópica do grupo de Purcell e a abordagem de Bloch, baseada em idéias clássicas como precessão e torques, pareciam inicialmente tão diferentes que o reconhecimento de que se tratava em ambos os casos do mesmo fenômeno, não foi muito generalizado. Posteriormente, a generalidade destes conceitos (estados quânticos e precessão coerente) foi verificada em relação a outros fenômenos em diversas faixas do espectro eletromagnético.

Nos últimos quarenta anos a Ressonância Magnética tem se convertido numa técnica com aplicações em diversas áreas do conhecimento, produzindo resultados importantes na Física, Química, Biologia e outras ciências. As aplicações são as mais diversas e vão desde o estudo da estrutura e das funções da hemoglobina até a pesquisa das propriedades dos líquidos quânticos, como o Hélio 3, e da tomografia computadorizada até o estudo da física e química de superfícies. A simples enumeração de todas as áreas de atuação nos levaria a uma listagem bastante extensa.

Apesar do grande número de aplicações já existentes, a Ressonância Magnética tem conseguido manter um grau bastante acentuado de renovação. Pode-se afirmar que a versatilidade das modernas técnicas de Ressonância Magnética que existem na atualidade não tem sido ainda explorada em sua total potencialidade.

Em aplicações na Física da Matéria Condensada uma parte dos resultados experimentais envolve de alguma forma a análise de formas de linha, tempos de relaxação e deslocamentos da frequência de ressonância. A maioria dos trabalhos de pesquisa realizados atualmente no Brasil, e em muitos outros países, envolve medições de alguns destes parâmetros em sistemas físicos sujeitos a condições diversas de frequência, temperatura, pressão, tratamento térmico, químico, etc. Técnicas modernas que permitem atingir maior especificidade ou maior resolução tem sido pouco exploradas. Citaremos alguns exemplos:

a) Transições Quânticas Múltiplas

Este método está baseado na Ressonância Magnética Nuclear Pulsada. As coerências quânticas múltiplas são sensíveis à ressonância de núcleos acoplados dipolarmente com um ou mais vizinhos. A técnica permite estudar o tamanho médio de agregados de spins e tem sido utilizada recentemente para

determinar o número médio de prótons em agregados de hidrogênio em silício amorfo. O método parece ser potencialmente importante no estudo de diversos fenômenos relacionados com sistemas desordenados.

b) Espectroscopia de Alta Resolução em Sólidos

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários métodos de RMN pulsada que permitem eliminar em boa parte o efeito da interação dipolar permitindo assim obter espectros de alta resolução em sólidos. Além das diversas sequências de pulsos que foram desenvolvidas para este fim, existem duas outras técnicas que merecem ser destacadas pelo crescente interesse criado em torno delas: 1) Rotação Rápida no "Ângulo Mágico"; 2) RMN em Campo Nulo.

c) Espectroscopia Fourier em Ressonância Paramagnética Eletrônica

Os métodos de espectroscopia Fourier, amplamente difundidos em RMN, prometem ter uma expansão semelhante no caso da RPE, com o aparecimento de conversores analógico/digital e acumuladores de sinal suficientemente rápidos, é possível atualmente obter espectros de RPE pelo método de pulsos com maior sensibilidade que com o método de onda contínua. Ao mesmo tempo, o método de Fourier permite adquirir uma maior variedade e quantidade de parâmetros físicos que refletem diversos fenômenos de relaxação ou processos coerentes.

d) Geração de Imagens Tomográficas por RMN

A Ressonância Magnética tem ganho um merecido espaço como ferramenta de pesquisa importante na Física da Matéria Condensada. Nos últimos anos tem surgido também uma outra aplicação, que pela sua importância prática, tem conseguido transcender os laboratórios de pesquisa para atingir o público. Trata-se da Geração de Imagens Tomográficas por RMN, que por este motivo, merece ser especialmente destacada. Apesar de que o grande impacto causado por esta técnica ocorreu principalmente na Medicina, sua área de atuação está se tornando cada vez mais interdisciplinar com o aparecimento de aplicações em problemas muito diversos. O crescente número de aplicações e a própria evolução desta técnica, tem gerado uma grande atividade na área de instrumentação, com o aparecimento de técnicas sofisticadas de processamento de sinais para atender as necessidades criadas pelos variados objetivos.

9.2 SITUAÇÃO DA ÁREA NO PAÍS

A. Breve Histórico

A Ressonância Magnética, como técnica de pesquisa em Física da Matéria Condensada, foi implantada no Brasil em torno de 1962. Neste ano foi instalado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, um espectrômetro de Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE), tipo V-4502 fabricado pela Varian, que foi utilizado nas primeiras pesquisas experimentais e na formação dos primeiros pesquisadores na área.

Um segundo espectrômetro de RPE foi adquirido pela PUC do Rio de Janeiro, em torno de 1966, dando origem a um grupo de pesquisa nesta instituição e contribuindo na formação de vários pesquisadores, cujos primeiros contatos com a física experimental foram estabelecidos através da ressonância magnética.

Como aconteceu em algumas outras áreas da Física, estes primeiros equipamentos foram adquiridos na forma de espectrômetros completos o que facilitou o início das atividades de pesquisa, apesar da modesta infra-estrutura de apoio técnico existente na época. Esta modalidade foi mudando gradualmente na medida em que algumas instituições foram equipando seus laboratórios com equipamentos eletrônicos de uso geral, e na medida em que seus pesquisadores adquiriam maior experiência e familiaridade com a instrumentação eletrônica e com a técnica de Ressonância Magnética. Em torno de 1970, foram iniciadas as atividades de pesquisa no Departamento de Física da UFMG, com um espectrômetro de RPE/ENDOR superheterodino, montado na própria instituição. Aproximadamente na mesma época (1971) foi construído, no Instituto de Física e Química de São Carlos (USP), um espectrômetro de RPE (banda X), utilizando componentes comprados individualmente, e no Departamento de Física da UFPE (1972) foi montado, usando o mesmo critério, um espectrômetro de Ressonância Ferromagnética (RFM) também de banda X. Estes exemplos constituíram as primeiras montagens experimentais na área de Ressonância Magnética com característica modular. Os módulos eram adquiridos individualmente usando um critério de versatilidade que permitisse uma grande facilidade para fazer modificações e melhorias sugeridas pelas necessidades dos próprios experimentos ou por futuros avanços tecnológicos. Paralelamente, também foram realizados na época, investimentos adicionais para a aquisição de novos espectrômetros convencionais, fabricados comercialmente. Assim foram instalados equipamentos de RPE no Instituto Militar de Engenharia (1971), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1972) e Universidade de Brasília (1971). Estes equipamentos não só foram utilizados pelas instituições que os adquiriram, mas também por pesquisadores das universidades que ainda não tinham conseguido os recursos para equipar seus laboratórios. Assim, pesquisadores da UFRJ, por exemplo, tiveram acesso aos equipamentos de RPE instalados na PUC e no IME e pesquisadores do IFUSP utilizaram e ainda utilizam os espectrômetros do IPEN e IPT.

Em 1975 foi criado na UNICAMP um grupo de pesquisa em RPE que utilizou um espectrômetro Varian já existente na instituição e outro novo (E15) e um equipamento de ENDOR adquiridos nesta data (1975) e em 1976, foi montado no Departamento de Física da UFPE um espectrômetro de ressonância magnética nuclear pulsada utilizando uma abordagem modular. Em 1979 foi adquirido pelo Departamento de Física da UFRJ, um moderno espectrômetro de RPE fabricado pela Bruker (Mod. ER-420) e no DF do Instituto de Física e Química de São Carlos, foi criado um grupo de pesquisa em RMN pulsada, concluindo-se a montagem de um espectrômetro de características modulares. Em 1980 foi adquirido pelo DF da UNICAMP, um espectrômetro de RMN pulsada, de fabricação iugoslava e pelo CBPF, um espectrômetro de RMN pulsada Bruker (SXP) dando-se início a atividades de pesquisa nesta área em ambas as instituições.

As drásticas restrições nas importações impostas a partir de 1980, aparentemente restringiram a criação de novos laboratórios e a expansão dos existentes. Apenas o grupo de Ressonância Magnética da

Universidade Federal de São Carlos foi implantado recentemente (1983), com recursos modestos e com equipamentos em grande parte construídos pelos membros do grupo.

As atividades de pesquisa em Ressonância Magnética nos vários laboratórios existentes no País, começaram com uma concentração quase que exclusiva em problemas básicos de interesse *principalmente científico*. Foram desenvolvidos trabalhos de relevância nas áreas de materiais magnéticos, materiais ferroelétricos, condutores superiônicos, transições de fase, metais e ligas, sistemas amorfos, sistemas de interesse biológico e outras. A partir de 1980, o quadro começou a mudar gradualmente, notando-se uma maior preocupação no desenvolvimento paralelo de aplicações de interesse tecnológico mais diretamente ligadas às atividades produtivas. Na UNICAMP, por exemplo, foi elaborado um projeto de melhoramento genético de sementes utilizando RMN para a determinação não destrutiva do teor de óleo, e na UFRJ foi implantado um programa de estudos sistemáticos por RPE de matéria orgânica sedimentar, com ênfase nos carvões, turfas, xistos betuminosos e arenitos betuminosos brasileiros.

Uma aplicação de Ressonância Magnética que despertou grande interesse no Brasil a partir de 1983 foi a geração de imagens tomográficas por RMN. O desafio tecnológico da implantação da técnica, utilizando em grande parte recursos nacionais, foi enfrentado simultaneamente pelos grupos de RMN do IFQSC e da UFPE. Valendo-se inicialmente da versatilidade dos equipamentos de pesquisa existentes nestes laboratórios, foi possível demonstrar a viabilidade de desenvolver esta tecnologia e aglutinar em torno de um projeto de ressonância magnética, engenheiros, técnicos e profissionais da área médica. Este acontecimento marcou uma nova fase no desenvolvimento de instrumentação para a ressonância magnética, já que a implementação da técnica de geração de imagens tomográficas requereu o desenvolvimento completo de novos instrumentos bastante específicos, como também um esforço bastante considerável na área de "software".

B. Situação Atual

O aspecto geral desta área é que pode-se classificar os grupos em duas variedades, que se complementam e se ajudam. Estas duas variedades são: a) aqueles grupos que centralizam suas atividades no estudo do fenômeno de ressonância, seja nuclear, eletrônica, etc.; b) os que centram suas tarefas em estudar sistemas físicos usando a técnica apenas como uma ferramenta. Há alguns grupos que, ainda que com mais ênfase numa destas tarefas, fazem as duas. Naturalmente, isto acontece nos grupos mais desenvolvidos, com número maior de pesquisadores, e com mais tradição.

Os estudiosos da técnica, ou do fenômeno da Ressonância Magnética desenvolvem equipamentos novos, que permitem implementar experiências não convencionais ou novas técnicas. Os outros *aproveitam os resultados de experimentos cuidadosamente realizados* para a interpretação das propriedades de materiais ou a compreensão de novos fenômenos físicos. Estes problemas abrangem uma superfície extremamente ampla, indo desde a física dos metais com seus problemas complexos como

a supercondutividade, até a biofísica, área por ela mesma imensa. Uma situação similar se encontra na área de óptica, onde paralelamente as aplicações no estudos de materiais, se desenvolvem técnicas experimentais baseadas em novas manifestações de fenômeno de interação da luz com a matéria.

