



EDITAL FAPERGS/CNPq nº 12/2014
PROGRAMA DE APOIO A NÚCLEOS DE EXCELÊNCIA

PRONEX

Projeto:

Correlações Eletrônicas em Materiais Avançados:
Supercondutividade e Magnetismo

UFRGS UFSM UFPel FURG UNIPAMPA

2015

Projeto PRONEX – Edital 12/2014
*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

PROponentes

- Coordenador: Dr. Paulo Pureur Neto
Prof. Titular do Instituto de Física – UFRGS
- Vice-Coordenador: Dr. Miguel Angelo Cavalheiro Gusmão
Prof. Titular do Instituto de Física – UFRGS
- Pesquisadores Principais: Prof. Dr. João Batista Marimon da Cunha (UFRGS)
Prof. Dr. Lucio Strazzabosco Dorneles (UFSM – coordenador local)
Prof. Dr. Fábio Mallmann Zimmer (UFSM)
Prof. Dr. Fábio Teixeira Dias (UFPEL – coordenador local)
Prof. Dr. Jorge Luiz Pimentel Jr. (FURG – coordenador local)
Prof. Dr. André Gundel (UNIPAMPA – coordenador local)
- Pesquisadores Participantes: Prof. Dr. Gilberto Luiz Ferreira Fraga (UFRGS)
Prof. Dr. Antonio Marcos Helgueira de Andrade (UFRGS)
Prof. Dr. Luiz Fernando Schelp (UFSM)
Prof. Dr. Marcos André Carara (UFSM)
Prof. Dr. Eleonir Calegari (UFSM)
Prof. Dr. Valdemar das Neves Vieira (UFPEL)
Prof. Dr. Carlos Alberto Vaz de Moraes Jr. (UFPEL)
Profa. Dra. Rosângela Menegotto Costa (FURG)
Prof. Dr. Matheus Jatkoske Lazo (FURG)

DADOS GERAIS DO COORDENADOR-PROponente

Paulo Pureur Neto
CPF: 182417430-68 ; RG: 8013315158 (SJS RS)
End.: Av. Bagé, 1244 apto 601, 90460-080 Porto Alegre RS
Tel: (51) 3331.3888 , (51) 3308.6458, FAX (51) 3308.7286, email: ppureur@if.ufrgs.br

ÍNDICE GERAL DO PROJETO DE PESQUISAS

Preâmbulo e Linhas Gerais	3
Linhas de Pesquisa em Supercondutividade	4
Linhas de Pesquisa em Magnetismo	10
Outros Temas	15
Instrumentação	17
Encontros de Trabalho	19
Resumo do Orçamento	20

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

Preâmbulo e Linhas Gerais

O presente Projeto de Pesquisas tem por objetivo principal o desenvolvimento de pesquisa básica, de natureza experimental e teórica, sobre efeitos quânticos produzidos por fortes correlações eletrônicas em novos materiais sólidos com características físicas diferenciadas. Muitos destes materiais e suas propriedades tem grande potencialidade para aplicações tecnológicas. O Projeto envolve a participação de equipes de 5 Instituições Federais sediadas no Estado do Rio Grande do Sul, caracterizando a organização do Núcleo de Excelência PRONEX na forma de uma Rede de Pesquisas. Tais Instituições são: (i) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS – Instituição proponente); (ii) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); (iii) Universidade Federal de Pelotas (UFPEL); (iv) Universidade Federal de Rio Grande (FURG); (v) Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

Este Núcleo tem atuado consistentemente e com excelentes resultados na formação de recursos humanos de alta qualificação, colaborando assim para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das Instituições Universitárias e Tecnológicas do Estado e do País. As equipes constituintes do Núcleo apresentam um histórico de trabalho articulado em Rede que tem sido continuamente apoiada por financiamentos de programas PRONEX. Assim, desde o primeiro programa PRONEX, de 1996, financiado inicialmente pela FINEP e que envolvia colaborações em nível nacional, as equipes da UFRGS (que foi a Instituição proponente) e da UFSM atuaram em parceria. No segundo PRONEX, cujo edital foi lançado em 2004 pela FAPERGS, equipes da UFPEL e da UNIPAMPA estiveram associadas às equipes da UFRGS e UFSM. O financiamento oferecido pelo PRONEX-2004 foi fundamental para a organização e implantação do grupo de pesquisas em física experimental da UFPEL. Este fato foi fundamental para a consolidação do Programa de Pós-Graduação em Física daquela Universidade. Na terceira edição do programa PRONEX, cujo edital foi lançado pela FAPERGS em 2009, e cuja renovação está sendo pleiteada através do presente Projeto de Pesquisas, uma equipe experimental e um grupo teórico da FURG se associaram aos proponentes anteriores, estabelecendo a configuração atual do Núcleo. Recursos do PRONEX-2009 foram fundamentais para a implantação do primeiro laboratório experimental do Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) da FURG. Este laboratório tem tido importância decisiva para a consolidação do Programa de Pós-Graduação em Física daquela Instituição.

