

SUPERCONDUTIVIDADE NO BRASIL

Subsídios para uma política nacional

Spero Penha Morato

COLEÇÃO **3**
BRASIL CIÊNCIA
MCT

COLEÇÃO **3**
BRASIL CIÊNCIA
MCT

A *Coleção Brasil Ciência* é uma publicação seriada que visa divulgar as conferências, entrevistas, artigos e documentos considerados importantes para o amplo debate democrático sobre o desenvolvimento científico e tecnológico no Brasil.

Edição: Coordenação e Comunicação Social do MCT
Produção gráfica: Assessoria de Editoração e Divulgação Científica do CNPq

SUPERCONDUTIVIDADE NO BRASIL

Subsídios para uma política nacional

**Supercondutividade: estágio atual,
perspectivas e subsídios para
uma política Nacional**

Spero Penha Morato

COLEÇÃO BRASILCIÊNCIA
Ministério da Ciência e Tecnologia
Brasília 1987

Presidente da República
JOSÉ SARNEY

Ministro da Ciência e Tecnologia
LUIZ HENRIQUE DA SILVEIRA

Secretário-geral do Ministério da Ciência e Tecnologia
LUCIANO GALVÃO COUTINHO

Secretário de Planejamento e Coordenação
JOSÉ EDUARDO CASSIOLATO
Secretário de Novos Materiais
ROBERTO CERRINI VILLAS BÔAS
Coordenadora do Núcleo de Estudos e
Planejamento em Novos Materiais
HELENA MARIA MARTINS LASTRES
Coordenador de Comunicação Social
ILSON CHAVES DA SILVA

Resumo

No presente trabalho apresentamos inicialmente um panorama geral da situação em que se encontram os supercondutores metálicos, suas aplicações e mercado. A seguir relatamos um breve histórico sobre a supercondutividade a alta T_c (*novos supercondutores cerâmicos*) bem como descrevemos o nível atual de P & D a nível mundial e nacional. São tecidos também alguns comentários sobre insumos e mercados para terras raras. Finalmente listamos os desafios científicos e tecnológicos a serem vencidos e propomos algumas sugestões para conduzir um programa nacional em supercondutividade.

Ministério da Ciência e Tecnologia
Brasília, DF

Preparação do futuro

José Eduardo Cassiolato
Secretário de Planejamento
e Coordenação

A revolução tecnológica, em curso a nível mundial, que servirá de base à nova estrutura econômica e industrial das próximas décadas, apresenta, entre outros, alguns aspectos que a diferenciam de etapas anteriores do desenvolvimento industrial e tecnológico. Como subproduto de maciços investimentos públicos em P & D nos países mais avançados e, a partir do esgotamento relativo no paradigma tecnológico implantado após o final da II Guerra Mundial, tal revolução se caracteriza por uma maior importância da pesquisa básica no espectro total do processo de P & D e numa crescente participação dos diferentes mecanismos de financiamento público na viabilização inicial das inovações. Exemplo típico de tal relação são as diversas tecnologias decorrentes de programas ambiciosos, como o Programa Espacial norte-americano e o Programa EUREKA europeu.

Se tal situação deverá se modificar à medida em que o novo paradigma tecnológico for sendo consolidado — fazendo com que as grandes corporações multinacionais se tornem ainda outra vez o pólo propulsor do desenvolvimento científico e tecnológico — o momento em que vivemos permite, num horizonte de curto e médio prazos, o estabelecimento de políticas que, aproveitando-se desse período relativamente incerto, possibilitem ao Brasil desenvolver condições mínimas para se preparar de forma adequada no futuro radicalmente diverso que se avizinha.

Os avanços recentes em supercondutividade representam exemplo típico de toda essa situação e são comparados por alguns a uma evolução semelhante à do transistor.

Os resultados alcançados no Brasil se devem, em sua maioria, aos esforços de grupos de pesquisa localizados em centros financiados com recursos públicos, cujas equipes conseguiram com agilidade reproduzir o efeito da supercondutividade a temperaturas em torno de 90K, utilizando os recém-descobertos materiais cerâmicos.

Definindo a área de novos materiais como prioritária, o Ministério da Ciência e Tecnologia demonstra a intenção brasileira de participar da revolução tecnológica de uma maneira ativa. Nesse sentido, o trabalho do professor Spero Penha Morato representa importante subsídio para que possamos, em supercondutividade, definir uma estratégia coerente com as necessidades do País.

Introdução

Estágio atual, perspectivas e subsídios para uma política nacional

PRINCIPAIS FATOS DE P & D QUE ANTECEDERAM O "BOOM" DOS SUPERCONDUTORES A ALTA TC EM 1987

A supercondutividade é um efeito físico que ocorre em certos materiais quando resfriados a temperaturas muito baixas. Ela é caracterizada pela total ausência de resistência à corrente elétrica. Foi descoberta em 1911, na Holanda, pelo físico H. K. Onnes quando realizava experiências com mercúrio a 4.2 graus Kelvin, três anos após ele ter conseguido liquefazer o gás hélio.

Outros materiais metálicos além do mercúrio, tais como o estanho, o chumbo e o nióbio, também apresentam o efeito da supercondutividade a temperaturas abaixo de 10K e na presença de campo magnéticos de baixo valor (*menores que 1 kilogauss*). Estes materiais são chamados de supercondutores tipo I e apresentam correntes críticas baixas.

Nas décadas que se seguiram à descoberta da supercondutividade no mercúrio, uma nova família de materiais foi desenvolvida, materiais esses baseados fundamentalmente em ligas de nióbio (*NbTi, Nb, Ge, etc*), abrindo, então, uma certa perspectiva de utilização tecnológica uma vez que três características importantes – temperatura crítica (T_c), campo crítico (H_c) e densidade da corrente (j_c) – tendo atingido determinados valores, possibilitaram a confecção de bobinas supercondutoras viabilizando, dessa forma, aplicações industriais. Tais ligas apresentavam valores de T_c 20K, H_c 500 kilogauss e j_c 10 amperes/cm², densidades de corrente essas que só são alcançadas em supercondutores. Tais ligas foram denominadas de supercondutores tipo II.

Até 1950 muito pouco aconteceu neste campo, e os desenvolvimentos se resumiam a pesquisas em laboratório. Com o aparecimento do liquefator contínuo de hélio, realizado por Collins em 1950 no MIT, e do fio fabricado do composto intermetálico Nb_3Sn , desenvolvido por Kunzler da Bell Labs uma década depois, iniciaram-se projetos de cunho tecnológico, visando a aplicações as mais variadas como: fusão, frmas, ressonância magnética nuclear, magnetohidrodinâmica (MHB), armazenagem de energia, separação magnética, etc.

Ciência e tecnologia vão, assim, caminhando juntas. Se por um lado, as descobertas científicas são agraciadas com prêmios, por outro, a tecnologia delas se beneficia para seu de-

envolvimento e aprimoramento. Isso também é verificado no campo da supercondutividade. O próprio Onnes ganhou o Prêmio Nobel de Física pelas suas pesquisas com mercúrio. Além disso, ainda na década de 50, Bardeen, Cooper e Schriber dividiram o Nobel de Física por terem formulado um modelo teórico que explicava o efeito da supercondutividade. Com a descoberta por Josephson, Prêmio Nobel em 1962, do efeito que leva seu nome, ocorreu uma redefinição da metrologia usada em física, implicando padrões mais precisos a serem utilizados em eletrônica. Dessa forma, foram construídos magnetômetros de altíssima precisão, baseados no efeito Josephson, empregados, por exemplo, em prospecção e biomagnetismo.

Após 1960, seguiram-se outras aplicações da supercondutividade, como a construção de um bolômetro e do primeiro ímã supercondutor que foi utilizado para a sintonia de um Maser. Na década de 70, surgem as "Nato Schools" (*Itália 1973 e 1976 e Portugal 1980*), inicialmente dedicadas a aplicações em larga escala; mas, de fato, o maior volume de contribuições apresentado por estas escolas revelou-se ser em pesquisa fundamental, em SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Devices*) e em materiais. Nota-se, a partir daí, uma involução dos programas de larga escala e uma evolução dos de pequena escala. Na década de 80, observa-se um decréscimo geral de atividades, marcado dramaticamente pela desistência da IBM, em 1983, de fabricar um computador supercondutor.

Foi, então, considerado, como a última esperança de aplicação prática da supercondutividade, o desenvolvimento de um aparelho de ressonância magnética nuclear (RMN) para a produção de imagens, com conseqüente diagnóstico das mais variadas doenças, de forma não invasora (*cirurgia exploratória*). Tal aparelho substituiria, com grandes vantagens, os de tomografia por raios-X pois a radiação emitida, sendo de radiofrequência e, portanto, não-ionizante como os raios-X, não causaria praticamente nenhum dano durante a espectroscopia do corpo humano para efeito de diagnóstico. Convém ressaltar que tais aparelhos de imagem por RMN necessitam de campos magnéticos altíssimos impossíveis de serem obtidos com técnicas convencionais.

Estas máquinas foram o maior sucesso comercial até o presente pois são um componente significativo na revolução dos diagnósticos médicos não exploratórios. Um aparelho destes, aparentemente único da América Latina, encontra-se atualmente em uso no Hospital Albert Einstein em São Paulo. Seu custo capital é de aproximadamente US\$ 2 milhões e é operado a hélio líquido obtido do Instituto de Física da USP ou importado diretamente da França já na forma líquida. O custo inicial do gás hélio para um equipamento deste tipo é da ordem de US\$ 100 mil e os

custos para mantê-lo refrigerado a hélio líquido montam a US\$ 50 mil anuais.

A supercondutividade aplicada, do ponto de vista energético, mostrou sua viabilidade através de componentes para serem aplicados em MHD, fusão por confinamento magnético, transmissão de energia e sistemas. Entretanto, a aplicação em larga escala na tecnologia energética falhou devido a circunstâncias próprias da indústria de geração de energia e das polifacetas energéticas para as quais a supercondutividade ainda não desempenhou nenhum papel como tecnologia suporte.