Do ponto de vista do seu estágio de desenvolvimento, achamos também dois tipos de grupos, e isto constitui um problema, pois muitos dos grupos que não estão completamente desenvolvidos já tem vários anos de existência. Estes grupos são compostos principalmente por doutores que se formaram em laboratórios mais antigos ou no Exterior; em muitos dos casos enviados especialmente para obter sua formação; por vários motivos não receberam apoio das instituições financiadoras de pesquisa. Esta parece ser uma dificuldade comum a todas as áreas.

C. Carências e Dificuldades

A atitude dos grupos no que diz respeito à próxima década é diferente, no caso dos grupos desenvolvidos e os grupos novos, ou em desenvolvimento. No primeiro caso, as propostas dos grupos devem ser analisadas tendo em conta a realidade econômica, o que parece ter sido considerado nas propostas de desenvolvimento que são em geral modestas. Os grupos pretendem, em geral, complementar seus equipamentos, ou adicionar técnicas complementares, tais como: magnetização ou calorimetria; em alguns casos, as propostas passam pela obtenção de infra-estrutura (oficinas mecânicas, ou sistemas criogênicos). Os grupos em desenvolvimento, possivelmente pela situação econômica do País nos últimos anos, tem recebido muito pouco sem algum apoio das financiadoras. Estes grupos desejam, como é natural, serem atendidos nas suas propostas mínimas.

9.3 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

A. Planos dos Grupos

Os grupos desenvolvidos apresentam propostas completamente de acordo com a realidade universal na área. Temos grupos desenvolvendo técnicas (tais como as imagens por RMN, a alto e baixo campo, espectroscopia de alta resolução em sólidos ou spin eco em RPE), e outros estudando sistemas tão complexos como proteínas ou polímeros. Os pequenos grupos emergentes, mais uma vez planejam obter os elementos mínimos das técnicas para poder concorrer com outros pesquisadores, mesmo dentro do Brasil.

B. Recursos Humanos

Nesta área, a maior parte dos cientistas que constituem os grupos de pesquisa são doutores formados, e como pode-se ver na Tabela 9.1, experimentais. A nosso ver, o primeiro significa uma maturidade dos

grupos, um indicativo de consolidação. O segundo, o fato de muitos dos grupos serem altamente experimentais é uma característica universal desta área. Ao mesmo tempo pode-se observar que a capacidade de absorção de novos profissionais da área, globalmente, incluindo os pequenos grupos em desenvolvimento, é muito menor que a capacidade dos grupos de formar mestres e doutores.

Comparando com a capacidade de formação de mestres (90) e doutores (38) para os próximos cinco anos, com o número de estudantes existentes hoje em cada nível de estudos (25 e 26, respectivamente) vemos que a capacidade de formação não está esgotada, e os grupos, nas condições atuais, podem aceitar novos estudantes.

Aparentemente, está-se criando um engarrafamento para os futuros profissionais na área. Nos próximos cinco anos teremos um número de mestres formados da ordem de 50, e o número de novos doutores não será menor que 25. A capacidade dos grupos para absorver mestres não é preocupante, pois eles podem continuar seus doutoramentos; não é assim no caso dos doutores. A idealização das condições permitiria absorvê-los. Nas condições atuais, ficariam desempregados. Este problema, que tudo indica ser comum a todas as áreas, deve merecer especial consideração na elaboração da política científica para a próxima década.

Merece ser mencionado que a ressonância magnética como área de formação em física é muito completa. Ela requer para os experimentos mais complicados, conhecimentos de técnicas de vácuo, criogenia, eletrônica, e outras, e exige uma boa formação teórica. Com uma visão otimista podemos pensar que as possibilidades dos doutores experimentais formados na área são amplas. Não possuímos informações suficientes no que diz respeito às possibilidades de serem absorvidos pela indústria, mas a indústria química, notavelmente a petroquímica, tem necessidades que comportam um potencial concreto de absorção.

A utilização de ressonância magnética para diagnóstico por imagens na medicina, acaba de abrir uma área totalmente nova para a atuação de físicos fora da Universidade.

C. Investimentos Necessários

Uma estimativa superficial mais realista indica que o Brasil tem investido da ordem de US\$ 4.000.000,00 (quatro milhões de dólares) em equipamentos de ressonância magnética para grupos de física - excluimos os equipamentos adquiridos para grupos de química. Pode-se supor um investimento da mesma ordem de grandeza para instalações e infra-estrutura dos mesmos.

No levantamento relativo aos investimentos necessários para atualizar os laboratórios e desenvolver os projetos de pesquisa nos próximos cinco anos, os pesquisadores propõem uma quantia de US\$ 6.200.000,00 (seis milhões e duzentos mil dólares) em condições ideais (Tabela 9.3). É razoável propor então uma quantia global de US\$ 8.000.000,00 (oito milhões de dólares), o que considerando os 53

pesquisadores dos grupos, equivale à quantia de US\$ 33.000,00 (trinta e três mil dólares por pesquisador por ano. O investimento não parece exagerado, se esperarmos deste modo desenvolver completamente uma área. Equivale, numericamente, à quantia que os pesquisadores recebem como salário no mesmo período.

D. Carências, Dificuldades e Recomendações

A reclamação mais frequentemente exarada pelos pesquisadores da área é a grande dificuldade de obter fundos das agências financiadoras em quantias adequadas para o suporte de suas pesquisas. A segunda queixa, quase unânime, é a terrível burocracia de importação, inclusive para peças de reposição de equipamentos que sem elas ficam inutilizados.

Vários são os problemas que aparecem criados pela situação econômica atual. Quanto aos equipamentos, estão passando à obsolescência, sem perspectivas sequer de obter as peças de reposição necessárias para mantê-los nas condições mínimas que os façam úteis. No que diz respeito às técnicas, com exceção de uns poucos grupos que souberam desenvolver partes de equipamentos, as novas técnicas que esperaríamos fossem implantadas na próxima década, devem esperar melhores condições financeiras da União.

Existe nas reuniões científicas no Brasil, um espaço reservado para a ressonância magnética. Acharmos importante discutir a finalidade destes espaços, equivalentes aos que existem em outras reuniões internacionais. Acharmos que este é o lugar para apresentação dos resultados de desenvolvimento das técnicas; o espaço para que aprendamos e discutamos com os nossos colegas sobre os novos achados nos desenvolvimentos e estudos do fenômeno. Mas não deve ser o único lugar onde converjam todos os trabalhos de ressonância. Recomendamos que as reuniões dedicadas à área de ressonância magnética concentrem de preferência, aqueles trabalhos nos quais os aspectos teóricos ou experimentais de interesse geral para a compreensão do fenômeno e a exemplificação das suas aplicações seja o assunto central, ou bem que apresentem contribuições nesse sentido. O esquema de reuniões nos moldes das Gordon Conferences parece ser o ideal para esta área.

Mais uma vez, devemos insistir que estamos frente ao fantasma da obsolescência. De dois pontos de vista. Os equipamentos que foram novos, passam a ser velhos, incapazes de concorrer tecnicamente com as novas máquinas, mais sensíveis, mais rápidas. E por outro lado, novas tecnologias, novos desenvolvimentos, tais como as técnicas pulsadas incorporadas à ressonância paramagnética eletrônica, ou a técnica de RMN de alta resolução em sólidos, devem ser incorporadas à física no Brasil na próxima década.

Como ficou exposto na parte inicial deste documento, a Ressonância Magnética é uma técnica extremamente viva em contínuo e rápido desenvolvimento, tendo sido a precursora das técnicas de Espectroscopia com radiação coerente. Esta característica fez com que as inovações nos últimos dez anos

fossem tais que a sua incorporação aos nossos laboratórios está completamente atrasada. Tendo em vista que estes desenvolvimentos tornam a Ressonância Magnética cada vez mais necessária, especialmente na área de materiais, biologia e medicina, onde a interação entre físicos, químicos, biólogos e médicos é fundamental, deve recomendar-se a formação de recursos humanos capazes de incorporar estas inovações técnicas. Este tipo de atividade deve envolver um esforço razoável no projeto de instrumentação moderna, a qual deverá exigir também o concurso de especialistas em engenharia e computação, cuja presença hoje em laboratórios de física é imprescindível.

Em definitivo as recomendações para esta área podem ser resumidas assim:

INVESTIMENTOS devem ser orientados a:

a) Corrigir a obsolescência, já que a Ressonância Magnética foi uma das técnicas pioneiras usadas no Brasil em Matéria Condensada e vários laboratórios estão obsoletos. Este investimento deve compreender em aproximadamente 30 a 50% do valor instalado ao longo dos últimos 20 anos.

b) Incorporar novas técnicas. As técnicas mais poderosas de Espectroscopia coerente pulsada quase não contam entre os físicos do Brasil com especialistas e o gap em relação a outros países é enorme.

c) Custeio. É essencial prever recursos para custeio (operação e manutenção) dos laboratórios que para esta área devem ser estimados a razão de aproximadamente US\$ 20.000,00 (vinte mil dólares) por doutor, por ano.

RECURSOS HUMANOS

Estimular a formação de Recursos Humanos nas áreas dos modernos desenvolvimentos da técnica e suas aplicações, visando aquelas que permitam a canalização destes recursos a outras áreas de pesquisa e aplicação (química, biologia, medicina, etc.).

ENCONTROS

Estimular encontros bem específicos que focalizem técnicas e aplicações modernas, ao estilo das Gordon Conferences.