O apoio do PRONEX, portanto, tem possibilitado o efetivo desenvolvimento da Física Experimental nas Instituições do interior do Rio Grande do Sul, contribuindo assim para que as atividades de pesquisa científica de alto nível e a formação qualificada de recursos humanos ocorram de modo equilibrado nas diversas Universidades Federais do Estado. O PRONEX tem, no caso do atual Núcleo proponente, motivado e colaborado no sentido de propagar uma cultura cooperativa, a qual é fator importante para a obtenção de um desenvolvimento científico dinâmico, original e eficaz. O apoio financeiro do PRONEX tem sobretudo contribuído para o contínuo desenvolvimento do ferramental experimental nos laboratórios de pesquisa das equipes associadas, com evidentes reflexos na qualificação dos trabalhos de pesquisa realizados.

Restringindo-se aos projetos de 2004 e 2009, que envolveram apenas pesquisadores do Estado, o Núcleo proponente foi responsável pela publicação de 157 artigos científicos em revistas

de circulação internacional indexadas, e pela orientação de 35 Dissertações de Mestrado e 18 Teses de Doutorado. Dentre muitas outras atividades científica e academicamente relevantes, estes dados mostram a importância que adquiriu o programa PRONEX na promoção da pesquisa científica na importante área de Propriedades Eletrônicas de Sólidos no estado do Rio Grande do Sul. Embora, os recursos alocados na renovação presentemente solicitada não permitam que sejam alcançadas significativas melhorias no ferramental investigativo do Núcleo, será possível preservar a Rede de Pesquisa, aprofundando os estudos desenvolvidos nos temas do Projeto e fortificando e ampliando os laços de colaboração estabelecidos ao longo de muitos anos.

O tema de pesquisas do presente Projeto contempla estudos experimentais e teóricos sobre uma das mais importantes fronteiras de conhecimento na área da Física da Matéria Condensada. A compreensão detalhada dos efeitos de correlações eletrônicas (efeitos de muitos corpos) representa, talvez, o maior desafio contemporâneo desta área do conhecimento. Em particular, nos tradicionais e fundamentais campos da supercondutividade e do magnetismo se tem obtido grandes avanços em anos recentes, com evidentes consequências em aplicações tecnológicas. Desta forma, o presente Projeto de Pesquisas se constitui, em muitos aspectos, numa renovação do projeto submetido pelo mesmo núcleo de pesquisadores ao programa PRONEX em 2009.

Neste Projeto objetiva-se, dentre outros sub-temas, o estudo dos novos supercondutores ferro-pnictídeos, que oferecem a oportunidade de investigação da interação entre os fenômenos da supercondutividade e magnetismo. Na linha de supercondutividade também se propõe o estudo (teórico e experimental) dos cupratos de alta temperatura crítica, que representam um paradigma do problema de correlações eletrônica. O interesse no estudo de tais sistemas tem sido renovado em razão das recentes observações de supercondutividade fora do equilíbrio em amostras destes sistemas em temperaturas próximas à ambiente. As principais técnicas experimentais propostas compreendem medidas de propriedades de magneto-transporte, de magnetização, magnetostricção e magneto-impedância. Na linha do magnetismo propõe-se o estudo de sistemas intermetálicos de terras-raras, com ordens magnéticas complexas e com efeitos de dimensionalidade reduzida. A dinâmica da magnetização em sistemas do tipo filmes finos meso e nanoestruturados também será estudada por diferentes grupos associados no Projeto usando técnicas de magnetometria. Impedanciometria e ressonância ferromagnética também são técnicas disponíveis nos laboratórios do Núcleo. Transporte elétrico dependente de spin em amostras volumétricas, e na forma de filmes finos nanoestruturados, é outra das linhas de pesquisa propostas no presente Projeto. Efeitos de desordem, frustração e de flutuações quânticas e térmicas nas proximidades de transições magnéticas também serão estudados, tanto experimentalmente quanto teoricamente.