Supercondutores metálicos – panorama internacional

1. Insumos

O nióbio desempenha o papel principal nos dispositivos supercondutores metálicos. Até 1986, a posição internacional relativa à demanda de nióbio para aplicações em supercondutividade permaneceu conservadora. Muito pouco foi acrescentado ao que já havia sido avaliado em 1985 em conferências internacionais. Desta forma e em função do desenvolvimento da supercondutividade aplicada (*à base de nióbio ou suas ligas*) até 1985, as projeções de demanda de nióbio, até o fim deste século, foram simplesmente extrapolação e projeções baseadas no cenário destes últimos anos. Obviamente, em 1985 e em 1986, não havia ainda as perspectivas surgidas posteriormente, com os supercondutores cerâmicos, e o conservadorismo adotado deixava em aberto apenas decisões concernentes a aplicações de nióbio em produtos de maior consumo e que, eventualmente, poderiam alterar as projeções adotadas. Mas todas essas condutas sempre mantiveram em perspectiva a utilização de supercondutores a baixas temperaturas (*à base de nióbio*).

Os maiores consumidores de nióbio em dispositivos supercondutores são os grandes aceleradores e os dois principais projetos mundiais, atualmente em discussão, são o "Large Hadron Collider", no CERN e o "Superconducting Supercollider" (SSC) nos USA. Enquanto o apoio da comunidade científica a estes projetos é total, nota-se uma relativa frieza quanto ao apoio político devido aos enormes custos envolvidos. O SSC tem seu custo estimado em US\$ 4 bilhões, sendo que um quarto deste custo (US\$ 1 bilhão) será destinado aos magnetos supercondutores. O orçamento corrente do DOE-USA para Física de Alta Energia é de US\$ 500 milhões anuais; mas seriam necessários US\$ 700 milhões adicionais por ano, durante alguns anos para fazer frente às necessidades de construção do SSC, para que, dessa forma, se mantivessem os outros programas de alta energia em andamento. Essas máquinas utilizariam cavidades supercondutoras de radiofrequência com uma previsão de consumo de folhas de nióbio ultra puro em torno de 120 toneladas.

Assim, antes do advento dos supercondutores cerâmicos, as aplicações energéticas da supercondutividade (*geração, transporte e armazenamento de energia, transporte de passageiros e cargas, computadores supercondutores*) já não apresentavam uma perspectiva favorável nos USA, embora no Japão e na Europa ainda continuassem a ser examinadas com cuidado, de forma que o consumo do nióbio seria mesmo estrito às máquinas para Física de Alta Energia.

Atualmente, o perfil mundial de consumo de nióbio, como um todo, apresenta a seguinte distribuição:

Aços microligados	75%
Aços Inoxidáveis	12%
Superligas	10%
Outros (inclusive supercondutores)	3%

A demanda anual de nióbio tem sido em torno de 13.000 toneladas para uma capacidade de produção instalada de 20.900 toneladas. A construção de máquinas para Física de Alta Energia, com um consumo projetado para 120 toneladas, representa menos de 1% da demanda anual média dos últimos cinco anos. As reservas mundiais conhecidas, hoje, são em torno de 10 milhões de toneladas e estão localizadas no Brasil (*mais de 90%*), no Canadá e no Zaire.

Como as aplicações de nióbio em grande quantidade como material supercondutor seriam em máquinas de Física de Alta Energia isto consumiria, por alguns anos, de um a 2% do que é hoje a produção anual. Desta forma, o advento dos supercondutores cerâmicos, mesmo após sua viabilidade em aplicações energéticas tendo sido provada, não causaria um impacto econômico sensível nos programas brasileiros do nióbio.

2. Nível Atual de Pesquisa

As "Nato Schools", mencionadas anteriormente, apesar de expressarem uma preocupação com as aplicações de supercondutores em larga escala, na realidade resultaram em grandes reuniões de físicos que trabalham em supercondutores a baixas temperaturas, enquanto que apenas 10% dos trabalhos foram com supercondutividade aplicada. Isto, de certa forma, parecia refletir um posicionamento específico das nações avançadas, bem como das grandes empresas multinacionais, como veremos a seguir.

Supercondutividade aplicada – situação atual e perspectivas de mercado

O que descreveremos a seguir refere-se ao estágio em que se encontram os vários desenvolvimentos em supercondutividade aplicada, baseados em materiais metálicos onde o nióbio ocupa o papel mais importante. É evidente que supercondutividade em qualquer material como metais, óxidos ou até mesmo em compostos orgânicos como proposto por Little, em 1960, é um efeito físico de enorme importância tecnológica. Desta forma, o que será descrito, apesar de estar baseado em compostos metálicos, poderá ser extrapolado para qualquer material supercondutor que possa ser viabilizado na forma de fios e cabos flexíveis, estáveis, e transposto para o setor produtivo na forma de produtos acabados.

1. Equipamentos Médicos

A supercondutividade aplicada em três utilizações importantes em medicina: Imagem Diagnóstico, Estudos Espectroscópicos de Funções Orgânicas e Radioterapia. Essas aplicações representam, também, as principais utilizações comerciais da supercondutividade. Entre 1973 e 1985, 3.000 CAT Scanners (*tomografia computadorizada por raios-X*) foram instalados nos USA, transformando-se no principal equipamento para imagem diagnóstico. Essas máquinas representaram um grande avanço uma vez que eliminaram a cirurgia exploratória. Entretanto, seus inconvenientes são as altas doses de raios-X que os pacientes recebem. Mesmo assim essas máquinas indicaram o caminho para as aplicações de RMN, que se iniciou sob a forma de testes em 1980. Hoje, na maioria dos casos, as imagens por RMN são superiores ao CAT Scanners. Análises quantitativas de tecido (*que evitam a biópsia*) ou angiografias podem ser feitas com "positron emission tomography" (PET) ou espectroscopia por ressonância magnética (RMN) fornecendo informações funcionais ao invés de estruturais. O mercado para dispositivos RMN, por exemplo, é da ordem de US\$ 500 milhões para 1995, e estes aparelhos utilizarão campos magnéticos de dois tesla gerados por magnetos supercondutores. Radioterapia, com o emprego de máquinas dedicadas como ciclotrons, sincrotrons, linacs, ou free electron lasers irão utilizar magnetos supercondutores, que já estão sendo desenvolvidos.

A maior aplicação comercial do magneto supercondutor é, até o presente, o sistema de diagnóstico por imagens. Nos USA, máquinas para imagem de corpo inteiro *in vivo* até 10 tesla tem sido propostas. As quantidades de ligas supercondutoras em-

pregadas nestas máquinas são, na prática, proporcionais aos campos magnéticos pretendidos. A importância de campos magnéticos altos se faz sentir na necessidade, cada vez maior, que se tem de estudar outros elementos de interesse, além da água e do hidrogênio, que são nitrogênio, oxigênio, flúor, sódio, magnésio, fósforo e enxofre. O estudo destes elementos no corpo humano requer: campos magnéticos mais altos e maior sensibilidade instrumental. Como esta área é relativamente nova ainda, existe muita controvérsia entre pesquisadores, médicos e construtores de máquinas quanto a forma que deve ser melhor explorada a técnica de RMN. Obviamente, confiabilidade e custo são fatores importantes a nível decisório, e a necessidade de uma utilização em larga escala de RMN implicará redução de custos.

No final de 1985, havia uma estimativa de 700 unidades RMN supercondutoras instaladas no mundo, com um crescimento de 20% até 1988. Os sistemas móveis representam um dos segmentos do mercado de crescimento mais rápido. Este mercado, já superior a US\$ 1 bilhão, tem uma distribuição de 60% nos USA, 20% na Europa, 15% no Japão e 5% no restante do mundo. Só o mercado brasileiro está estimado em US\$ 30 milhões, por exemplo. Neste contexto, os principais fabricantes de máquinas de RMN para imagem são a General Electric, Siemens, Mitsubishi, Cen Saclay, Phillips e Thompson. Estas empresas são, também, as maiores produtoras de equipamentos médicos em geral.

Embora as finalidades globais sejam praticamente as mesmas, os equipamentos RMN diferem entre si em suas características mais gerais. Magnetos permanentes e resistivos são utilizados até 0,3 tesla, dado seu baixo custo. Acima de 0,4 tesla, magnetos supercondutores são preferidos, dado que o custo incremental é relativamente melhor. Como a RMN para imagens é um método que teve seu início em 1982, a ênfase tem sido baixar os custos operacionais e de capital, bem como aumentar o índice de utilização com pacientes. Isto significa um maior grau de confiabilidade no sistema e uma atividade mínima de manutenção. Por outro lado, a qualidade do vácuo deve ser alta e a necessidade de reabastecimento criogênico deve ser eliminada ou minimizada.

Várias outras técnicas médicas estão baseadas em dispositivos supercondutores. O uso de SQUIDS, por exemplo, para magneto-encefalografia já provou ser útil no diagnóstico da epilepsia e de áreas deficientes no cérebro. Campos magnéticos gerados por supercondutores poderão, também, ser utilizados em angiografia através do uso de radiação *synchrotron* (*raios-X de alta intensidade*) sintonizável e monocromática, produzida por dipolos magnéticos supercondutores de alta intensidade.

2. Máquinas para Física de Alta Energia

O uso de aceleradores de partículas está se expandindo tanto do ponto de vista de física básica, como também por uma visualização de suas várias aplicações, ao mesmo tempo em que se pretende a construção de máquinas mais compactas a que economizem energia. Estas duas condicionantes são plenamente satisfeitas com o emprego da supercondutividade. Até o presente momento, ligas de NbTi foram utilizadas em aceleradores supercondutores, mas ligas Nb₃Sn e Nb₃Al têm recebido uma considerável atenção.

Os aceleradores supercondutores mais populares que estão sendo desenvolvidos nos USA estão relacionados com pesquisa em física de alta energia. O primeiro *synchrotron* com um supercondutor no seu estágio final surgiu da necessidade de obtenção de feixes de prótons na região de energia acima de um teravolt (*Tevatron no Fermilab*). Anéis supercondutores do estágio final do acelerador de Brookhaven (*CBA*) foram, por exemplo, desenhados para desenvolver pesquisas que visam a compreender as origens do universo.

O sucesso destas máquinas, em particular do Tevatron, levaram ao conceito de uma máquina muito maior e mais potente que é o SSC com pretensões de atingir 20TeV com feixes de prótons. Esta máquina está sendo projetada, mas os recursos para sua construção ainda estão sendo discutidos. Com o advento da supercondutividade de alta temperatura, a construção do SSC está sendo reanalisada. Como já citado anteriormente, este projeto é razoavelmente caro e seria, provavelmente, um laboratório internacional a exemplo do CERN. A supercondutividade de alta T_c poderia barateá-lo.

O projeto do SSC é um exemplo do que pode ser uma colaboração internacional em que estarão envolvidos conhecimentos em ciência básica e alta tecnologia. Máquinas como esta vão possibilitar o avanço do conhecimento na estrutura da matéria, campo este de extrema importância na atualidade.