TABELA 9.1
GRUPOS DE PESQUISA EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
NORTE-NORDESTE UFPE		Tomografia por RMN em campos ultra baixos RMN em sistemas magnéticos desordenados amorfo e fases incomensuráveis	NMR FMR EPR NQR	250.000
CENTRO-CENTRO OESTE UF Goiás		em fase de implantação	em fase de implantação	300.000
SUDESTE UNICAMP/Depto. Eletrô- nica Quântica - Grupo Espectroscopia Foto- térnica e Ressonância Magnética		Biologia, impurezas em café, Catálise, Polímeros, Materiais Magnéticos e ferromagnéticos	EPR Varian IaE Varian Conjunto para NMR Espectrômetro completo de fotoacústica	500.000
UNICAMP/Depto. Eletrô- nica Quântica - Grupo Propriedades Magnéticas		Semicondutores metáis, Grafites intercalados	EPR bandas X e Q na região de 0,4 a 300 K. RMN pulsada (32 MHz) Técnicas complementares Susceptibilidade (SQUID) Resistividade (4 até 400 K)	950.000
CBPF		Biofísica Geocronologia Grupo de NMR	EPR Varian (2), NMR Bruker no caso hiperfino (sem IAEI)	70.000 500.000
Instituto Militar de Engenharia/ Eng. Ma- teriais		Vidros Metálicos Supercondutores Cerâmicos óxidos cerâmicos	Ressonância Magnética	240.000
PUC/RJ		Biofísica	EPR Varian 9 GHz e 35 GHz	70.000

TABELA 9.1
GRUPOS DE PESQUISA EM RESSONANCIA MAGNETICA

Continuação

INSTITUICAO GRUPO	INICIO	LINHAS DE PESQUISA	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
UFF		CdCr ₂ Se ₄ Polímeros	RMN na faixa de 80 a 700 MHz Temperatura ambiente e nitrogênio líquido Criostato de hélio líquido para trabalhar em ambiente entre 4.2 K e ambiente (as vias de aquisição)	260.000
UFMG		Transições de fase estruturais Transições de fase incoerentes Defeitos em semicondutores Redes dielétricas Cerâmicas supercondutoras (absorção de microondas)	EPR 9 GHz e 35 GHz ENDOR Constantes dielétricas (0,1 a 100 Hz) Histórese Baixas temperaturas (1,3 a 300 K) Altas pressões - 10.000 bar	460.000
UFRJ		Danos de Radiação Cálculos Moleculares Matéria Orgânica Sedimentar Instrumentação	Exp. Bruker EPR	235.000
USP/Depto de Física Experimental (Grupo de Cor)		Defeitos e RQX	RQX	100.000
USP/Depto. de Física Experimental (Grupo de Ressonância Magnética)		RPE de compostos de Ni, Mn, Cu e terras raras, concentrados diluídos magneticamente Calorimetria	Ressonância Paramagnética Eletrônica Análise térmica	200.000

TABELA 9.1
GRUPOS DE PESQUISA EM RESSONANCIA MAGNETICA

Continuação

INSTITUICAO GRUPO	INICIO	LINHAS DE PESQUISA	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
IFQSC-São Carlos		Tomografia por RMN	Ressonância Magnética Nuclear	80.000
		Espectroscopia (RMN)	pulsada (1 a 40 MHz)	
		Isolantes Magnéticos-RMN	Tomógrafo RMN (2 Tesla e 0,5 T)	250.000
		Condutores Iônicos (RMN)		120.000
		RPE, Impurezas Magnéticas	RPE banda X	100.000
		Magneto-óptica	Magneto-óptica	80.000
USP-Rib. Preto		Biofísica Densimetria Materiais Biosagnetismo	RPE e NMR (técnicas disponíveis através da cooperação com outros grupos)	29.000
UFSCAR		Ressonância Magnética Magnetismo Semicondutores Instrumentação Supercondutores	RMN (até 42L) Susceptibilidade Magnética (até 42L) AE e RF Efeito Hall	91.500
EMBRAPA/UAPDIAS/ São Carlos		RPE NMR	RPE e NMR (técnicas disponíveis através da cooperação com outros grupos)	

TABELA 9.2
 PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE EM RESSONANCIA MAGNETICA

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORMADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO		CONFERENCIAS INTERNACIONAIS	
	T	E	T	E	I	M	D	M	D	78-82	83-87	78-82	83-87
NORTE-NORDESTE													
UFPE	1	4	-	-	5	1	1	9	2	9	16	2	9
CENTRO CENTRO-OESTE													
UFOD	-	3	-	-	-	-	-	-	-	6	3	-	-
SUDESTE													
UNICAMP/Depto. Eletrônica Quântica - Grupo de Espectroscopia Fototérmica e Res. Magnética	-	3	-	-	-	3	4	15	6	19	34	5	4
UNICAMP/Depto. Eletrônica Quântica - Grupo de Propriedades Magnéticas	0	2	0	0	0	3	4	6	6	30	10	10	4
CBPF	0	4	0	0	1	1	2	0	4	6	5	4	-
PUC/RJ	0	1	-	-	1	-	-	2	2	7	7		
Instituto Militar de Engenharia Eng. de Materiais	0	2	0	0	2	0	0	5	3	22	24	0	-
UFF	0	2	0	1	1	1	0	0	0	1	9	0	0
UFMG	0	7	0	1	4	1	1	10	2	12	12	-	0

TABELA 9.2 -
PESSOAL CIENTÍFICO E PRODUTIVIDADE EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORRADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO	
	T	E	T	E	IC	R	D	H	D	78-82	83-87
UFRJ	0	3	1	1	1	3	4	4	2	8	5
USP/Depto. Física Experimental (Gru- po Centros de Cor)	0	3	0	0	0	1	1	13	4	17	8
USP/Depto. Física Experimental (Gru- po de Ressonância Magnética)	0	3	0	0	3	4	2	4	4	9	5
IFQSC-São Carlos	0	6	0	1	9	7	3	14	5	24	28
USP Rib. Preto	0	2	0	0	0	5	0	0	0	3	14
UFSCAR	0	2	0	0	2	0	0	0	0	10	4
EMBRAPA/UAPDIA/ São Carlos	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	7
TOTAL	1	49	1	4	29	30	22	82	40	185	191

TABELA 9.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS US\$
NORTE-NORDESTE			
UFPE	CONDIÇÕES ATUAIS: Supercondutores, Polímeros condutores, Sistemas de Fermions pesados, Pequenos agregados metálicos (EPR, NMR, NQR)	CONDIÇÕES ATUAIS: Polarização Nuclear Dinâmica (DNP)	100.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS:	CONDIÇÕES DESEJADAS:--	600.000
CENTRO-CENTRO CESTE		NMR de alta resolução	
UFGO	---	---	---
SUDESTE			
UNICAMP/Depto. Eletrô- nica Quântica Grupo Espectroscopia Fototérmica e Reso- nância Magnética	CONDIÇÕES ATUAIS: Seqüência das linhas anteriores, de particular com ênfase na caracteri- zação de proteínas	CONDIÇÕES ATUAIS: Imagens por espectroscopia foto- térmica	25.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Desenvolvimento de imagens através de espectroscopia fototérmica		
UNICAMP/Depto. Eletrô- nica Quântica Grupo Propr. Magnéticas	CONDIÇÕES ATUAIS: Estudo de polímeros condutores	CONDIÇÕES ATUAIS: ---	
		CONDIÇÕES DESEJADAS: Sputtering de filmes de semi- condutores, Técnicas de resistividade e termo-power	250.000
CBPF	CONDIÇÕES ATUAIS: CONDIÇÕES DESEJADAS: Reforçar grupos já existentes. Possivel- mente começar pesquisas em metais cata- lizadores	CONDIÇÕES ATUAIS: EPR CONDIÇÕES DESEJADAS: ENDOR	100.000 700.000
PUC/RJ	CONDIÇÕES ATUAIS: CONDIÇÕES DESEJADAS: Ampliar pesquisa na mesma linha através de espectrômetro mais poderoso	CONDIÇÕES ATUAIS: CONDIÇÕES DESEJADAS: Espectrômetro EPR/ENDOR, a ser utilizado em colaboração com CBPF	

TABELA 9.3
 PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS US\$
Instituto Militar de Engenharia Eng. de Materiais	CONDIÇÕES ATUAIS: --- CONDIÇÕES DESEJADAS: ---	CONDIÇÕES ATUAIS: --- CONDIÇÕES DESEJADAS: Ressonância Magnética	500.000
UFF	CONDIÇÕES ATUAIS: 1. Medidas de calor específico em sólidos em geral e em polímeros em particular 2. Estudos de polímeros com fons implantados através de suas propriedades elétricas e de Ressonância magnética CONDIÇÕES DESEJADAS: 1. Magnetometria ac e dc 2. Preparação de algumas amostras no laboratório 3. Técnicas mencionadas acima "condições atuais"	CONDIÇÕES ATUAIS: Calor específico e estudo de polímeros-	200.000
UFMG	CONDIÇÕES ATUAIS: Defeitos em semicondutores (EPR, ENDOR) Supercondutores cerâmicos: produção e caracterização por absorção de micro-ondas Dispersão dielétrica de ferroelétricos sob altas pressões CONDIÇÕES DESEJADAS: Defeitos em semicondutores (EPR, ENDOR por detecção óptica) Magnetismo em metais Relaxação de impurezas	CONDIÇÕES ATUAIS: Dispersão dielétrica sob altas pressões Automação de aquisição de dados de EPR CONDIÇÕES DESEJADAS: CORR (espectrômetro óptico) MNR com transformada de Fourier e frequência variável	150.000
UFRRJ	CONDIÇÕES ATUAIS: Espectroscopia de RPE de sistemas de importância biológica, seja especificamente aqueles relacionados à fixação de de nitrogênio molecular no solo. CONDIÇÕES DESEJADAS: Espectroscopia ENDOR e ELETRON SPIN ECHO de sistemas bioquímicos	CONDIÇÕES ATUAIS: Ressonância Paramagnética Eletrônica CONDIÇÕES DESEJADAS: Ressonância Eletrônica Pulsada e Eletrônica Nuclear Dupla	400.000 800.000

TABELA 9.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 3 ANOS: TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Continuação

INSTITUIÇÃO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS
USP/Depto. Física Experimental (Grupo de Centros de Cor)	CONDIÇÕES ATUAIS: Semicondutores por RQN	CONDIÇÕES ATUAIS: Luminescência	100.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Semicondutores por RQN/Luminescência Cerâmica técnica por estrudo de propriedades dielétricas e ressonância	CONDIÇÕES DESEJADAS: Luminescência/RQN/Análise de impedância/Criogenia	260.000
USP/Depto. Física Experimental (Grupo de Ressonância Magnética)	CONDIÇÕES ATUAIS: Estender as atuais linhas de pesquisa ampliando-se para outros materiais ainda não investigados	CONDIÇÕES ATUAIS: ---	
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Estender a técnica de RPE para a temperatura do hélio líquido e outras faixas de microondas Implantar a técnica de calorimetria AC para altas e baixas temperaturas. Informatizar a aquisição de dados experimentais	CONDIÇÕES DESEJADAS:	
IFQSC-São Carlos	CONDIÇÕES ATUAIS: Espectroscopia de alta resolução em sólidos Polímeros condutores Detecção óptica de RPE Fast imaging	CONDIÇÕES ATUAIS: --- EPR pulsoado Magneto de alta homogeneidade/estabilidade Probes específicos RMN sistema de aquisição	150.000 30.000 30.000
	CONDIÇÕES ATUAIS: EPR aplicado à problemas biomédicos e biomateriais	CONDIÇÕES ATUAIS: Ressonância Paramagnética Eletrônica	60.000
USP- Rib. Preto	O campus da USP em Ribeirão Preto oferece condições de pesquisa em áreas de fronteira envolvendo a física e as ciências de saúde. Encontra-se em fase de instalação o centro de Pesquisas em Materiais		
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Biomagnetismo	CONDIÇÕES DESEJADAS: Magnetometria e Biosusceptibilidade magnética	100.000

TABELA 9.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS; TÉCNICAS E INVESTIMENTOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Continuação

INSTITUIÇÃO	ROVAS LINHAS DE TRABALHO	ROVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTOS
UFSCAR	<p>CONDIÇÕES ATUAIS: ---</p> <p>CONDIÇÕES DESEJADAS: Estudo de propriedades ópticas e magnéticas de minerais naturais; possibilidade de aplicações tecnológicas; busca de informações sobre propriedades físicas de minerais naturais brasileiros</p>	<p>CONDIÇÕES ATUAIS: ---</p> <p>CONDIÇÕES DESEJADAS: RPE, Absorção óptica e Difratometria de raios-X</p>	600.000
EMBRAPA/CIADIA/ São Carlos	<p>CONDIÇÕES ATUAIS: Construção de espectrômetro de RMN Estudo de metais micronutrientes em solos e plantas por RPE</p> <p>CONDIÇÕES DESEJADAS: Espectroscopia de RMN "in vivo" Estudo de metaloproteínas e do sistema fotossintético de plantas</p>	<p>CONDIÇÕES ATUAIS: RMN de próton em sementes</p> <p>CONDIÇÕES DESEJADAS: RMN de próton e ^{31}P "in vivo" e RPE de Mn, Cu, Fe e Ni em solos e plantas</p>	50.000 500.000

TABELA 9.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO		DE FORMAÇÃO		EXPANSÃO DO GRUPO		DE GRUPO	
	CONDIÇÕES M	ATUAIS O	CONDIÇÕES M	IDEAIS O	CONDIÇÕES M	ATUAIS O	CONDIÇÕES M	IDEAIS O
NORTE-NORDESTE								
UFPE	7	3	11	5	-	1	-	3
CENTRO CENTRO-OESTE								
UFGO	-	-	-	-	-	-	-	-
SUDESTE								
UNICAMP/Depto. Eletrônica Quântica - Grupo Espectroscopia Fototérmica e Ressonância Magnética	16	5	16	5	6	3	10	4
UNICAMP/Depto. Eletrônica Quântica - Grupo Progr. Magnéticas	5	3	7	4	0	0	-	2
CBPF	3	3	5	4	0	0	1	2
PUC-RJ	1	-	2	1	-	-	1	1
Instituto Militar de Engenharia/Eng. de Materiais	3	2	4	2	1	1	1	1
UFF	3	1	5	2	2	1	2	3
UFMG	6	3	6	4	-	-	-	2
UFRRJ	4	4	6	6	2	1	3	3
USP/Depto. Física Experimental (Grupo de Centros de Cor)	5	2	10	5	-	1	-	3

TABELA 9.4
 PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS: RECURSOS HUMANOS EM RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	R	D	R	D	R	D	R	D
USP/Depto. Física Ex- perimental (Grupo de Ressonância Magnética)	10	5	16	8	-	2	-	8
UFSC-São Carlos	7	3	7	6	-	1	-	3
USP Ribeirão Preto	5	0	8	2	0	1	1	2
UFSCAR	4	0	8	-	-	-	1	4
EMBRAPA/UAPDIA São Carlos	-	-	-	-	-	-	1	1
TOTAL	78	34	107	53	9	13	18	41

10. Espectroscopia Mossbauer e Outras Técnicas de Análise e Caracterização de Materiais

10.1 INTRODUÇÃO

Qualquer material é caracterizado por uma grande diversidade de parâmetros e propriedades, que não podem ser determinados por uma única técnica. Por conseguinte, para a completa caracterização de um material é necessário utilizar várias técnicas complementarmente.

Em geral, as informações obtidas com as várias técnicas de análise são agrupadas em duas classes: *informações sobre a estrutura física e informações sobre a estrutura química*. A estrutura física engloba a cristalografia; tipo, forma e dimensão dos defeitos cristalinos; topografia e morfologia superficiais. A estrutura química é definida como a distribuição e concentração de elementos e compostos químicos.

Informações sobre a estrutura física podem ser obtidas com difração de raios-X, difração de elétrons, microscopia eletrônica, espectroscopia Mössbauer, técnicas de ressonância de muon, aniquilação de pósitrons, correlação angular, etc..

Informações sobre a estrutura química podem ser obtidas com espectroscopia Mössbauer, fluorescência de raios-X, técnicas de ressonância magnética, espectroscopia Auger, espectroscopia ESCA, espectroscopia de elétrons de baixa energia, etc..

Em outros capítulos deste livro são apresentadas destacadamente algumas técnicas de médio porte. Nesta seção serão apresentadas outras técnicas de caracterização microscópica cuja utilização em análise de materiais vem crescendo consideravelmente. Não sendo possível apresentar todas as técnicas disponíveis, selecionamos algumas das mais importantes que apesar de existentes no País ainda não são suficientemente difundidas. O destaque dado a espectroscopia Mössbauer não decorre de sua maior importância atual *em relação as outras técnicas, mas sim de sua maior difusão e importância histórica no País*. As técnicas apresentadas são as seguintes:

. Espectroscopia Mössbauer

. Técnicas com aceleradores de partículas de baixa energia

Retrosparalhamento Rutherford (RBS)

Channeling

Análise por reações nucleares

Emissão de raios-X induzida por bombardeamento iônico (PIXE)

. SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry)

. XPS/ESCA (X-Rays Photoelectron Spectroscopy/Electron Spectroscopys for Chemical Analysis)

. AES (Auger Electron Spectroscopy)

. EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy)

. LEED (Low Energy Electron Diffraction)

. Microscopia Eletrônica

10.2 DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS

A. Espectroscopia Mössbauer

. Desde sua descoberta por volta de 1958, o efeito Mössbauer tem sido progressivamente utilizado no estudo de uma grande diversidade de materiais. Conforme será detalhado mais adiante, o efeito Mössbauer apresentava uma aparente contradição, despertando o interesse de inúmeros pesquisadores da época. O impacto da descoberta pode ser avaliado pelo fato do seu autor, Rudolf L. Mössbauer, ter ganhado o prêmio Nobel aos 33 anos, em 1961, quatro anos após a publicação do primeiro trabalho.

Foi necessário um ano para que a comunidade científica aceitasse e compreendesse a potencialidade do efeito. A partir de então, com as contribuições de físicos teóricos e experimentais, o entendimento do fenômeno e as potencialidades de aplicação cresceram exponencialmente. Já em 1959 R.V. Pound e G. A. Rebka propunham o uso do efeito Mössbauer para medir o efeito do campo gravitacional sobre a frequência de uma radiação eletromagnética (gravitational redshift) previsto por Einstein em 1907. Logo depois a experiência foi realizada com sucesso por T.F. Cranshaw, J.P. Schiffer e A.B. Whitehead (1960). É interessante chamar a atenção para a importância histórica dessa experiência. De um lado, ela constitui a primeira incontestável confirmação da previsão de Einstein. Por outro lado, é a primeira aplicação da espectroscopia Mössbauer (EM).

Para se ter uma idéia do interesse despertado pelo fenômeno e pela técnica, basta lembrar que já em 1961 haviam sido publicados 17 artigos de revisão, 130 artigos de pesquisas e um livro (Frauenfelder). Também haviam sido realizadas duas conferências internacionais (Illinois, 1960 e Paris, 1961).

Para descrever a EM, mesmo em poucas palavras, convém lembrar que tanto o átomo quanto o núcleo, sofrem um recuo ao emitir (ou absorver) um fóton. Tal fato implica que a absorção ressonante nuclear é, em geral, extremamente difícil de ocorrer. Entretanto, Mössbauer descobriu que em certos casos especiais ela é facilmente observada. Para isso é conveniente que a energia de transição nuclear seja inferior a 100eV e que o núcleo esteja preso a uma estrutura cristalina. Mössbauer descobriu que para alguns núcleos existe uma possibilidade de emissão sem recuo. Nesses casos o fóton será emitido com a energia de transição do estado nuclear, a menos das pequenas diferenças consequentes do princípio da incerteza.

Mostra-se que a probabilidade de ocorrência do efeito Mössbauer (também denominada fator f , fração sem recuo, fator Debye-Waller e fator Lamb-Mössbauer) apresenta as seguintes características:

- . é tanto maior quanto menor a energia de transição;
- . cresce com o inverso da temperatura;
- . cresce com a temperatura de Debye θ_D , que é uma medida de ligação entre os átomos e a rede cristalina.

A realização prática da espectroscopia Mössbauer consiste essencialmente numa fonte com núcleos excitados emitindo raios- γ , os quais serão ressonantemente absorvidos por núcleos idênticos contidos na amostra (absorvedor). Na forma mais usual, o que se detecta são os raios- γ que atravessam a amostra sem sofrer absorção ressonante. Tem-se o que se denomina espectroscopia Mössbauer de transmissão.

Por outro lado, é possível detectar os elétrons de conversão interna produzidos na superfície de absorvedor, o que leva à chamada espectroscopia Mössbauer de elétrons de conversão, internacionalmente conhecida pela sigla CEMS (Conversion Electron Mössbauer Spectroscopy). Essa forma de realização experimental é bastante conveniente quando se deseja estudar fenômenos de superfície, visto que na quase totalidade dos materiais o alcance dos elétrons é suficientemente pequeno de modo a garantir a eliminação natural de efeitos do volume. Assim, CEMS tem sido usada em estudos de desgaste, corrosão e oxidação superficial dos mais diversos tipos de materiais; no estudo de materiais submetidos a processos de implantação iônica e no estudo de filmes magnéticos e semicondutores. Mais adiante serão apresentadas outras aplicações de CEMS.

A detecção dos fótons ou dos elétrons de conversão emergentes do absorvedor permitirá a investigação das interações hiperfinas ali existentes. Essas interações (interação de monopolo elétrico, interação de quadrupolo elétrico e interação de dipolo magnético) podem fornecer informações sobre a natureza química, estrutura cristalográfica e ordenamento magnético de amostras contendo um ou mais isótopos de Mössbauer.

As possibilidades de aplicação da EM são tão numerosas que seria impossível detalhá-las aqui. Para se ter uma idéia basta observar a Figura 1, onde são mostrados os núcleos que apresentam o efeito Mössbauer. Então, desde que se tenha a fonte radioativa correspondente, qualquer material contendo um ou mais desses isótopos pode ser analisado pela EM.

No item 10.3 são discutidas as linhas de pesquisa mais recentes usando efeito Mössbauer.

B. Técnicas com aceleradores de partículas de baixa energia

1. Introdução

Os aceleradores de partículas, que contribuíram significativamente para o atual conhecimento da física nuclear, têm sido usados, principalmente nas últimas duas décadas, nas áreas de caracterização, desenvolvimento e modificação de materiais e de suas propriedades.

Na medida em que a física nuclear necessita de aceleradores de mais alta energia, os de menor energia estão sendo ocupados principalmente na caracterização dos materiais via técnicas como o retroespalhamento Rutherford (RBS), channeling, reações nucleares, PIXE e outras.

Os feixes de íons permitem uma análise sistemática de propriedades dos sólidos a nível atômico. O processo de penetração do íon na matéria e a profundidade alcançada dependem da energia inicial e da espécie de íon, de modo que ambas podem ser escolhidas para a desejada aplicação. A penetração dos íons depende da massa, carga e posição na rede dos átomos constituintes do material, fornecendo assim informações que usualmente não são obtidas por outros meios. Íons com energia de até alguns MeV cobrem uma região de análise entre a examinada por técnicas ópticas e eletrônicas próximo à superfície e a região "bulk" estudada, por exemplo, por nêutrons (de 10^2 μm até 1mm). Esta é uma região importante para muitas propriedades dos materiais.