Pelo fato, também, de ser um projeto que envolverá uma razoável sofisticação de engenharia e, como tal, apresenta uma série de desafios do mais alto nível, o SSC vai comportar a absorção de um grande número de novas tecnologias incluindo a supercondutividade. Projetos como este apresentam um grande fator multiplicativo, e subprodutos tecnológicos serão uma consequência direta disto.

Na Europa, USA e Japão, já foram manufaturados supercondutores para os aceleradores HERA, SSC e RHIC. No caso do CERN, uma colaboração européia irá produzir magnetos supercondutores para dipolos de oito a 10 tesla. A empresa ITAICHI já testou com sucesso um dipolo com 1m de comprimento e 5cm com de abertura útil em que apresentou 9,3 tesla

(10.4 tesla em regime de pico). No caso do RHIC (*relativistic heavy ion collider*), inúmeras partes deste projeto já foram aprovadas.

3. Aplicações Eletrônicas

Computadores supercondutores surgiram há alguns anos como uma certa perspectiva de futuro, no sentido de serem a solução para os problemas inerentes aos semicondutores. A idéia reinante era substituir os já tradicionais transistores por junções Josephson supercondutoras. Estas junções apresentam a vantagem de necessitarem um sinal 100 vezes menor do que o sinal requerido pelo melhor semicondutor do mercado para mudar seu estado físico. O papel de um transistor é o de amplificar um sinal de pequena voltagem para um sinal significativo de mudança de corrente e conseqüentemente atuar como uma chave liga-desliga que pode representar os estados zero ou um de um sistema binário, base para o funcionamento de um computador.

A substituição do transistor por um dispositivo supercondutor Josephson é interessante porque o tempo necessário para a mudança de estado de um transistor é proporcional à voltagem, e calor produzido pelo mesmo aumenta com o quadrado desta voltagem. Logo, uma redução de 100 vezes nesta voltagem de atuação significa uma redução no tempo de atuação e num menor calor dissipado. Isto significa a produção de computadores mais velozes e mais compactos. Entretanto, os desenvolvimentos extraordinários que ocorreram em dispositivos semicondutores, como microcircuitos da ordem de submicrons e dispositivos feitos de heteroestruturas que resultaram em transistores de alta mobilidade eletrônica, apresentaram uma competitividade muito grande aos circuitos Josephson. Estes últimos apresentam a desvantagem adicional de operarem a temperaturas de hélio líquido, enquanto que os primeiros operam à temperatura ambiente. Além disso, a dificuldade adicional de se produzir, em massa, junções Josephson que pudessem ser resfriadas a 4K poder ter motivado a IBM a desativar, em 1983, seu projeto de computadores supercondutores, pois problemas com controle de qualidade destas junções não foram superados.

O advento dos supercondutores de alta T_c pode inverter esta situação se bem que ainda com certas ressalvas. Face à alta velocidade de chaveamento da junção Josephson, o resfriamento a nitrogênio líquido (77K) pode representar uma certa diferença. Na realidade, a 4K, o que realmente conta é que o ruído térmico é muito baixo, e isto pouco tem a ver com supercondutividade. A pequena voltagem necessária para acionar um dispositivo Josephson advém de se estar a uma temperatura muito baixa, o suficiente para se ter o efeito Josephson. A volta-

gem necessária para se acionar um transistor é proporcional à temperatura absoluta, e a 77K (ao invés de 4K) perde-se a velocidade de chaveamento e aumenta-se a dissipação de calor. Temos, então, novamente, uma pequena vantagem teórica para que junções Josephson a 77K (com supercondutores de alta T_c) possam ser utilizadas em computadores supercondutores. Esta pequena vantagem, entretanto, poderá desaparecer no futuro, se as temperaturas T_c não aumentarem e tivermos um avanço competitivo da tecnologia de semicondutores. Trata-se aqui de uma competição tecnológica entre materiais supercondutores de alta T_c e semicondutores para a construção de supercondutores. Em nossa opinião, dada a alta velocidade de chaveamento e os processos de baixa energia característicos das junções Josephson, as chances são que os computadores supercondutores serão mesmo desenvolvidos à base de supercondutores de alto T_c .

Pelas mesmas razões tecnológicas como as acima descritas, existe uma série de outras aplicações das junções Josephson em eletrônica. Radares, osciloscópios, processadores e detectores estão entre outras aplicações de fronteira. Mas é certamente na indústria de microeletrônica que os supercondutores de alta T_c farão um maior sucesso. A ligação supercondutora entre transistores vai gerar menos calor e aumentar a velocidade com que estes transistores serão acionados. Já foi demonstrado na Universidade de Stanford que circuitos híbridos supercondutores-semicondutores poderão aumentar a velocidade de computadores de um fator de cinco, o que já representa um significativo salto qualitativo.

Outras utilizações em eletrônica de junções Josephson são em SQUIDS baseadas na sua alta sensibilidade a campos magnéticos. SQUIDS são utilizados como magnetômetros e são 1.000 vezes mais sensíveis a variações de campo magnético do que qualquer outro instrumento. Pesquisadores da IBM já demonstraram a performance de SQUIDS 77K. Isto representa uma vantagem em relação a operação a 4K, que envolve o emprego de "dewars" com isolamentos térmicos sofisticados e abre uma ampla perspectiva de aplicações médicas, em prospecção e em detecção submarina. Tais aplicações ficariam agora ao alcance da viabilidade tecnológica.

Finalmente, sob o estímulo de todas estas aplicações, a tecnologia de dispositivos supercondutores está fazendo um grande sucesso devido aos avanços, na arte de deposição de camadas em escala atômica e na habilidade de fabricação precisa e controlada destas camadas. Para tal, serão também necessários *synchrotrons* supercondutores dedicados e compactos para a produção de radiação X (*synchrotron high intensity X-ray light sources - XRLS*).

4. Aplicações Energéticas

Com a descoberta, em 1960, de que os supercondutores tipo II eram capazes de transportar altas densidades de corrente, sob campos magnéticos altos, as perspectivas de aplicações energéticas se abriram. Após a engenharia e a construção, em fins da década de 60, de magnetos de grande porte, juntamente com o início da crise de energia, estas perspectivas de aplicações energéticas se ampliaram. Foram desenvolvidos magnetos supercondutores para reatores a fusão por confinamento magnético (*Tokamaks*), sistema MHD e geradores de potência, enquanto que linhas supercondutoras para transmissão de energia eram também projetadas e construídas. Tais projetos, de longo prazo e requerendo décadas para seu desenvolvimento e comercialização, tiveram seus financiamentos diminuídos ou cancelados no início dos anos 80.

Veremos, a seguir, um panorama das aplicações energéticas que envolve supercondutores metálicos no sentido de se ter uma breve perspectiva de mercado. Obviamente, hoje, tais assuntos estão sendo rediscutidos a nível mundial, pois os supercondutores de alta Tc deverão mudar este panorama, como será discutido em cada subitem a seguir.

4.a. Geradores Supercondutores

Geradores supercondutores oferecem várias vantagens técnicas e econômicas sobre os geradores convencionais, e o potencial para melhorias na tecnologia de supercondutividade promete benefícios que ainda não podem ser totalmente avaliados. Antes que tais máquinas entrem em operação comercial, será necessário que fique garantida sua confiabilidade, o que só poderá ser conseguido após a construção e testes de protótipos de alta eficiência. Os custos de desenvolvimento de tais protótipos são altíssimos e, talvez por isso, os USA e França tiveram seus programas encerrados. Programas na URSS e na Alemanha estão em andamento e o programa japonês está ainda para ser anunciado. Entre 1965 e 1986, dezoito geradores supercondutores foram construídos e testados em alguns países para evidenciar a viabilidade desta tecnologia. Máquinas de 20 megawatts foram testadas na URSS dentro de um programa que pretende chegar à construção de máquinas de 300 megawatts.

Uma máquina de 30 megawatts foi testada pela Mitsubishi/Fuji, e uma de 50 megawatts, pela Hitachi em 1983. O projeto da Westinghouse de 300 megawatts foi cancelado. A Siemens pretende iniciar testes em sua máquina de 300 megawatts no início de 1988, com planos para atingir 850 megawatts em 1995.

Os geradores convencionais de hoje (*não superconduto-*

res) produzem da ordem de 300 megawatts cada. Mesmo utilizando-se supercondutores metálicos, a potência gerada poderá ser dobrada. Os benefícios serão ainda maiores com os supercondutores de alta Tc.

4.b. Fusão por Confinamento Magnético

Atualmente a maioria dos projetos de fusão utiliza magnetos convencionais. Entretanto, os reatores comerciais a fusão necessitarão magnetos supercondutores pois, caso contrário, utilizariam mais energia do que conseguiriam gerar. Existe a possibilidade de construção de uma máquina para uso exploratório internacional ou mesmo de duas ou três máquinas regionais nos USA. Até o presente, as estimativas de consumo de nióbio são de 50 toneladas. Em Oak Ridge estão, atualmente, em testes, seis magnetos supercondutores (*LCT - Large Coil Test*) de um projeto iniciado em 1976 e dentro de uma colaboração com o Japão. Aplicações práticas de supercondutores nestes magnetos já estão à mão com o desenvolvimento e materiais avançados (*para produção de 20T*) baseados em nióbio-alumínio, nitreto de nióbio e sulfeto de chumbo-molibdênio. Os físicos de plasma necessitam de campos magnéticos altos e estes novos desenvolvimentos são uma promessa razoável. Máquinas menores foram desenvolvidas na França, na URSS e nos USA. Para tal, foram necessárias, aproximadamente, 20 toneladas de bobinas de nióbio-estanho.

O esforço em fusão por confinamento magnético não parou apesar das dificuldades com os supercondutores de baixas temperaturas. Antes do aparecimento dos novos materiais supercondutores, era difícil de se avaliar a escala de tempo para resultados bem sucedidos ou qual a natureza exata do programa a ser seguido. Havia, também, a possibilidade de que os programas resultariam não comerciais devido ao custo, tamanho dos reatores e dificuldade de manutenção. Esta situação poderá mudar drasticamente com os novos supercondutores. De qualquer forma, antes de 1992 não será iniciada a construção de um reator de testes baseado em supercondutores metálicos, e sua operação só teria início pelo menos uma década depois. Um reator comercial a fusão, assumindo que o emprego de supercondutores metálicos seja bem sucedido, teria sua operação iniciada por volta de 2015. Os magnetos supercondutores de alta Tc tornarão tais reatores de fusão mais práticos e ao alcance da nossa civilização.