O uso de aceleradores no campo dos materiais deve ser dividido em duas grandes áreas. Uma em que feixes de íons leves (p, α , d, ^{15}N , ...) são utilizados na análise e na caracterização das estruturas dos sólidos. A outra, chamada de implantação iônica, refere-se à modificação dos materiais por feixes de íons. Nesta segunda área usam-se aceleradores especiais, de energia menor que 1 MeV, com fontes de íons que permitem cobrir toda a tabela periódica. A seguir discute-se brevemente as técnicas mais usadas de caracterização de matérias com feixes de íons.

2. Retroespalhamento Rutherford (RBS) (Rutherford Back-Scattering)

RBS é uma técnica de análise superficial baseada, conforme sugere o nome, no retroespalhamento Rutherford. A ideia é simples: Partículas energéticas (geralmente íons de ^4He) ao incidirem na matéria são retroespalhadas e detectadas por um sistema que discrimina suas energias. Todavia, entre a incidência e a detecção ocorrem alguns fenômenos que devem ser compreendidos para a correta interpretação dos dados.

Pode-se mostrar que um íon com energia E_0 passa a ter uma energia KE_0 como resultado de sua interação elástica com um núcleo do material. Nas condições experimentais atuais, nas quais o detector é fixo, o fator cinemático k depende apenas das massas do íon incidente e do núcleo-alvo. Além disso, a medida que o íon penetra na matéria ele perde energia de modo contínuo ao longo da trajetória via colisões inelásticas com elétrons, significando que núcleos mais profundos interagem com íons menos energéticos. A colisão elástica do íon com um núcleo do alvo provoca uma perda discreta de energia. Essa perda de energia é proporcional ao poder de freamento do material.

Portanto, conhecendo-se a energia e massa do íon incidente e o poder de freamento do material é possível realizar discriminação de massa e estabelecer o perfil em profundidade da discriminação atômica, particularmente quando se tem elementos pesados em substratos leves. É importante salientar que o poder de discriminação de massa depende do poder de discriminação em energia do sistema de detecção dos íons retroespalhados.

A sensibilidade da técnica de RBS à detecção de impurezas com feixe de partículas alfa é da ordem de 10^{13}at/cm^2 . Com feixes de íons mais pesados, como N, ela pode ser aumentada para 10^{12}at/cm^2 . RBS é uma técnica não destrutiva.

3. Channeling

A técnica de RBS conforme discutida no item precedente supõe alvos policristalinos ou amorfos. No entanto, ela também é usada para estudar a ordem estrutural e cristalina via channeling ("canalização"). O efeito de channeling surge quando o íon (em geral uma partícula α) penetra em um canal de monocristal sendo "guiado" dentro do canal por uma série de colisões de pequeno ângulo, para dentro do cristal. Se o íon incidente colide com uma impureza intersticial, perde energia, é retroespalhado e detectado.

Esta técnica permite determinar a posição de impurezas intersticiais com precisão de até $0,2\text{Å}$. Observando channeling em 2 ou 3 eixos cristalinos faz-se um mapeamento do sólido. Inclusive impurezas substitucionais afetam o channeling do íon incidente.

As medidas de channeling tem 3 aplicações maiores na análise por retroespalhamento: 1) determina-se a quantidade e a profundidade de desordem na rede, 2) localizam-se átomos de impurezas nos sítios de rede, e 3) mede-se a composição e espessura de camadas amorfas superficiais.

4. Análise por reações nucleares

Reações nucleares com p, α , d de baixa energia são usadas para identificar principalmente impurezas de elementos leves. A técnica é também não destrutiva e utiliza reações nucleares bem conhecidas para estudar alvos desconhecidos (o contrário da física nuclear). Por exemplo a determinação de um perfil de Nitrogênio pode ser efetuado com um feixe de prótons de energia menor que 1 MeV via a reação $^{15}\text{N}(p,\gamma)^{16}\text{O}$. Através da reação inversa $^1\text{H}(^{15}\text{N};\alpha,\gamma)^{12}\text{C}$ a uma energia de íons de N de 8 MeV estuda-se o perfil de H na amostra.

5. PIXE: Emissão de raios-X induzidos por bombardeamento iônico (Particle Induced X-ray Emission)

A colisão inelástica de prótons ou partículas alfa no intervalo de energia entre 0,5 e 10 MeV/UAM produz no alvo raios-X característicos do elemento. Desta maneira todos os elementos com $Z > 11$ podem ser analisados em concentrações da ordem de ppm. Utilizando este método podemos determinar qualitativa e quantitativamente as impurezas existentes em um alvo. PIXE é uma técnica não destrutiva e muito utilizada em estudos de poluição, permitindo medir a presença de minúsculas quantidades de elementos poluentes na atmosfera bem como em amostras geológicas, médicas e biológicas.

C. SIMS (Secondary Ion Spectrometry)

SIMS é uma técnica bastante usada na caracterização de elementos químicos presentes nas superfícies dos materiais, e sua realização prática consiste basicamente no seguinte: Um feixe iônico (íons primários), em geral de gás nobre e de baixa energia (da ordem de KeV), ao incidir sobre a superfície a ser analisada, provoca a sua pulverização (sputtering). Os íons secundários, de elementos da superfície são analisados com o auxílio de um detector eletrostático e de um espectrômetro de massa.

A distribuição de elementos na superfície é apresentada sob a forma de espectro de intensidade iônica versus número de massa. Outra informação que se pode obter é o perfil de concentração de determinada espécie atômica. Neste caso deve-se ter um espectro de concentração versus profundidade. Todos os elementos, incluindo hidrogênio, podem ser analisados. Trata-se de uma técnica destrutiva.

D. XPS (ou ESCA)

(X-Rays Photoelectron Spectroscopy ou Eletron Spectroscopy for Chemical Analysis)

Juntamente com AES, EELS, LEED, apresentadas a seguir, XPS faz parte de uma classe de técnicas que se complementam, na medida que apresentam aspectos diferentes do comportamento microscópico dos materiais, em regiões próximas às superfícies (10-40 Å).

No caso de XPS, elétrons são liberados em consequência da interação de raios-X com a superfície a ser analisada. A energia com que o elétron é liberado é a diferença entre a energia depositada pelo raio-X, e essencialmente a energia de ligação do elétron (incluindo-se a função trabalho do material). Portanto, medindo-se a energia do elétron, obtém-se a informação sobre seu estado de ligação anterior. Significa que obtém-se informações sobre a natureza química do material. Por exemplo, variações no estado de oxidação e na estrutura dos compostos pode alterar a energia de ligação dos elétrons de valência.

É importante destacar as vantagens de se usar espectroscopia de elétrons na investigação de fenômenos superficiais e filmes finos.

i) Elétrons podem ser facilmente focalizados defletidos e acelerados;

ii) Elétrons podem ser detectados eficientemente;

iii) Análise em energia e distribuição angular podem ser realizadas com o auxílio de lentes eletrostáticas e sistemas de deflexão.

E. AES (Auger Electron Spectroscopy)

A espectroscopia AUGER guarda alguma semelhança com XPS. Em ambas, elétrons liberados pela superfície da amostra permitem a determinação de suas energias de ligação. Todavia a semelhança é apenas superficial. Na essência elas são bastante diferentes. Na espectroscopia AUGER lacunas são criadas nos níveis atômicos pelo bombardeio com um feixe de elétrons. Na sequência a lacuna é preenchida por um elétron mais externo, ao mesmo tempo em que é liberado outro elétron. Em outras palavras, uma transição AUGER WXY significa uma lacuna na camada W sendo preenchida por um elétron proveniente da camada X, e a liberação de um elétron da camada Y, com energia $E_{WXY} = E_W - E_X - E_Y$, onde E_W , E_X e E_Y representam as energias de ligação dos níveis W, X e Y.

A aplicação que mais distingue AES das outras espectroscopias de elétrons é a perfilagem composicional em profundidade. Essa vantagem torna-se mais relevante quando se leva em conta a sensibilidade de AES a impurezas de baixo número atômico, como carbono e oxigênio, dois dos principais contaminantes de superfícies e interfaces.

F. EELS (Electron Energy Loss Spectroscopy)

Grande parte das informações que temos da natureza resulta da interação de algum tipos de radiação com a matéria. No caso de percepção visual a radiação é a luz visível. Outros tipos de radiação largamente usados são: raios-X, raios- γ , nêutrons e elétrons. O uso de elétrons forma, como já mencionado, uma classe de técnicas denominada espectroscopia de elétrons.

No caso específico de EELS a investigação dos materiais é realizada através da análise da perda de energia dos elétrons que atravessam a amostra (filmes finos) ou que são refletidos na superfície. Os elétrons incidentes possuem energia entre 1 eV e 100 KeV. A faixa de baixa energia é usada em estudos de superfície, onde são investigadas as energias dos estados vibracionais associados a moléculas absorvidas. Na faixa de alta energia, o pico dominante do espectro corresponde à excitação coletiva dos elétrons de condução, a qual denomina-se plasmon.

G. LEED (Low Energy Diffraction)

Difração de elétrons de baixa energia (10-500 e V) é fundamentalmente semelhante à difração de luz e à difração de raios-X. As diferenças entre esses três tipos de difração limitam-se essencialmente à natureza e às dimensões do objeto que difrata. No caso de LEED o fenômeno é produzido pelo arranjo bidimensional dos átomos superficiais.

Os difratogramas devem ser obtidos em condições de ultra alto vácuo, pois basta uma monocamada de contaminante superficial para afetar seriamente a qualidade do padrão de difração. Em geral, variações na periodicidade da superfície resultam em mudanças no padrão de difração. Isso ocorre, por exemplo, quando gases são absorvidos nas superfícies cristalinas.

H. Microscopia Eletrônica

A dimensão de detalhes de forma que podem ser revelados por microscopia óptica é limitada pelo comprimento de onda da luz visível, que é da ordem de 10^{-6} m. Na microscopia eletrônica o elemento de prova é uma onda de elétron, cujo comprimento de onda pode ser até 10^3 vezes menor, possibilitando observar detalhes muito menores que a microscopia óptica. Na microscopia eletrônica um feixe de elétrons refletidos (microscopia eletrônica de varredura - MEV/SEM - scanning electron microscopy) ou os transmitidos (microscopia eletrônica de transmissão - MET/TEM - transmission electron microscopy).

Microscopia eletrônica, tanto de transmissão (MET) como de varredura (MEV) constitui-se hoje em dia em técnica extremamente importante para caracterização e análise de amostras. Isto é especialmente importante em Física do Estado Sólido e Ciência dos Materiais, onde a caracterização do sistema físico

estudado, com relação às fases presentes, suas estruturas, composição química, etc., é fundamental para o correto entendimento de um grande número de propriedades.