4.c. Transmissão de Energia

Nos último dez anos, foram feitos estudos no Laboratório Nacional de Brookhaven, NY, USA visando à viabilidade tecnológica de transmissão de energia em cabos supercondutores. Estes cabos supercondutores oferecem duas vantagens sobre

os cabos subterrâneos convencionais. Em primeiro lugar, estes cabos supercondutores podem transportar três gigawatts de potência – seis vezes mais que os cabos convencionais e tanto quanto as linhas de transmissão aéreas. Em segundo lugar, estes cabos podem cobrir distâncias de 150Km, que são cinco vezes maiores do que as distâncias normalmente cobertas pelos cabos subterrâneos convencionais, além de equivalentes às distâncias cobertas pelas linhas aéreas. Em corrente contínuo (DC) a perda é praticamente nula.

Entretanto, não se pode dizer que a perda é zero, se os cabos supercondutores transportarem corrente alternada (AC), pois, neste caso, ocorre alguma perda. Os estudos de Brookhaven mostraram que as perdas por transmissão AC são, na realidade, próximas às perdas nas linhas aéreas devido à dissipação de calor. Isto sempre ocorre porque a transmissão AC gera, em qualquer caso, ondas de rádio frequência que são absorvidas pelos isolantes dos cabos. Os custos com hélio líquido dobram em valor as perdas nos cabos de modo que, mesmo reduzindo os custos com hélio, ou seja, aumentando T_c , os cabos subterrâneos ainda não podem ser olhados repentinamente como a grande alternativa para transmissão de energia, mas sim como uma alternativa que, agora, merece bastante consideração. A demonstração de Brookhaven foi bem sucedida no tocante à confiabilidade da parte criogênica. A linha foi mantida a baixas temperaturas por mais de dois anos. Os novos supercondutores transportarão energia em DC.

4.d. Armazenagem de Energia

Atualmente, são feitos estudos na Universidade Wisconsin, USA, e pelo Governo Japonês, mas, até o presente, não foi proposto um programa comercial. O estudo japonês conclui que um sistema de armazenagem de energia magnética (SMES) com GWh possa ser esse tamanho ideal para o Japão após o ano 2000. O custo de construção está estimado em US\$ 1,2 bilhões, o que está dentro do que seria economicamente esperado para a obtenção do "break even". Um túnel subterrâneo de 390m de diâmetro abrigaria uma bobina de 700 KA a uma profundidade de 130m e teria uma eficiência ao redor de 90%. A construção está estimada em seis anos.

Os novos materiais supercondutores tornam todas estas possibilidades muito mais realistas, pois tais anéis poderão armazenar enormes quantidades de energia para uso posterior. A possibilidade, agora real, de se ter automóveis que são movidos por motores elétricos pequenos e potentes, que retiram energia de dispositivos armazenadores supercondutores, fez com que a Ford dos USA criasse um grupo de estudos para re-analisar a questão do carro elétrico face a estes novos desenvolvimentos.

4.e. Transporte por Levitação Magnética (MAGLEV)

Neste caso, também as vantagens da supercondutividade tradicional ainda não estão muito claras. O Japão construiu um MAGLEV, utilizando magnetos supercondutores. A Alemanha também construiu seu MAGLEV, utilizando, entretanto, magnetos convencionais. O trem japonês alcança velocidades de 500 km/h e poderá, certamente, ficar mais leve e mais barato com o emprego dos novos supercondutores.

Melhorias em tecnologia de materiais supercondutores metálicos nos últimos anos resultaram em estudos que mostraram que os custos de investimento nos MAGLEV, para distâncias curtas (*de até 50km*), seriam menores do que os custos para o sistema Shinkansen que cobre a distância Osaka-Tokio. Estes números se tornarão ainda mais atraentes quando obtivermos os novos supercondutores viabilizados industrialmente. Tanto no Japão quanto na Europa, a implementação de MAGLEV vai depender de decisões da indústria de transportes. No caso europeu, por exemplo, poderá haver falta de demanda. A malha ferroviária européia está contraindo, além de ser uma indústria nacionalizada que na realidade necessita, talvez, de melhor gerenciamento do que novas e caras tecnologias. O TGV francês (*Train à Grande Vitesse*) já se apresenta como uma alternativa viável para o caso europeu. Enfim, em transporte público, cada caso é um caso, e novamente, nesta aplicação, os novos supercondutores poderão alterar drasticamente o panorama atual.

4.f. Propulsão de Navios

Utilizando-se os princípios de magnetohidrodinâmica (MHD) com a água do mar como o fluido condutor, os desenvolvimentos nos USA e no Japão para propulsão de navios continuaram após um teste bem sucedido feito nos USA, que empregou um modelo supercondutor. Modelos AC ou DC são viáveis, e a propulsão pode ser desenvolvida do lado de fora ou através de um duto interno longitudinal ao navio. Sob a ação da força de Lorentz sobre íons de potássio ou sódio da água do mar, um jato de água é expelido deste duto do navio, e o mesmo é propelido pela reação ao jato. Com a presente tecnologia, é possível a construção de um navio em tamanho natural com um máximo empuxo de 25MN. Para um sistema comercial, serão necessários bobinas leves e campos magnéticos da ordem de 7 T. Em 1985, foi iniciada nos USA a construção de um navio que opera a 2,7T, e os testes deverão ser iniciados dentro de alguns anos. Os novos supercondutores abrem, também neste caso, possibilidades concretas de aplicações em propulsão. A substituição do hélio líquido por nitrogênio líquido torna todo o processo de

aparelhamento de um navio simplificado, pois os magnetos serão mais leves e fáceis de manusear.

4.g. Separadores Magnéticos

Unidades de testes de separadores magnéticos supercondutores foram instalados em vários locais para avaliação econômica. Sabe-se hoje que, em usinas de processamento de argila, magnetos supercondutores podem economizar grandes somas quando comparados com magnetos convencionais. A Czechoslovakia foi o primeiro país a utilizar comercialmente um separador magnético supercondutor que opera a 5T e tem uma capacidade de processar cinco toneladas de caulim por hora. Uma planta piloto na Georgia, USA, foi desenvolvida com um circuito fechado de hélio. As maiores questões que se apresentam nestes casos (*ambientes mineiros*) são quanto à sua manutenção por uma força de trabalho não especializada. Custos com hélio líquido e com mão-de-obra especializada para manutenção ainda não foram levados em consideração, mas é provável, que nos próximos anos, os requisitos de supercondutividade caiam dentro das expectativas de custo/benefício deste segmento industrial. Os supercondutores de alta Tc virão, neste caso, certamente contribuir para o aprimoramento desta tecnologia.

4.h. Gyrotrons

Gyrotrons são dispositivos que produzem microondas de alta potência em comprimentos de onda de milímetros ou centímetros para uso em radares especiais, em pré-aquecimento de plasmas nos sistemas de fusão, em aceleradores de partículas e, possivelmente, em "free electron lasers". Gyrotrons foram desenvolvidos pela URSS como consequência de seu programa de fusão. Muitos países estão, hoje, desenvolvendo gyrotrons, e a quantidade de ligas necessárias para cada gyrotron é da ordem de quilogramas. Entretanto, muitas unidades poderão ser fabricadas, pois estes gyrotrons representam um potencial muito grande para aplicações comerciais e militares da supercondutividade.

Supercondutores de alta TC

1. Histórico e nível atual de P & D

O que está ocorrendo em física com o aparecimento dos supercondutores à alta Tc é algo inédito na história da ciência por si só. Somado a isto, tal fato, além de coincidir, a nosso ver, com o início de uma nova revolução tecnológica, irá com ela alterar a estrutura econômico-social de nossa civilização. Na história é conhecido que descobertas científicas importantes transferidas para o setor produtivo causam impacto econômico com conseqüentes rearranjos sociais. Foi assim com a máquina a vapor (*revolução industrial*), com o transistor (*informatização*) e será assim com a supercondutividade. Só que, com esta última, as modificações que virão são ainda imprevisíveis.

Em menos de seis meses, esbarramos no limiar da civilização futura com uma quebra tecnológica de enorme impacto. Como ainda estamos em meio à turbulência, e novas descobertas são anunciadas a cada dia na esteira daquelas surgidas no início do ano, é muito difícil fazerem-se previsões. Vejamos o que vem ocorrendo nestes últimos meses.

Em janeiro de 1986, Bednorz e Müller observaram indicações de que óxidos de lantânio, bário e cobre poderiam ser supercondutores a 35K. Desde então, vários grupos se lançaram em busca de novos materiais desta família de óxidos ternários que pudessem elevar a temperatura crítica, Tc. A partir de janeiro do presente ano, vários grupos reportaram temperaturas críticas acima do ponto de ebulição do nitrogênio líquido, que é de 90K. Os pioneiros foram Paul Chu, da Universidade de Huston, Zhongxian Zao, da Universidade de Beiging e Bertran Batlogg, da AT & T Bell Laboratories. Estes grupos anunciaram Tc a 92K em compostos de $Y Ba_2Cu_3O_{6.5}$. Os resultados destes grupos foram reproduzidos por vários laboratórios do mundo.

O Brasil, também, entrou nesta corrida com um mês de diferença após a publicação no exterior da composição química destes supercondutores. Apesar de os 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, que possuem, caracterizadamente, *uma tradição em física de materiais*, reproduzissem os resultados internacionais. Dadas as condicionantes de competência, infraestrutura e disponibilidade de reagentes, o tempo mínimo para a síntese de um composto supercondutor do tipo $Y Ba_2Cu_3O_x$ é algo em torno de 30 horas.

Poderíamos classificar o dia 18 de março de 1987 como o marco de uma nova era: a era da tecnologia avançada ou o dia

em que pusemos os pés no futuro. Neste dia, foi aberto um painel de discussão sobre supercondutividade na reunião anual da Sociedade Americana de Física em Nova Iorque. Foram, então, feitas algumas demonstrações de levitação magnética, e ficou claro na mente de todos os presentes que, rompida a barreira tecnológica da temperatura do nitrogênio líquido em ebulição (77K), os novos materiais supercondutores poderiam ser transformados em dispositivos úteis, estando, assim, ao alcance da nossa civilização um outro nível de sofisticação tecnológica. Tudo isto, apesar de ainda permanecer em aberto o mecanismo pelo qual estes materiais são supercondutores a temperaturas altas.

Como descrevemos anteriormente, os trabalhos de Hulm, Kunzler e Mathias levaram a fios supercondutores metálicos que hoje são utilizados nos magnetos do Fermilab e do Tevatron e em aparelhos de imagem por RMN. Estes fios se mantêm supercondutores na presença de campos magnéticos altos. Assim, as ligas NiTi, Nb₃Sn e, posteriormente (em 1973), Nb₃Si (*instável*) de certa forma mostraram que as T_c's não puderam mais ser aumentadas muito além de 20K. Estas ligas são do tipo Nb₃X, ou U₃X onde X não é um metal de transição.

Na realidade, paralelamente ao declínio das pesquisas com ligas do tipo Nb₃X na década passada, já alguns pesquisadores descobriram supercondutividade em compostos como LiTi₂O₄ e BaPb_{1-x}Bi_xO₃. Estas descobertas não aumentaram o valor de T_c, que ficou em torno de 13K, e nem despertaram o interesse dos teóricos. Entretanto, estes óxidos mostraram anomalias como uma T_c muito mais alta, do que o esperado, considerando-se previsões a partir de densidades de elétrons. Estas descobertas, datadas de 1973, poderiam ser consideradas como as sementes que causaram as recentes descobertas que revolucionam a física.

Alex Müller (IBM Zurich) iniciou seus estudos baseado em previsões teóricas de que óxidos metálicos poderiam apresentar transição de fase entre estados supercondutores e isolantes, devidas a efeitos físicos característicos de sistemas estudados em Física de Estado Sólido (*interação elétron-fonon*). Müller apresentou os primeiros resultados de supercondutividade a 30K em sistemas de Ba_xLa_{5-x}Cu₅O_{5(3-y)} que ele mesmo sintetizara. Suas conclusões preliminares foram que sistemas Ba-La-Cu-O, metálicos a altas temperaturas, apresentaram indicações de supercondutividade granular a 30K.

Desta forma, vê-se que supercondutividade nestes óxidos não foi descoberta por acaso, mas surgiu como resultado de pesquisa cuidadosamente planejada. A partir destes resultados, o próprio grupo de Müller determinou a estrutura cristalina da fase supercondutora no composto químico de Ba-La-Cu-O e sua composição química correta.

O que se seguiu a partir daí foi que o grupo de Paul Chu (Universidade de Houston) apresentou resultados que confirmaram o trabalho de Müller, ou seja, evidências das propriedades supercondutoras não usuais em óxidos metálicos. Assim, os físicos, já em dezembro de 1986, participando de conferências internacionais e proferindo seminários em universidade e institutos de pesquisa, iniciaram uma enorme e febril troca de informações que se processou como uma reação em cadeia e que fez com que vários grupos reproduzissem os mesmos resultados de supercondutividade em óxidos metálicos em seus laboratórios. Em seguida, resultados independentes de pesquisadores dos EUA, 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 pesquisa continuou de forma intensa quando, finalmente, em 16 de fevereiro de 1987 a National Science Foundation dos EUA anunciou que grupos das universidades do Alabama e de Houston (Grupo de Chu) observaram, independentemente, indicações de supercondutividade a 92K. Devido a questões relativas a patentes, as composições químicas não foram reveladas, de forma que os pesquisadores do mundo inteiro aguardaram com extrema ansiedade a publicação do Physical Review Letters do dia dois de março de 1987 que continha os artigos científicos, revelando então ao mundo a composição química e os procedimentos aproximados de como fazê-la.

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, houve a apresentação de resultados de supercondutividade acima de 90K em compostos do tipo RBa₂Cu₃O_{7-x} onde R poderia ser um Metal de Transição ou 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 abriam com estas descobertas.

De seis de março a 15 de junho, praticamente três meses se passaram sem grandes novas revelações, apesar de muita especulação e indicações sobre compostos supercondutores e temperaturas acima de 100K. Essas especulações, cercadas de todo um mistério, foram, em parte, devidas à característica de pesquisa patenteável com que os trabalhos passaram a ser desenvolvidos.

Vários grupos observaram decréscimos acentuados de resistividade em amostras de fases mistas em torno de 240K.

Este decréscimo é reproduzível e similar ao comportamento que levou, finalmente, à supercondutividade acima de 90K.

Anúncios de supercondutividade à temperatura ambiente foram feitos por alguns países, sempre na forma de "press releases", mas, similarmente ao que já havia acontecido, não revelavam as composições químicas destes materiais. As notícias vinham também com uma característica constante de que as indicações de supercondutividade acima de 100K, ou até acima da temperatura ambiente, eram devidas a fases supercondutoras instáveis e com grande dificuldade de reprodução dos resultados.

Em 15 de junho foi publicado um artigo de Physical Review Letters com o título de "Supercondutividade a 155K" assinado por Ovshinski e colaboradores, da empresa Energy Conversion Devices (ECD) dos EUA. Neste artigo, foi revelado que novos compostos, gora do sistema químico Y-Ba-Cu-F-O, apresentavam indicações de supercondutividade acima da temperatura ambiente, e medidas de resistência elétrica nestes compostos indicaram supercondutividade a 155K. O composto revelado foi $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{F}_2\text{O}_x$ e o processo de preparação não contém detalhes. Além disso, o artigo revela que as medidas de resistência, em função da temperatura, apresentam problemas de reprodutibilidade.

Medidas magnéticas sugerem, neste trabalho, que apenas uma fração muito pequena é supercondutora a altas temperaturas. De definitivo, este trabalho acrescenta que, nestas amostras fluorinadas, chegou-se a resistência zero a 155K e houve a indicação da presença de fases com T_c mais alta (*mesmo acima da temperatura ambiente*). Estas fases de supercondutividade a temperaturas mais altas ainda não foram identificadas. Justamente aí residem os trabalhos deste grupo que busca, intensamente, a determinação da estrutura destas fases e também a otimização das sínteses, visando ao seu aumento. Até a última conferência de Trieste, realizada em meados de julho, não se teve notícia de que o trabalho de Ovshinski fosse reproduzível.

Nos números seguintes do Physical Review Letters, publicados em 22 e 29 de junho, ficaram consolidados resultados importantes, previamente divulgados pela grande imprensa. Por um lado, a pesquisa fundamental, no sentido de compreender os efeitos de supercondutividade a alta T_c , bem como de investigar materiais com T_c ainda mais altos, resultou em trabalhos como o de Ovshinski *et alii*, anteriormente citado, e no de Cai *et alii*, publicado na PRL de 29 de junho. Neste último, estes autores indicam evidência de supercondutividade granular a 160K no sistema Y-Ba-Cu-O.

Por outro lado, a pesquisa tecnológica, com vistas a apli-

cações industriais, resultou nos mais importantes trabalhos até o presente, como o de P. Chaudhari *et al*, que trata do crescimento epitaxial de filmes do composto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, e no trabalho de T. R. Dinger *et alii*, que trata do crescimento de um monocristal de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. Estes dois últimos trabalhos têm em comum o fato de serem grupos da IBM, EUA, e 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.

Estes trabalhos são um exemplo dos resultados obtidos quando se faz uma pesquisa dirigida, como no caso da IBM, visando a aplicações tecnológicas. No caso do monocristal, os resultados de anisotropia e de valores altos da corrente supercondutora começam a consolidar as perspectivas abertas para aplicações tecnológicas. No caso dos filmes finos, com resultados similares de altas correntes supercondutoras, o horizonte de aplicações abre-se de uma vez, pois a tecnologia de filmes permite, numa primeira aproximação, a conformação inicial do dispositivo supercondutor que se quer construir.

Em resumo, nos últimos quinze meses, as temperaturas de transição supercondutoras foram aumentadas de um fator quatro para aproximadamente 100K, patamar este onde se encontram definitivamente consolidadas, tendo sido o ponto alto destas descobertas os trabalhos de Chu *et alii*, e de Wu *et alii*, em composições com fases mistas de Y-Ba-Cu-O que atingiu supercondutividade acima de 90K. Trabalhos subsequentes, tanto do ponto de vista fundamental como tecnológico, mostraram, respectivamente, que se pode obter supercondutividade a temperaturas mais altas e que os supercondutores podem transportar densidades de correntes críticas altas, equivalentes aos supercondutores metálicos. Com isto, abrem-se inúmeras possibilidades reais de aplicações tecnológicas.

2. Re-Avaliação das Perspectivas de Aplicação

As possibilidades de aplicação de supercondutores metálicos, bem como possíveis alterações de perspectivas com os novos supercondutores, em alguns casos, já foram anteriormente analisadas no item III. Pretendemos, a seguir, dar uma visão, de certa forma consensual, das perspectivas de aplicações baseadas nos resultados tecnológicos já consolidados. A questão que se coloca é: *com a tecnologia que se tem hoje* – resultante de trabalhos muito recentes – quais seriam as possibilidades reais e imediatas de emprego de supercondutores de alto T_c ?

Numa tentativa de mostrar um caminho no sentido de responder a esta questão tão fundamental, elaboramos uma matriz (*tabela 1*) que procura englobar os vários segmentos nos quais

Tabela 1

Aplicação 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

a supercondutividade de alta Tc poderá ser aplicada. Estes segmentos estão colocados nas linhas desta matriz. Nas colunas procuramos, em função da situação atual de P & D, estabelecer um sentido de temporalidade que está dividido em alcances, condicionados também à viabilização tecnológica. O primeiro deles, a curto prazo, significa que as aplicações são imediatamente viáveis, ou seja, existem indicações sólidas de protótipos já operacionais ou cuja realização seria muito trivial. Nota-se que se concentram as aplicações no segmento de tecnologia de ponta. A partir de prazos médios (de dois a cinco 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 alta Tc*). Aplicações já viáveis de supercondutores metálicos ainda não o são com os cerâmicos e vice-versa.

3. A Situação Nacional de P & D

A exemplo do que aconteceu com 18 de março nos USA, houve no X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada em Caxambu - MG, ocorrido de quatro a sete de maio do presente ano, uma mesa redonda sobre supercondutividade de alta Tc. Esta mesa ocorreu no dia cinco de maio e nela 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 - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP. Foram, também, anunciados resultados obtidos no Instituto de Física Gleb Wathagin - Unicamp. Esta mesa redonda foi moderada pelo representante do Instituto de Física da USP. No laboratório de baixas temperaturas do IFUSP, foram feitas as medidas de susceptibilidade magnética em materiais sintetizados pelos grupos do 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 anunciados, até o presente, 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 - RJ 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 próprio Instituto de Física da USP e outros grupos, como o de cerâmicas avançadas do IPEN e o de cerâmicas do CDTN - Nuclebrás de Belo Horizonte, também sintetizaram pastilhas supercondutoras. Na reunião anual da Associação Brasileira de Cerâmica, realizada em Brasília em 25 de maio deste ano, foram apresentados os resultados do IPEN e do IFQSCar e feitas demonstrações de levitação magnética (*Efeito Meissner*).