Além desta importância como técnica auxiliar, de caracterização de microestrutura, recentes avanços em MET, tanto a nível de resolução como a nível de técnicas analíticas associadas, tornam a MET uma importante ferramenta de investigação em diferentes problemas de Física da Matéria Condensada. A imagem quase direta de arranjos atômicos obtidos por equipamentos modernos com resolução a nível de Angstroms, aliada à possibilidade de análise elementar, via fluorescência de raios-X e análise estrutural via difração de elétrons, em regiões de alguns nanômetros, constitui-se em ferramenta essencial no estudo de defeitos em sólidos, estrutura de fases finamente dispersas, filmes finos, estruturas de fronteiras e interfaces, etc.. Recentemente, a incorporação de espectroscopia de perda de energia de elétrons (EELS) vem permitindo análises de elementos leves, além de viabilizar o estudo de ligações químicas entre átomos, via estrutura fina do espectro de perda de energia. Cabe ressaltar também a conjugação de microanálise com imagem de alta resolução, via processamento de imagem, que recentemente tem sido viabilizada, pela disponibilidade de grande capacidade computacional. Pode-se ter um mapeamento químico e estrutural da amostra, com grande resolução e detalhe morfológico, com a possibilidade de escolha de diferentes tipos de contraste.

O rápido desenvolvimento observado na recém criada técnica de microscopia eletrônica de tunelamento (MET) permite antever que seu uso será bastante amplo na próxima década. Equipamentos relativamente pequenos e baratos já são disponíveis comercialmente, tendo sido usados em vários tipos de pesquisa em física de superfície, com resolução vertical de décimos de Angstroms, permitindo a imagem direta de átomos individuais, com diferentes técnicas de contraste.

10.3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

Será apresentada nesta seção apenas a situação da espectroscopia Mössbauer, pois entre as técnicas apresentadas na seção anterior tem sido ela a mais extensivamente utilizada no País. As outras técnicas, quando instaladas, só o foram em poucos laboratórios. Assim, RBS e análise por reações nucleares só existem na PUC/RJ, na USP e na UFRS; PIXE na USP; Channeling na UFRS; SIMS na UFRJ e na USP/São Carlos; AES na UFRJ, UNICAMP e Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo; XPS na UNICAMP e no CENPES (Petrobrás).

A. Breve Histórico

Três anos após a publicação do artigo de R.L. Mössbauer, relatando sua descoberta, Jacques Danon iniciava no CBPF a instalação do primeiro laboratório brasileiro de espectroscopia Mössbauer. É importante destacar aqui as enormes e naturais dificuldades técnicas daquele empreendimento, enfim superadas com engenhosidade e perspicácia. Quem hoje trabalha na área com analisador multicanal e

transdutor comercial, pode imaginar o que representa obter espectros com um analisador monocanal e um transdutor de velocidade consistindo de um pistão que se movimentava pela pressão do fluxo de óleo vindo de uma jarra colocada a uma certa altura.

A despeito da precariedade experimental, vários compostos de ferro foram estudados e o grupo do CBPF adquiriu respeito internacional. Já por volta de 1963, este grupo inicia a construção de um transdutor de aceleração constante, a partir do acoplamento de dois altos-falantes, concepção até hoje adotada nos transdutores comerciais.

Um aspecto relevante na implantação e consolidação dos laboratórios de espectroscopia Mössbauer no Brasil, refere-se ao esforço do desenvolvimento instrumental. Além da economia de recursos financeiros, tais iniciativas têm contribuído significativamente para a formação de pessoal técnico qualificado. Isso é muito claro não apenas no caso do CBPF, como também nos grupos que se seguiram.

Assim, o grupo da UFRS tem início por volta de 1965 já com forte tendência ao desenvolvimento instrumental, como resultado da experiência acumulada pelo grupo de correlação angular do qual emergiram os primeiros componentes do laboratório Mössbauer. No início dos anos 70, é construído na UFRS um transdutor eletromecânico de velocidade, e um sistema de aquisição de dados a partir de um pequeno computador PDP-11/05. A partir de 1980 tem início ali a construção de analisadores multicanal baseados em microprocessadores. Ao lado desses equipamentos, a equipe técnica da UFRS tem construído pré-amplificadores e fontes de alta tensão, adquirindo experiência na manutenção de equipamentos comerciais.

Outro grupo que tem investido no desenvolvimento instrumental é o da UFMG, instalado por volta de 1968. Além de um transdutor de velocidade e de um sistema de aquisição de dados, destaca-se neste grupo a iniciativa de construir um detector de elétrons para a realização da espectroscopia Mössbauer de elétrons de conversão. Enfim, excetuando-se os grupos da UFES, da USP e da UFRN, todos os outros desenvolveram, em maior ou menor grau, algum tipo de equipamento.

No que se refere à evolução histórica das linhas de pesquisa, podemos dizer que os pesquisadores da área têm investido nas mais diversas possibilidades de aplicação técnica. Todavia é inegável a preponderância dos estudos de minerais ferrosos no início das atividades dos diversos grupos de pesquisa. Ao lado disso, destacam-se os estudos de compostos orgânicos e inorgânicos, ligas metálicas e meteoritos. A situação atual apresenta um padrão diferente, o que será discutido a seguir.

B. Situação Atual

No que se segue faremos uma análise qualitativa e quantitativa da situação atual. Para facilitar a sistematização dividiremos a análise em três tópicos: pessoal envolvido, infraestrutura disponível e atividades de pesquisa.

No item "Pessoal Envolvido" serão considerados os pesquisadores, os estudantes de mestrado e doutorado formados, bem como os atuais estudantes de iniciação científica, mestrado e doutorado. No item "Infraestrutura Disponível" serão considerados os equipamentos próprios dos laboratórios de espectroscopia Mössbauer, bem como aqueles que de uma forma ou de outra são colocados à disposição do grupo. Finalmente, em "Atividades de Pesquisa" serão apresentadas as atuais linhas de pesquisa, será discutida a relação entre trabalhos teóricos e experimentais e a interação com o meio empresarial.

A Tabela 10.1 mostra dados sobre os grupos de pesquisa em espectroscopia Mössbauer no País. Existem atualmente 11 laboratórios, dos quais um está temporariamente desativado. Trata-se do laboratório da UNB, cujos pesquisadores estão envolvidos em outras atividades. Todos os grupos têm a técnica de EM como principal instrumento de caracterização, mas a maioria deles já implantou outras técnicas complementares e planeja expansão nos próximos anos.

Como mostra a Tabela 10.2, há atualmente 37 doutores e 08 mestres diretamente envolvidos com EM, os quais são responsáveis pela orientação de 22 estudantes de I.C., 16 de mestrado e 10 de doutorado. Esses números estão abaixo da capacidade de formação nos próximos 5 anos, o que em condições ideais representa 72 estudantes de mestrado e 33 de doutorado. Há uma expectativa de expansão dos grupos com a absorção, nos próximos 5 anos, de 14 mestres e 21 doutores.

Pelo número de artigos publicados em 1988 (29) poderíamos ser levados a concluir que a comunidade de EM é pouco produtiva, pois apresentou uma média anual de aproximadamente 0,8 artigo por doutor. Todavia, a avaliação deve ser mais cuidadosa. Em primeiro lugar o biênio 87/88 foi particularmente difícil para quem trabalha em EM. A grave crise econômica do País tem dificultado a importação de fontes radioativas, sem as quais torna-se impossível a utilização de EM.

Por outro lado, considerando-se que grande parte da produção científica está vinculada aos programas de pós-graduação, e que o total de estudantes de mestrado e doutorado chega a 26, podemos concluir que a produtividade da área reflete a dimensão quantitativa do seu envolvimento nos programas de pós-graduação.

Um detalhe que chama a atenção e merece um cuidado especial é o número de estudantes de I.C., que poderia perfeitamente passar dos atuais 22/ano para no mínimo 40. As atividades típicas de um laboratório de EM favorecem sobremaneira o crescimento intelectual de estudantes de graduação, com inegáveis benefícios ao desenvolvimento técnico-científico do País. Podemos, apenas a título de exemplo, dizer que é bastante comum o contato desses estudantes com técnicas de alto vácuo, com criogenia e termogenia, com sistemas sofisticados de computação e com sistemas eletrônicos em geral. É portanto uma rara oportunidade de se ter uma experiência razoavelmente eclética, e uma visão interdisciplinar de atividade científica. Aliás, este último aspecto favorece o recrutamento de estudantes de I.C. nos mais diversos cursos universitários (Engenharia, Física, Geologia, Química, etc.).

EM é uma técnica consideravelmente barata. Com um pequeno investimento é possível a realização de relevantes trabalhos. Um espectrômetro básico custa da ordem de US\$ 15.000,00 (quinze mil dólares). Todavia, a demanda por análise em um laboratório de EM requer equipamentos complementares, entre os quais destacam-se criostato com temperatura variável, ímãs supercondutores, micro-computadores, etc..

É também desejável, e dependendo do caso imprescindível, a disponibilidade de outras técnicas de análise, como difração e fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica (varredura de transmissão), análise térmica diferencial, bem como de sistemas para preparação de amostras (fornos diversos, evaporadores de filmes finos, implantador de íons, etc.

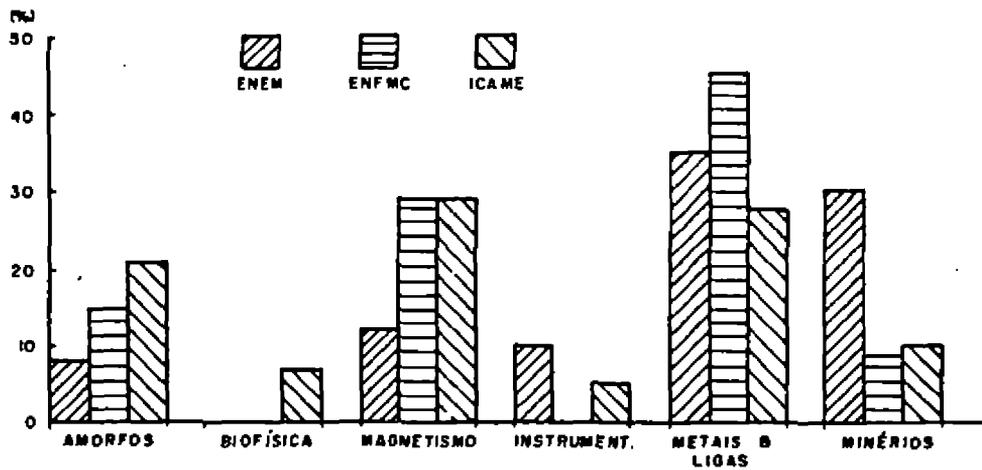
De acordo com os dados apresentados na tabela 10.1, existem no País 25 espectrômetros Mössbauer, com um investimento estimado até 1990 da ordem de US\$ 2.000.000,00 (dois milhões de dólares). Relativamente às dimensões físicas da base instalada, e às amplas possibilidades de aplicação, quer em estudos básicos, quer em pesquisa aplicada, o investimento é sensivelmente inferior às outras técnicas de análise.

Na Tabela 10.1 são apresentadas várias linhas de pesquisa dos diversos laboratórios. Observa-se um amplo espectro de aplicação da EM. É interessante verificar a relação entre os resultados dessas pesquisas, e a produção internacional. Na Figura 10.1 são apresentados valores percentuais relativos aos trabalhos apresentados nos seis Encontros Nacionais de Espectroscopia Mössbauer (ENEM), realizados entre 1982 e 1987, nos três últimos Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada (ENFMC), realizados entre 1986 e 1988, e na "International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect" (ICAME), realizada em Leuven (Bélgica), em 1985.

A escolha das áreas de aplicação foi inspirada no ENFMC. Essa definição não é trivial, há vários trabalhos que tanto podem pertencer a uma área quanto a outra. Em particular, enquanto no ENEM há uma seção para estudos de minerais, no ENFMC esses trabalhos podem ser apresentados em Magnetismo, Metais e Ligas e Ciência dos Materiais. Foi feito um esforço para separar esses trabalhos a fim de compatibilizar as estruturas dos eventos considerados. Além disso, na seção Metais e Ligas foram incluídos os trabalhos de Ciência dos Materiais do ENFMC. Os percentuais são relativos ao total de trabalhos das seis áreas consideradas, em cada evento. Portanto, a figura reflete a distribuição de trabalhos por área e por evento.

Dois fatos destacam-se na Figura 10.1. O primeiro é a absoluta falta de trabalhos dos pesquisadores nacionais na área de Biofísica, contrastando com a comunidade internacional (aproximadamente 7% dos trabalhos apresentados no ICAME estão nesta área). O segundo destaca-se a ausência de trabalhos sobre instrumentação nos dois últimos ENFMC.

Outra diferença entre a participação da comunidade nacional no ENEM e no ENFMC e a comunidade internacional, refere-se aos trabalhos com minerais. Aproximadamente 30% dos trabalhos apresentados



nos ENEM pertencem a essa área, enquanto essa proporção cai para aproximadamente 10% nos ENFMC e ICAME.

Claramente, o tipo de participação da comunidade nos encontros nacionais é diferenciado. Talvez isso possa ser explicado a partir do fato de que no ENFMC não há uma seção sobre minerais. Aparentemente, esses trabalhos são reservados para o ENEM.

A figura sugere perspectivas de estudos. Por exemplo, uma área completamente em aberto é a de Biofísica. Nesse sentido, poderia ser proveitoso um intercâmbio com pesquisadores de Ressonância Magnética bastante ativos nessa área.

A figura também sugere, e os Anais do ENFMC confirmam, que o pessoal de Espectroscopia Mössbauer poderia aumentar consideravelmente sua participação nas áreas de materiais amorfos e magnetismo, onde existem estudos teóricos e experimentais (com outras técnicas) em diversos sistemas adequados à EM.

Um fato que necessita maior reflexão refere-se aos trabalhos sobre Instrumentação. É difícil de entender, por exemplo, a inexistência deles nos ENFMC. Também deve ficar claro que a natureza desses trabalhos no País deve necessariamente ser diferente daqueles desenvolvidos no Exterior. Apesar de que a experiência acumulada nos laboratórios permite em princípio desenvolver um espectrômetro nacional, a transferência desse conhecimento para a indústria ainda não foi possível, consequência talvez do incipiente mercado consumidor. Nesse sentido, talvez uma parcela considerável dos trabalhos sobre Instrumentação deva ser simples transferência de tecnologia. Com o possível aumento da EM, o desenvolvimento de tecnologia nacional será de fundamental importância. Por causa disso, é possível justificar que a participação relativa dos trabalhos de Instrumentação nos ENEM seja o dobro do ICAME. Não apenas isso, mas também que essa diferença venha a aumentar.

Além dessas linhas de pesquisa, digamos assim, tradicionais, alguns laboratórios estão introduzindo novas áreas de aplicações da EM.

No Centro Brasileiro de Pesquisas Física (CBPF) há uma intensa atividade no estudo de cerâmicas supercondutoras dopadas com ferro. Tendo iniciado esses trabalhos em 1987, o grupo já apresentou até o momento significativas contribuições para o entendimento das configurações de oxigênio em torno dos átomos de cobre.

Na área de Implantação Iônica destaca-se o laboratório da UFRGS, inicialmente com o estudo de aços implantados com nitrogênio e estanho, e mais recentemente com o estudo de bolhas em metais e aços.

Digno de nota também é o esforço dos pesquisadores da UFMG para a implantação da técnica DCEMS (Espectroscopia Mössbauer diferencial com elétrons de conversão). Conforme discutido na

primeira seção, essa técnica permite a abertura de uma série de linhas de pesquisa relacionadas com fenômenos de superfície.

C. Carências e Dificuldades

No Brasil carências e dificuldades não são privilégios de qualquer área de pesquisa científica. São problemas que afligem a todos. Além da falta de recursos em geral, um problema sério é a extrema lentidão nos processos de importação. Essa questão é crítica no caso da EM, porque a fonte radioativa indispensável à técnica deve ser importada.

Além disso, uma dificuldade enfrentada principalmente pelos laboratórios instalados em universidades com pouca tradição de pesquisa é a falta de técnicas complementares (raios-X, microscopia eletrônica, etc.), de pessoal de apoio (técnicos em eletrônica, mecânicos, etc.) e da própria infraestrutura (equipamentos para as oficinas, material bibliográfico, facilidades de criogenia e termogenia, etc.). Essas dificuldades são particularmente danosas para os laboratórios da UFCE, UFSC, UFES e UFRN.

10.4 PERSPECTIVAS PARA A PRÓXIMA DÉCADA

No que se segue tentaremos apresentar uma perspectiva para os próximos cinco anos e para os cinco anos seguintes dos atuais grupos de Espectroscopia Mössbauer. Todavia, talvez motivados pela instabilidade de financiamento da pesquisa científica, nenhum laboratório se arriscou a estabelecer um plano objetivo de investimento para os últimos cinco anos do período. Assim, em termos objetivos, apresentaremos de fato uma perspectiva para os próximos cinco anos.

A. Planos dos Grupos

Em termos de projetos de pesquisa, além da continuidade das linhas implantadas, os grupos manifestaram-se desejosos de implantarem novas linhas de trabalho e novas técnicas, conforme tabela 10.3.

Verifica-se que, excetuando-se o laboratório da USP, não há previsão de implantação de qualquer linha de pesquisa que possa ser caracterizada como uma novidade a nível nacional. O que os laboratórios pretendem é implantar novas linhas que de uma forma ou de outra já estejam sendo abordadas por outro laboratório do País. Essa tendência tem uma vantagem na medida em que favorece a formação de uma massa crítica, altamente desejável para a elevação do nível de trabalho da comunidade.

A situação é diferente com relação à implantação de novas técnicas de pesquisa. Nesse caso podemos distinguir dois grupos: no primeiro encontram-se os laboratórios que pretendem implantar técnicas já

instaladas em outros laboratórios, favorecendo a formação de massa crítica comentada acima; no segundo estão os laboratórios da UFRGS, UFMG, UFRN, que pretendem implantar a espectroscopia DCEMS, não existente no País.

Além disso, cabe mencionar a demanda por implantação ou melhoramento de técnicas auxiliares, entre as quais destacam-se: microscopia eletrônica de varredura e de transmissão, ressonância magnética nuclear, ressonância paramagnética eletrônica, sistemas criogênicos, TDPAC, aniquilação de pósitrons, LEED, AUGER, XPS, SIMS, difração de raios-X a ângulo razante, sistema de preparação de filmes finos, etc.

B. Recursos Humanos

Conforme se verifica na Tabela 10.4, os planos de expansão dos grupos de pesquisa nas condições atuais são bastante modestos, frente à capacidade de formação, e até mesmo frente ao total de estudantes de mestrado e doutorado. Para um total de 22 estudantes (Tabela 10.1), espera-se absorver apenas 11. Esse fato, deve ser creditado às atuais restrições governamentais para contratação de pessoal. Tanto é assim, que em condições ideais a comunidade espera absorver 32 profissionais (14 mestres e 18 doutores).

A Tabela 10.4 apresenta um resultado que merece uma discussão mais detalhada. Nas condições atuais, a capacidade de formação dos diversos grupos totaliza 46 mestres e 17 doutores. Considerando-se a expectativa de expansão (3 M e 8 D), verifica-se que há um excedente em potencial de pessoal. Isto significa que a comunidade tem capacidade de formar pessoal para outras instituições, apresentando uma salutar característica exógena. Todavia, frente à realidade do País, onde o principal empregador em Ciência e Tecnologia é o governo, o panorama acima descrito aponta uma enorme capacidade ociosa em termos de formação de recursos humanos.

C. Investimentos Necessários

Conforme dados da Tabela 10.3, os grupos de espectroscopia Mössbauer esperam, nas condições atuais, realizar investimentos de aproximadamente US\$ 2.000.000,00 (dois milhões de dólares), e de US\$ 4.500.000,00 (quatro milhões e quinhentos mil dólares) nas condições ideais.

Apesar de que em relação à dimensão da comunidade esse investimento pode ser considerado grande, convém esclarecer que ele se refere, em grande parte, à instalação de uma base de apoio de uso experimental de uso comum. São equipamentos necessários a amplos setores de pesquisa, não apenas em Física, como também em áreas afins.

A quase totalidade da demanda refere-se a técnicas de análise correlatas, indispensáveis em estudos de materiais. A falta dessas facilidades tem proporcionado graves consequências na competitividade dos laboratórios. É impossível imaginar um trabalho de qualidade internacional, nas áreas de aplicação da EM, sem a utilização de pelo menos difração e fluorescência de raios-X (ou elétrons) e microscopia eletrônica.

Além disso, tendo em vista a importância cada vez maior do papel desempenhado pela ciência dos materiais no atual estágio do desenvolvimento tecnológico, é lícito chamar a atenção para a precária base analítica instalada no País. Não há, no momento, um único laboratório brasileiro que tenha condições de realizar análise de materiais de forma integrada, segundo a concepção sinérgica mencionada na primeira parte deste capítulo. Em termos nacionais, a instalação de uma base analítica corresponde a pelo menos cinco laboratórios regionais, em condições favoráveis de competição internacional envolveria recursos da ordem de US\$ 20.000.000,00 (vinte milhões de dólares).

D. Comentários Finais

Conforme demonstram os dados da Tabela 10.1, há um número bastante pequeno de estudantes por doutor. Isso reflete em parte a reduzida produtividade em 87/88. Por outro lado, dado o caráter interdisciplinar da EM, recomenda-se uma política mais agressiva na busca de estudantes de IC oriundos das áreas nas quais a técnica tem aplicação significativa (biologia, física, geologia, metalurgia e química). Aumentando-se o número desses bolsistas, torna-se mais fácil aumentar o número de estudantes de PG.

Outro aspecto explorado pela comunidade é a prestação de serviços a laboratórios de análise química e a empresas de mineração e metalurgia. A literatura especializada está repleta de exemplos nessa área de atuação.

No que se refere às linhas de pesquisa, os dados apresentados mostram que a área de biofísica ainda não foi explorada pelos pesquisadores de EM. Recomenda-se, portanto, uma interação com os pesquisadores especializados (biofísicos) bem como com físicos atuantes na área e que utilizam outras técnicas de ressonância (NMR, EPR, ENDOR, etc.).