Os resultados apresentados até agora pelos grupos brasileiros foram uma repetição do que já foi feito no exterior, não tendo surgido, até o presente, nada de significativo ou de original que suplantasse os resultados obtidos em outros países.

Se, por um lado, foi enorme o interesse despertado em todos os físicos do mundo pela supercondutividade de alta Tc, por outro, isto nos causa uma certa frustração. O poderio tecnológico dos países mais avançados, sua infra-estrutura laboratorial e o volume de pesquisadores disponíveis voltados para as pesquisas com estes materiais já produziu um impressionante vo-

lume de resultados nestes últimos seis meses – algo inédito na física.

Para nós, dadas nossas condicionantes, fica difícil competir internacionalmente de forma acadêmica, apesar de termos demonstrado competência e capacitação tecnológica. Não se fazia no país pesquisas com estes materiais 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, dado os vultuosos investimentos que serão necessários.

Certamente, já passamos da fase em que os físicos andavam de um lado para outro, com fônias, nitrogênio líquido em garrafas térmicas e pastilhas supercondutoras penduradas em fios, fazendo demonstrações às agências financiadoras. Agora, passamos para a fase de depuração, e só realmente os grupos com razoável competência na área de materiais é que permanecerão na ocorrência. Em nossa opinião, não deverão mais ocorrer, pelo menos a curto prazo, as demonstrações do Efeito Meissner com outros compostos com a mesma facilidade com que foram feitas com os compostos à base de Y-Ba-Cu-O. Isto ficou, de certa forma, evidente no artigo do Physical Review Letters de 15 de junho onde os autores citam que a indicação de supercondutividade a altas temperaturas, numa amostra com flúor, é devida a pequenas quantidades de fases diamagnéticas (*supercondutoras*) embebidas no volume total ainda paramagnético (*não supercondutoras*). Nesta temperatura, produzem um sinal de susceptibilidade muito fraco, de difícil medida e de reprodutibilidade questionável.

Há um longo caminho a percorrer desde o estágio inicial, em que se reproduziram nos laboratórios brasileiros amostras do composto $YBa_2Cu_3O_x$ que apresentam um efeito Meissner considerável, até a produção de um fio que percole 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. O resultado – pó ou pastilha – sempre apresenta o efeito Meissner. A partir daí, 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

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.

Os elementos dessa matriz que estiverem assinalados por E indicam os grupos que já obtiveram resultados e por P, os grupos que apresentam um certo potencial de realização. Os números subscritos dão em alguns casos a indicação dos responsáveis pela execução das atividades ou coordenadores de projetos já em andamento. Nesta matriz pretendemos ser o mais fiel possível à realidade de nossas instituições.

Tabela 2: Identificação preliminar de Instituições e técnicas. Este primeiro levantamento foi organizado tomando-se por base grupos ou instituições com facilidades existentes (E) ou com potencial (P) para participar de um programa nacional. As instituições assinaladas com (*) são as que já divulgaram resultados com supercondutores de alta Tc. Os nomes abaixo são de alguns pesquisadores doutores envolvidos de alguma forma com este tema, ou que poderiam dar sua contribuição ao programa.

Pesquisadores Doutores		
E ₁	J. O. A. Paschoal	E ₁₇ H. Vargas
E ₂	S. P. Morato - coordenador de programa	E ₁₈ J. A. Varella
E ₃	N. D. Vieira e D. G. Leme	E ₁₉ H. C. Bastos - coordenador de programa
E ₄	J. C. Bressiani/A. H. Bressiani/K. Imakuma	E ₂₀ J. P. Andreetta
E ₅	L. Gomes	E ₂₁ J. C. Castro Neto
E ₆	R. Mucillo	E ₂₂ M. A. Aegerter
E ₇	M. M. F. Vieira	E ₂₃ B. J. Mokross/O. Hipollito
E ₈	E. C. Quadros	E ₂₄ E. D. Zanotto
E ₉	F. Missil	E ₂₅ E. Longo
E ₁₀	C. C. Becerra - coordenador de programa	E ₂₆ D. G. Pinatti
E ₁₁	A. Paduan F. e C. H. Westphal	E ₂₇ R. Nicolski/C. Lerner
E ₁₂	J. A. Fazzio/J. R. Leite	E ₂₈ P. C. Ribeiro/M. Rizzo
E ₁₃	O. Serra	E ₂₉ H. Saitovich
E ₁₄	S. Gama - coordenador de programa	E ₃₀ A. P. Guimarães
E ₁₅	C. L. Cesar	E ₃₁ J. Mendes F.
E ₁₆	R. Katyar	E ₃₂ G. F. Sá
		E ₃₃ M. Engelsberg
		E ₃₄ S. Rezende
		E ₃₅ A. G. Oliveira/O. Nassif
		E ₃₆ G. A. Barbosa

Com relação a mercados, a indústria de terras raras se depara com o chamado "problema do equilíbrio". Na realidade, tem-se 17 elementos de terras raras para o que se deve obter um equilíbrio entre disponibilidade e demanda. Para um determinado elemento, excluindo-se até certo ponto o ítrio, não existe um minério específico e, apesar das grandes diferenças na composição de OTR nos diferentes concentrados, a produção de um determinado elemento requer também o desenvolvimento de um mercado para os outros elementos. O processamento de diferentes minérios e concentrados minimiza, mas não elimina, este problema.

As importações brasileiras de elementos de terras raras correspondem, em sua maioria, a compostos químicos puros (99%), principalmente o óxido de cério usado nas indústrias de óptica, eletro-eletrônica e química. Nosso principal fornecedor é os USA. Importamos, também, pequenas quantidades de metais de terras raras puros. Em 1985, o total das importações representaram 54% do que foi obtido com as exportações de produtos puros de terras raras. Deve-se salientar, aqui, que o país já domina, em escala de laboratório, a tecnologia de fracionamento de terras raras de alta pureza (99,9%), como aquelas desenvolvidas na Nuclemon e no Ipen. A importação de óxidos de alta pureza poderá ser revertida, brevemente, encontrando-se substitutos nacionais.

As exportações brasileiras totalizaram, em 1985, US\$ 26 milhões, tendo decrescido em relação a anos anteriores como reflexo da depressão mundial da indústria siderúrgica. Nossos principais produtos desta pauta são o "misch-metal" e as ligas ferro-cério (100% das exportações em 1985). As exportações de cloretos de terras raras reduziram-se a zero em 1985, mas as cotações voltaram a ser competitivas, e a Nuclemon começou a exportar outra vez. Só em 1987, a Nuclemon já exportou 50 toneladas de cloretos de terras raras ao Japão, pretendendo chegar em dezembro com 500 toneladas.

O consumo interno de cloretos de terras raras tem aumentado nos últimos anos e reflete o aumento da demanda em materiais elaborados. A quase totalidade da produção é consumida na indústria siderúrgica (99%) e o restante vai para a indústria química (1%). Este quadro é um reflexo do aquecimento da nossa indústria siderúrgica, a despeito da depressão mundial no setor. A nível mundial, este mercado está em franca expansão e, mesmo antes dos supercondutores de alta Tc, ele reflete uma oferta antes dos supercondutores de alta Tc, ele reflete uma oferta rápida e crescente de produtos de alta tecnologia, como lâmpadas especiais, magnetos permanentes de alta potência (*neodímio-ferro-boro ou de samário-cobalto*), lasers de neodímio YAG (*granadas de ítrio e alumínio dopados com neo-*

dímio), etc. Este mercado de alta tecnologia representava, até o advento os novos supercondutores, menos que 6% do total consumido em terras raras.

Os demais 94% da produção total são consumidos em catálise, cerâmicas, vidros e siderúrgica. Nota-se, aqui, um fato interessante pois esta distribuição de 6/94 corresponde, exatamente, à distribuição natural entre as terras raras leves ou céricas e as terras raras pesadas ou ítricas nas monazitas. Desta forma, isto confirma o que foi dito anteriormente sobre o desenvolvimento de uma só fração das terras raras disponíveis que requer a procura de novos mercados para a outra fração, pois corre-se o risco de ter-se um aumento de preços para os produtos da primeira fração!

O mercado mundial apresenta hoje, antes dos novos supercondutores, uma razão de demanda para nível de reservas de 1/60. Isto permite uma certa folga no tocante ao próximo período de pesquisa e desenvolvimento de protótipos, pois não se esperam grandes demandas nos próximos anos. Como vimos anteriormente, sabe-se hoje que, nos novos supercondutores à base de Y-Ba-Cu-O, a substituição de ítrio por outras terras raras não altera o valor de Tc que está consolidado em 92K. Este fato vem facilitar as coisas de forma dramática pois a questão, anteriormente levantada, quanto ao "problema do equilíbrio", fica praticamente equacionada. Assim não haverá, em princípio, pressão e demanda recaindo somente sobre uma particular terra rara. Ainda são necessários estudos mais profundos e de pesquisa tecnológica com todas as terras raras para se poder transmitir ao mercado informações seguras, mas os resultados atuais têm mostrado que esta é a tendência.

Atualmente, os principais mercados para terras raras são as indústrias de cerâmicas e de vidros. No caso dos vidros, as terras raras são utilizadas para polimento e coloração. No caso das cerâmicas, são utilizadas como pigmentos, em sensores de oxigênio, capacitores, etc. A indústria de catalisadores vem a seguir, tendo-se observado uma queda de consumo de terras raras empobrecidas em cério ou de misturas e um crescimento do consumo de óxidos de cério usados em conversores catalíticos. A indústria metalúrgica vem em terceiro lugar, particularmente a siderúrgica. O perfil mundial de consumo de terras raras fica assim distribuído:

Cerâmicas e Vidros	37%
Catalisadores	33%
Metalurgia	25%
Outros	5%

Dentre os demais mercados, nota-se um crescimento acentuado da indústria de magnetos permanentes à base de

samário – cobalto ou dos recentes magnetos à base de neodímio-ferro-boro. Tais magnetos, aparentemente competidores entre si, apresetam na realidade uma certa complementaridade. O samário deverá ocupar a fatia de alta tecnologia deste mercado, enquanto que o neodímio ficará com a fatia mais comum. Este exemplo por si só já seria preocupante, pois o rápido desenvolvimento destes magnetos poderia causar um razoável impacto na indústria de terras raras, levando-se em consideração o problema do equilíbrio.