Finalmente, uma carência claramente observada é a falta de interação entre experimentais e teóricos, embora ela já exista em alguns grupos (CBPF, UFMG, UFRGS). No Brasil existem pelo menos duas áreas bastante propícias para esse tipo de integração (magnetismo e materiais amorfos), tanto pela quantidade de trabalhos teóricos, como pela quantidade de estudos experimentais com outras técnicas, mas em sistemas apropriados para EM.

TABELA 10.1
GRUPOS DE PESQUISA NA AREA

INSTITUICAO GRUPO	INICIO	LINHAS DE PESQUISA	TECNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
NORTE-NOROESTE				
UFCE	1977	Minerais Complexos Polimeros Cristais	Espectroscopia Mossbauer Difratometria de Raios-X Medidas de Susceptibilidade Magnética	64.000
UFRRH	1985	Nitretação Iônica Síntese Mineral	Espectroscopia Mossbauer de Transmissão Espectroscopia Mossbauer de Elétrons de Conversão (CEMS)	23.000
SUDESTE				
UFMG: Lab. Mossbauer e Ciência dos Mate- riais	1968	Prop. Magnéticas e Eletrônicas de Metais e Ligas (Teoria e Exp.) Minerais e Solos	Espec. Mossbauer (Trans.e CEMS) Calor Diferencial (DSC) Análise Termomecânica (TMA) Resistividade Elétrica (AC) Análise Termogravimétrica (TG e DTG) Magnetometria (em implantação) Microdureza	153.000
Lab. de Espectros- copia Hiperfina e Física de Super- fícies	1987	Instrumentação Relaxação de spin Textura de spin Corrosão Prop. físicas de mat. magnéticas Hidrogênio em metais Filmes finos, interfaces e super- fícies	Microbalança Magnética Espec. Mossbauer de Trans- missão CEMS e DCERS (em implan- tação) Ressonância Mag. Nuclear (em im- plantação) Espec. com Elétrons (LEED, SAES, SAM, SEM, SIMS) (em implantação) Magnetometria (em implantação) Resistividade elétrica (método de quatro pontos)	940.000
UFES	1981	Dinâmica de redes em compostos de ferro Minerais Materiais Carbonosos Solo	Espectroscopia Mossbauer Balança de Faraday	15.000

TABELA 10.1
GRUPOS DE PESQUISA NA AREA

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	INÍCIO	NOVAS LINHAS DE PESQUISA	TÉCNICAS MAIS RELEVANTES	CUSTO ESTIMADO US\$
CBPF	1961	Minerais	Espectroscopia Mossbauer	200.000
		Meteoritos	Sistemas de Evaporação a He líquido com bobina supercondutora	100.000
		Ligas Metálicas	Fornos de alta temperatura	15.000
		Impurezas metálicas	Sistemas criogênicos	185.000
		Estudo de tintas utilizadas em manuscritos antigos		
UFRJ	1974	Cerâmicas supercondutoras		
		Compostos Organometálicos de ferro		
UFRJ	1974	Magnetismo em espinais	Espectroscopia Mossbauer	50.000
		Magnetismo em ortoferritas	Magnetometria	
USP	1979	Interações hiperfinas em fosfatos		
		Oxidos de Fe amorfos e cristalinos intermetálicos R-Fe e R-Fe-B (R = Terra Rara)	Espectroscopia Mossbauer	35.000
UNICAMP				
Lab. de Preparação e Carac. de Materiais	1975	Metais, Ligas metálicas	Fotoluminescência	300.000
		Semicondutores	Mapeamento da função trabalho	
Lab. Física de Superfícies	1975		Micro-sonda	
		Metais, Semicondutores, Ligas, Catalizadores	LEED-AUGER, ESCA, espectroscopia de massa, TDS	600.000
CENTRO-OESTE GNB	1970	Magnetismo em sistemas de pequenas partículas	Espectroscopia Mossbauer	50.000
SUL UFSC	1988	Susceptibilidade Magnética		
		Nitretação iônica	Espectroscopia Mossbauer de transmissão e CEMS (em implantação)	30.000
UFSC	1988	Complexos bio-inorgânicos		
		Compostos intermetálicos		
UFRGS	1966	Compostos intermetálicos		
		Minerais	Espectroscopia Mossbauer de transmissão e CEMS	85.000
		Implantação iônica		
		Altas pressões		
		Hidretos		
		Vitros de spin		
		Metaurgia de superfície		
Compostos piro-fosfato de ferro				
Ferrocarbonilas				

TABELA 10.2
 PESSOAL CIENTIFICO E PRODUTIVIDADE

INSTITUICAO GRUPO	DOCTORES		MESTRES		ESTUDANTES			ESTUDANTES FORNADOS		ARTIGOS REVISTAS C/ARBITRO		
	T	E	T	E	IC	M	D	R	D	78-82	83-87	88
NORTE-NORDESTE												
UFCE	-	6	-	-	-	2	-	7	-	5	12	3
UFRN	-	1	-	1	3	2	-	-	-	3	6	1
SUDESTE												
UFMG												
Lab. Rosebauer e Ciencia dos Mat.	-	1	-	-	1	2	1	5	2	6	14	1
Lab. Esp. Hiper- fines	-	4	-	2	9	3	1	-	-	13	34	1
UFES	1	3	-	1	-	-	-	-	-	15	9	3
CBPF	1	4	1	1	3	1	1	4	5			
UFRJ												
USP	-	2	-	-	-	1	-	3	1	5	9	5
UNICAMP												
Lab. Material	-	1	-	-	-	-	-	1	-	3	-	-
Fis. Superficies	1	3	-	-	1	2	2	7	2	40	35	8
CENTRO-OESTE												
UNB												
SUL												
UFSC	1	1	-	-	-	2	-	-	-	1	7	3
UFRS	-	7	-	2	5	-	5	2	3	46	32	5

	4	33	1	7	22	16	10	29	13	137	158	25

TABELA 10.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO US\$
NORTE-NORDESTE			
UFCE	CONDIÇÕES ATUAIS:	CONDIÇÕES ATUAIS: Completar o difratômetro de raios-X para medidas em temperatura variável; completar balança de Faraday	
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Sistemas desordenados, vidros e materiais amorfos; ligas metálicas	CONDIÇÕES DESEJADAS: Ressonância paramagnética eletrônica	
UFRN	CONDIÇÕES ATUAIS:	CONDIÇÕES ATUAIS: Difração de raios-X	150.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS:	CONDIÇÕES DESEJADAS: Microscopia Eletrônica, Análise de Superfície, Preparação de filares finos	2.300.000
SUDESTE			
UFPR Lab. Rosebauer Ciência dos Materiais	CONDIÇÕES ATUAIS:	CONDIÇÕES ATUAIS:	
	CONDIÇÕES DESEJADAS:	CONDIÇÕES DESEJADAS: Microscopia Eletrônica de Varredura, Susceptibilidade Magnética, Supercomputador ACP	905.000
Lab. Espectroscopia Hiperfina	CONDIÇÕES ATUAIS: NMR, Técnicas de Superfície, Relaxação spin-spin	CONDIÇÕES ATUAIS: NMR, Técnicas de superfície, DCES	1.000.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: TDPAC, NO, aniquilação de pósitrons, EXAFS, SR, espalhamento de nêutrons. Medidas hiperfina com outros isótopos além de ^{57}Fe e ^{119}Sn	CONDIÇÕES DESEJADAS: Cristalo de diluição, "Slow-fast coincidence", TDPAC, NO, EXAFS, SR, Aniquilação de pósitrons, espalhamento de nêutrons	1.000.000
UFES	CONDIÇÕES ATUAIS: Solos magnéticos Materiais sintéticos Retais e ligas	CONDIÇÕES ATUAIS: Difração de raios-X Magnetômetro de amostras vibrante Resistividade Cristalo de circuito fechado	400.000

TABELA 10.3
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

Continuação

INSTITUIÇÃO GRUPO	NOVAS LINHAS DE TRABALHO	NOVAS TÉCNICAS	INVESTIMENTO R\$
CBPF	CONDIÇÕES ATUAIS: Catalise, íons permanentes. Espec. Mossbauer com isótopos de Terras Raras	CONDIÇÕES ATUAIS: Liquefator de nitrogênio Sistema de evaporação com um SQUID	300.000 150.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Ultra baixas temperaturas. SR	CONDIÇÕES DESEJADAS: Criostato com refrigerador e diluição Microscopia eletrônica de transmissão e varredura	200.000
UFRJ	NÃO ENVIOU DADOS		
USP	CONDIÇÕES ATUAIS:	CONDIÇÕES ATUAIS: Mossbauer, Espectrômetro no.	20.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Espectroscopia Mossbauer de ^{155}Gd	CONDIÇÕES DESEJADAS: Mossbauer e Criostato de banho de ^4He	40.000
UNICAMP Lab. Física Superfícies	CONDIÇÕES ATUAIS: Catalizadores	CONDIÇÕES ATUAIS: ESCA, LEED-AUGER, ESPELT-MASSA, etc.	600.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS: Modelos de catalizadores	CONDIÇÕES DESEJADAS: UPS, ESCA, LEED-AUGER, etc. juntos (espec- trômetro multitécnica) Microscópio tune- lamento	250.000 100.000
CENTRO-OESTE			
UNB	NÃO ENVIOU DADOS		
SUL			
UFSC	CONDIÇÕES ATUAIS: Spin cross over em complexos de ferro	CONDIÇÕES ATUAIS: Medidas Mossbauer em altas temperaturas, sistema de alto vácuo	30.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS:	CONDIÇÕES DESEJADAS: Medidas Mossbauer em baixas temperaturas, DISPLEX	20.000
UFRGS	CONDIÇÕES ATUAIS:	CONDIÇÕES ATUAIS: CERS em baixa temperatura, DCMS	20.000
	CONDIÇÕES DESEJADAS:	CONDIÇÕES DESEJADAS:	

TABELA 10.4
PERSPECTIVAS PARA OS PRÓXIMOS 5 ANOS

INSTITUIÇÃO GRUPO	CAPACIDADE DE FORMAÇÃO				EXPANSÃO DO GRUPO			
	CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS		CONDIÇÕES ATUAIS		CONDIÇÕES IDEAIS	
	M	D	M	D	M	D	M	D
NORTE-NORDESTE								
UFCE	5	1	10	2	-	-	-	1
UFRN	5	-	8	-	-	1	3	2
SUDESTE								
UFMG								
Lab. Mossbauer	7	3	10	5	-	1	-	2
Lab. Esp. Hiperfina	8	4	13	7	1	1	2	3
UFES	NÃO TEM PÓS-GRADUAÇÃO							
CBPF	5	3	5	5	-	-	5	5
UFRJ								
USP	3	1	5	2	-	-	-	1
UNICAMP								
Lab. de Preparação e Caract. de Materiais	-	1	2	1	-	1	-	1
Lab. Fis. Superfícies	4	3	6	4	-	-	-	2
CENTRO-OESTE								
UNB								
SUL								
UFSC	2	-	3	1	-	-	2	1
UFRS	8	4	10	6	-	3	-	-
TOTAL	47	20	72	33	2	9	14	21