Os novos supercondutores certamente vão pressionar este setor, uma vez que o suprimento mundial de algumas terras raras é apertado face às razões já apresentadas como o problema do equilíbrio ou da taxa de crescimento diferencial. Desta forma, o futuro é ainda incerto e vai depender de resultados mais satisfatórios e de pesquisa dirigida, levando-se em conta a questão da disponibilidade e preço dos elementos terras raras.

Informações esparsas indicaram aumentos consideráveis de preços, em certos casos, e fechamento de exportações em outros, após o surgimento destes novos supercondutores. As últimas informações, entretanto, vindas dos USA são que os preços de insumos para uso em laboratório ainda não mudaram. Desta forma, é ainda muito cedo para se fazer qualquer previsão. Certamente teremos modificações no mercado, e casos anteriores como o do samário e do neodímio são os exemplos mais recentes e típicos de tais mudanças. O samário não tinha nenhuma aplicação até 1970 e hoje, com o nível de "output" balanceado, este elemento encontra-se em falta. No caso do neodímio, suas aplicações tradicionais em cerâmicas consomem hoje menos do que é produzido. Isto vem facilitar o rápido desenvolvimento da tecnologia de magnetos Nd-Fe-B. Acredita-se que, a médio prazo, a pressão de demanda para os novos supercondutores será igualmente distribuída entre todos os elementos ou mesmo favorecerá fracionamento a custo mais baixo – face aos resultados atuais de pesquisa fundamental.

O mercado de lítio já estava, no início do presente ano, em franca expansão. Os processamentos deverão, então, ser reavaliados de forma a alterar as distribuições de terras raras no material inicial de alimentação para o processamento de concentrados de lítio (*xenotima*) e no processamento de maiores volumes de concentrados convencionais.

A indústria de terras raras deve ser muito flexível e reagir prontamente às mudanças de mercado face às alterações que ocorrem em tecnologia de ponta. O melhor que se tem a fazer neste segmento é antecipar investimentos para a preparação de grandes mudanças, pois este mercado é realmente imprevisível. Finalmente, a produção mundial de terras raras em 1985 nos permite afirmar que esta indústria é relativamente pequena

quando comparada com outras indústrias de elementos ainda mais raros como o cobre e o chumbo.

Produção Mundial de OTR	47,5 x 10 ⁹ toneladas
Cobre	8,4 x 10 ⁹ toneladas
Chumbo	3,5 x 10 ⁹ toneladas

Além disso, a razão de demanda com relação às reservas mundiais, sendo hoje de um para 60, dá-nos também uma folga relativa a nível de suprimento e preços.

Conclusões e recomendações

1. Desafios Científicos e Tecnológicos – O que fazer

A descoberta dos supercondutores a alta temperatura apresenta uma série de desafios fundamentais que só poderão ser vencidos com uma pesquisa firme e continuada, realizada por grupos de caracterizada competência *em Física da Matéria Condensada*. Inicialmente, as questões mais fundamentais a serem atacadas, que tais grupos devem se propor a solucionar, são as seguintes:

- a) por que estes materiais são supercondutores?
- b) por que as transições de campo crítico são estreitas?
- c) o que limita a corrente crítica?
- d) qual o comportamento destes materiais sob campos magnéticos?
- e) qual o efeito do dano físico ou químico?
- f) qual o papel dos defeitos e impurezas na supercondutividade?

Sabe-se que estes materiais, em seu estágio atual, são quebradiços (*são 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 busca do entendimento dos processos de supercondutividade fatalmente 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. Sabe-se hoje que nos sistemas Y-Ba-Cu-O:

- a) remoção do oxigênio destrói a supercondutividade;
- b) a adição de flúor pode aumentar T_c ;
- c) o oxigênio é removido de cadeias planares nestes materiais;
- d) a temperatura crítica é independente da dopagem com terras raras;
- e) a supercondutividade é anisotrópica.

Para o Brasil, as conclusões preliminares quanto à dopagem são muito atraentes. A substituição do ftrio por terras raras ou mesmo por uma mistura delas para o caso dos sistemas Y-Ba-Cu-O vão favorecer o barateamento de um processo industrial de fracionamento de terras raras, como dissemos anteriormente. Além disso, a composição R-Ba-Cu-O, onde R significa ftrio ou terras raras, causa-nos uma tranqüilidade quanto a estes insumos uma vez que detemos reservas de ftrio e de terras raras retirados das areias monazíticas e da xenotima.

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 materiais flexíveis com valores de densidade de corrente crítica da mesma ordem ou melhores do que a dos supercondutores metálicos. Estes valores são hoje os seguintes:

Ligas Nióbio Titânio (NbTi):

Material Supercondutor 10⁵a 10⁶ A/cm²
Fios Supercondutores 3 x 10⁴ a 3 x 10⁵ A/cm²

Ligas Nióbio Estanho (Nb₃Sn):

Material Supercondutor 10⁵a 10⁷ A/cm²
Fios Supercondutores 3 x 10⁴ a 3 x 10¹⁰ A/cm²

YBa₂Cu₃O₇

Supercondutores Cerâmicos (a 4.2K) 10⁴a 10⁵ A/cm²
..... (a 77 K) 10³ A/cm²
Filmes Finos (a 4.2K) 10⁶ A/cm²
..... (a 77K) 10⁵ A/cm²
Monocristais (a 4.5K) 3 x 10⁶ A/cm²

Como se pode ver, os supercondutores Y-Ba-Cu-O na forma de filmes finos ou monocristais apresentam valores similares aos supercondutores já na forma de fios fabricados. Estes dados por si só já representam um estímulo à pesquisa tecnológica com estas novos materiais e mostram o caminho para onde o maior volume de investimentos em P & D deve ser direcionado: dispositivos, fios, filmes, fitas e monocristais.

Alguns desafios tecnológicos para o sistema Y-Ba-Cu-O por aplicação poderiam ser listados da seguinte forma:

Eletrônica:

- filmes finos com valores altos de densidade de corrente crítica a 77K;
- controle do processo de dano;
- controle da quantidade de oxigênio durante o processamento;
- solucionar a questão da degradação devido à umidade ou à perda de oxigênio.

Transmissão de Potência:

- obtenção de altas densidades de corrente crítica a 77K.

Magnetos:

- obtenção de altas densidades de corrente crítica a 77K e sob campos magnéticos;

- obtenção de fios e fitas supercondutoras flexíveis;
- desenhar e construir estruturas de suporte.

Cavidades:

- 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 os componentes principais dos enrolamentos de magnetos e das linhas de transmissão. Com 3Km de cabo tem-se, por exemplo, um magneto supercondutor para utilização prática!

2. Sugestões para um Programa Nacional – Como Fazer

Em função do que já foi anteriormente discutido, sua problemática e face às condicionantes apresentadas, a definição de um programa nacional sobre supercondutividade, com a devida prioridade que esta questão necessita, deverá, numa primeira aproximação, abranger três grandes universos de atividades, ou subprogramas, que são:

- prospecção, mineração e produção de insumos básicos;
- pesquisa básica e tecnológica: processamento e caracterização;
- desenvolvimento de dispositivos e transferência para o setor produtivo.

No tocante ao item a), a questão está razoavelmente equacionada uma vez que o país ocupa o 4º lugar em reservas mundiais de terras raras e de ítrio e o 6º em produção de concentrados. Todas as etapas de produção das terras raras, desde a lavra até o fracionamento do minério, são bem conhecidas e controladas pela Nuclemon, uma subsidiária da Nuclebrás. Outras entidades, como o IPEN e a FTI, detêm também a tecnologia, em escala de laboratório, do fracionamento das terras raras. Desta forma, deve-se estabelecer uma política para os setores que já detêm esta tecnologia, incentivando-os a elaborar projetos, visando à construção de usinas em escala piloto. Tais usinas seriam projetadas em função das necessidades de insumos dos grupos de P & D em supercondutores.

Quanto aos aspectos estratégicos relacionados aos insumos básicos, já existe um controle exercido pela CNEN que autoriza as exportações dos metais e óxidos de terras raras e de ítrio, pois estes insumos são de interesse da tecnologia nuclear. O estágio presente do desenvolvimento da tecnologia de

fracionamento de terras raras encontra-se em nível avançado justamente por ser esta tecnologia uma das conseqüências do nosso programa nuclear autônomo. Os materiais nucleares são submetidos a um rigoroso controle de qualidade que confere aos mesmos o grau de qualidade nuclear. Logo, a capacidade técnica de que dispomos para a produção de terras raras e seu controle analítico são fatores muito favoráveis ao programa de supercondutores. Trata-se, agora, de realizar uma análise aprofundada no sentido de se decidir, também, uma política para a criação de reservas estratégicas e de revisão da pauta de exportações destes materiais.

Quanto aos itens b) e c), alguns passos importantes já foram dados. No dia 24 de maio de 1987, a Finep realizou, no Rio de Janeiro, uma reunião de avaliação da situação nacional com os vários grupos interessados, solicitando aos mesmos, sugestões de programas. Estas sugestões estão sendo pauta de discussões internas na Finep. A Associação Brasileira de Cerâmica (ABC) promoveu no dia 24 de julho o I Encontro Nacional sobre Cerâmicas Supercondutoras com representantes da Finep, CNPq e da Comunidade de Cientistas. Foram estabelecidos amplos debates, e apresentada uma proposta de criação de uma comissão coordenadora de programa. Esta proposta obteve a ampla aceitação dos presentes.

Esta comissão deverá colher, a curtíssimo prazo, subsídios junto à comunidade científica, articulando-se também com representantes das várias instituições interessadas e entidades de classe como SBF, ABC, SBQ, ABM, e outras, no sentido de apresentar ao MCT uma proposta de um programa nacional de supercondutividade.

As tarefas mais árduas dessa comissão serão organizar a competitividade e evitar a pulverização de recursos. Diferentemente de outros programas de P & D, a supercondutividade de alto Tc exige agilidade no caso de querermos competir internacionalmente. Para tal, vamos ter que nos organizar, pois se rompeu o equilíbrio dinâmico tradicional entre pesquisa, tecnologia e produto acabado. Competitividade é salutar, desde que exercida com ética e profissionalismo. A pulverização de recursos, neste caso, pode, também, redundar em resultados desastrosos. Se nações mais avançadas, como USA, Japão e França, já puseram em prática a formação de consórcios entre universidades, institutos e empresas para desenvolver seus programas de supercondutividade, nós, por razões muito maiores, deveremos fazer o mesmo. Além disso, supercondutividade a alta Tc é um tema importante demais para que critérios outros, que não exclusivamente os de competência e adequação de infra-estrutura, sejam adotados para a concessão de recursos aos grupos interessados.

3. Conclusões Finais

A descoberta da supercondutividade a altas temperaturas é um exemplo a ser seguido. Como já dito anteriormente, ela não se deu por acaso, mas é fruto de um investimento cuidadoso e planejado em P & D. Tomemos, por exemplo, o que ocorre nos USA a nível de investimentos. As cinco principais empresas americanas que mais investiram em P & D em todas as áreas em 1986, foram:

1. General Motors	US\$ 4,16 bilhões
2. IBM	US\$ 3,98 bilhões
3. Ford Motor	US\$ 2,31 bilhões
4. AT & T	US\$ 2,28 bilhões
5. General Electric	US\$1,30 bilhões

Destas empresas, a IBM – onde seu grupo de pesquisadores indicou o caminho para a descoberta dos supercondutores de alto Tc – e a AT & T estão na corrida entre os maiores investidores de P & D em supercondutividade. Segundo nossa avaliação, a IBM mantém a liderança mundial neste campo.

O total de investimentos, em 1986, em P & D nos USA em todas as áreas foi de US\$ 65 bilhões, dos quais US\$ 51 bilhões são referentes a investimentos feitos com as receitas das empresas e o restante é devido a investimentos governamentais (22% do total que é investido em P & D). As estatísticas também comprovam que o investimento em P & D das indústrias americanas tem apresentado um retorno muito favorável, pois, em 1986, 3,5% de suas vendas foram devidas a investimentos em P & D comparado com 2% na década passada. Apesar disso, os USA sentem ameaças quanto à sua tecnologia e competitividade industrial. As empresas americanas detectaram uma competição superaquecida tanto domesticamente, quanto em relação a outros países. Assim, seu investimento em P & D tem sido aumentado nos últimos anos. A nível de nações, enquanto o Japão gasta 3% do seu produto nacional bruto em P & D, os USA ficou para traz com investimentos em torno de 2,5% de seu PNB, o que tem sido motivo de preocupação dos americanos a fim de manter-se a competitividade de sua indústria.

O aumento dos investimentos em P & D tem sido causado, principalmente, por tecnologias avançadas como a biotecnologia e a revolucionária supercondutividade. Empresas e governos de países como USA e Japão estão convencidos de que apostar no futuro via P & D, além de ser um bom negócio, é a chave para uma vitalidade econômica continuada. Traçando-se um paralelo com o caso do Brasil e considerando-se que a participação do setor produtivo privado em P & D é praticamente inexistente, não resta outra alternativa senão a de caber ao governo e às estatais brasileiras uma grande parcela da respon-

sabilidade no sentido de investir maciçamente em P & D. Há que se considerar, também, que nossos quadros de pesquisadores ainda estão muito aquém das necessidades de uma economia de US\$ 300 bilhões de PNB como a nossa.

Se tomássemos o exemplo de quanto o governo dos USA aplica em P & D (*0,055% do seu PNB*) e o transpusessemos para o caso brasileiro, isto corresponderia a US\$ 1,65 bilhão, ou seja, aproximadamente Cz\$ 80 bilhões, uma cifra considerável tendo-se em conta o que é correntemente aplicado no Brasil. Obviamente, não teríamos, hoje, quadros de recursos humanos necessários e suficientes para absorver tal volume de recursos. Além disso, esses números se tornam ainda mais dramáticos se lembrarmos que, no caso americano, 78% dos investimentos em P & D provém da iniciativa privada.

As grandes nações já se deram conta de que o próximo ciclo econômico será o da tecnologia. Corremos também o risco de ficarmos para trás, dada a velocidade com que as tecnologias de ponta vêm se desenvolvendo. Com a supercondutividade não é diferente. Embora tivéssemos demonstrado competência técnica e adequação do alto nível de nossas pesquisas para reproduzir com uma grande velocidade os resultados internacionais de supercondutividade em alta temperatura, não devemos nos iludir com a euforia inicial causada pelos bons resultados obtidos. Pouquíssimo foi feito nos últimos dois meses no Brasil, enquanto que o avanço das pesquisas no exterior já é incalculável tanto do ponto de vista básico como tecnológico. Isto nos dá uma medida da nossa própria condição: poucos recursos materiais e humanos; dificuldades de importação de equipamentos; rotatividade de mão-de-obra científica e técnica; dificuldades de fixação de equipes; dificuldades de infra-estrutura; baixos salários de técnicos, entre outros.

O governo está sensível a estes problemas e a questão salarial está, aparentemente, sendo equacionada. O grande número de bolsas anunciado pelo MCT vem demonstrar o quanto este ministério tem se voltado à questão de formação de recursos humanos.

Acreditamos ser esta a mais importante decisão no sentido de colocarmos os pés no futuro. Como esta, outras decisões políticas, de similar alcance, dar-nos-ão uma chance um pouco maior de termos, para nossos descendentes, um país avançado e moderno, pois, caso contrário, seremos relegados a ocupar um papel secundário na história, como meros fornecedores de matéria-prima e clientes de tecnologia.

Assim, a supercondutividade a altas T_c 's oferece uma possibilidade de nos projetarmos definitivamente no fechado clube da alta tecnologia, pois é justamente nele que temos as maiores chances de bem sucedidas aplicações. Temos os in-

sumos necessários, resguardadas possíveis novas descobertas que alterem drasticamente essas perspectivas! Temos competência técnica! Cabe, agora, ao governo a responsabilidade histórica da tomada de decisão política no sentido de implantar um programa de longo prazo e de longo alcance. . .

AGRADECIMENTOS

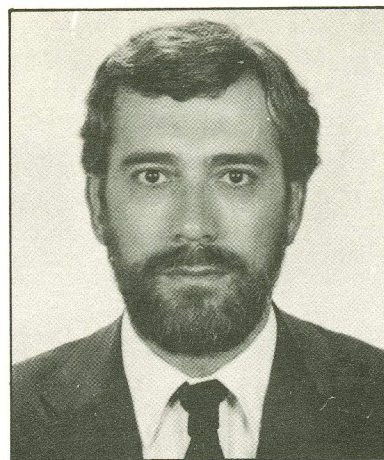
Agradecemos as sugestões e colaboração de Saul Suslick, Henriette T. P. Morato, Martha M. F. Vieira, José O. A. Paschoal, Nilson D. Vieira Jr., Suely C. Santos Mary P. Z. Igami e Daltro G. Pinatti.

São Paulo, 27 de julho de 1987

Referências bibliográficas

1. ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, Brasília, v. 9, 1985.
2. BORGES, L. F. Terras Raras. *Sum. Min.*, 6:94-5, 1986.
3. CAI, X. et alii. Experimental Evidence for Granular Superconductivity in Y-Ba-Cu-O at 100 to 160K. *Phys. Rev. Lett.*, 58(26):2798-2801, 1987.
4. CAVA, R. J. et alii. Bulk Superconductivity at 91K in Single Phase Oxygen-Deficient Perovskite $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{9-8}$. *Phys. Rev. Lett.*, 58(16):1676-9, 1987.
5. CHAUDHARI, P. et alii. Critical-Current Measurements in Epitaxial Films of $\text{YBa}_2\text{CuO}_{7-x}$ Compound. *Phys. Rev. Lett.*, 58(25):2684-6, 1987.
6. DINGER, T. R. et alii. Direct Observation of Electronic Anisotropic in Single-Crystal Y, $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. *Phys. Rev. Lett.*, 58(25):2687-90, 1987.
7. HULM, J. K. & LAVERICK, C. International Cooperative-Colaborative Perspectives. Superconductivity Science & Technology. In: APPLIED superconductivity: Proceedings of the 1986 Conference. . . , in Baltimore, Sept. 28-Oct. 3, 1986. (Separata).
8. KHURAMA, A. Superconductivity Seen Above the Boiling Point of Nitrogen. *Phys. Today*, 40(4):17-23, 1987.
9. LAVERICK, C. The 1985 Niobium Demand Report Revisited. In: APPLIED Superconductivity: Proceedings of the 1986 Conference . . . , Held in Baltimore, Sept. 28-Oct. 3, 1986. (Separata).
10. LEMONICK, M. D. et alii. Superconductors. *Time*, (19) May 11,:26-33, 1987.
11. NOT-SO Superconductors. *The Economist*, June 13,:93-5, 1987.
12. NUCLEBRÁS/NUCLEMON. Os Avanços em Terras Raras. *Min. Extr. Proc.*, 13(124):106-7, 1987.
13. OVSHINSKY, S. R. et alii. Superconductivity at 155K. *Phys. Rev. Lett.*, 58(24):2579-81, 1987.
14. PORT, O. He's Walking Tall Where IBM Wouldn't Tread. *Bus. Week*, May 4,:76, 1987.
15. SIWOLOP, S. ed. IBM Cracks Superconductivity's Ceramic Barrier. *Bus. Week*, May 25,:73, 1987.
16. SMITH, E. Superconductors. *Bus. Week*, Apr. 6,:54-7, 1987.
17. SMITH, E. The Promised Land May be Near for "ovonics". *Bus. Week*, June 15,:49, 1987.
18. SMITH, E. et alii. Putting Superconductors to Work Super Fast. *Bus. Week*, May 18,:64, 1987.

19. SMITH, E. T. ed. Superconductivity Breaks the Room - Temperature Barrier. *Bus. Week*, June 29,:51, 1987.
20. SUMÁRIO MINERAL, Brasília, v. 6, 1986.
21. TOGNET, J. P. Some Aspects of the Rare Earths Industry. In: STRATEGIC Minerals and Materials: Proceedings of the International Symposium. . . , Held in Rio de Janeiro, Mar. 18-19, 1987 (Separata).
22. WILSON, J. W. The New World of Superconductivity. *Bus. Week*, Apr. 6,:58-60, 1987.



Spero Penha Morato

Graduado e pós-graduado pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, obteve, em 1975, o título de Ph.D. em física do estado sólido pela Universidade de Utah, EUA.

Em 1982, recebeu o Prêmio Governador do Estado pelo mérito de ter inventado um dosímetro.

Tem inúmeros artigos sobre física de defeitos em cristais publicados em revistas internacionais. Já apresentou mais de 50 trabalhos em conferências nacionais e internacionais sobre o mesmo tema.

No IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, lidera um projeto de desenvolvimento de lasers de estado sólido, tendo em vista a completa nacionalização da tecnologia envolvida neste campo. Participa ativamente na síntese de novos materiais e em crescimento de cristais.

Desde 1982, chefia o Departamento de Processos Especiais do IPEN.