Também faz parte do Projeto o desenvolvimento de instrumentação que visa aperfeiçoar e expandir o ferramental investigativo dos Laboratórios associados. Este é um aspecto importante da pesquisa em física experimental, ao qual se tem dado pouca atenção na atualidade da pesquisa científica no País, que contribui com a capacitação do pessoal técnico e pode levar ao desenvolvimento de novas tecnologias

Outros problemas, próprios à fenomenologia das correlações eletrônicas em sólidos, tais como a transição metal-isolante nos cenários experimental e teórico (tipo Mott-Hubbard) também merecerão investigação no âmbito do Núcleo, conforme discutido no texto do Projeto.

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

LINHAS DE PESQUISA

I. SUPERCONDUTIVIDADE

I.a *Correlações Eletrônicas na Fase Normal dos Cupratos Supercondutores: Pseudogap*

A baixa dimensionalidade, associada a fortes efeitos de correlações eletrônicas, fazem dos cupratos supercondutores de alta temperatura crítica (HTSC) sistemas modelo para o estudo experimental de efeitos relacionados a estados eletrônicos complexos [1]. Em especial, um dos temas de grande relevância e atualidade na pesquisa experimental e teórica sobre estes materiais é o comportamento não convencional geralmente observado nas propriedades eletrônicas do estado normal. Diversas experiências termodinâmicas, magnéticas, de transporte elétrico, óticas, espectroscópicas, de espalhamento de nêutrons e outras evidenciam, em amostras sub-dopadas, a abertura de um pseudogap em torno do nível de Fermi abaixo de uma dada temperatura característica, T^* , que é nitidamente superior à temperatura crítica supercondutora, T_c . [1]

A origem do fenômeno do pseudo-gap tem sido objeto de intensos debates teóricos. Os modelos propostos dividem-se em duas grandes categorias. Uma das linhas de interpretação atribui o pseudogap a flutuações supercondutoras, sem coerência de fase de longo alcance. A segunda variante de modelos atribui o pseudogap a um ordenamento concorrente ao estado supercondutor, porém relacionado com fortes efeitos de correlações eletrônicas. Diferentes estados com ordenamento de carga, ou ordenamento magnético, relacionados a efeitos de separação de fases ou desordem, têm sido propostos para explicar o fenômeno do pseudogap.

A proposta desta linha de pesquisas é o estudo dos efeitos do pseudogap em amostras monocristalinas e filmes finos de $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ (Bi-2212) e $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (YBCO), com diferentes concentrações de oxigênio. Medidas de magnetotransporte (resistividade elétrica, magneto-resistência e efeito Hall) e magnetização, principalmente, são propostas. O estudo contempla o crescimento e caracterização de monocristais de Bi-2212 e variação da concentração de portadores através do controle da quantidade de oxigênio nas amostras [3]. As amostras de YBCO estão disponíveis. As medidas de magneto-transporte serão efetuadas com a plataforma PPMS disponível e operacional no Laboratório de Supercondutividade e Magnetismo do IF-UFRGS. Eventualmente, uma nova plataforma “cryogen free”, adquirida pela UFPel, também poderá ser usada. A disponibilidade deste novo sistema é importante, pois permite a realização dos experimentos mesmo que haja indisponibilidade de hélio líquido. As medidas magnéticas auxiliares também serão realizadas no Laboratório da UFRGS, mediante o uso de um magnetômetro de SQUID.

O Bi-2212 admite a exploração de estados superdopados (cujo conteúdo de oxigênio está acima do valor ótimo), possibilitando assim o estudo experimental de toda a extensão do “domo” supercondutor no diagrama de fases temperatura versus dopagem [4]. A investigação de efeitos de

impurezas também poderá merecer atenção, dependendo das possibilidades oferecidas pelo método de fabricação das amostras. A proposta de estudo sistemático do efeito Hall para obtenção de informações sobre a fase pseudogap é pioneira, embora seja bem conhecido (e debatido) o comportamento não-convencional da resistividade de Hall na fase normal dos cupratos supercondutores [5]

Investigações de natureza teórica sobre a natureza microscópica do pseudogap nos HTSC, envolvendo o formalismo de Mott-Hubbard, tem sido realizadas e serão continuadas e aprofundadas [6].

A linha de trabalho experimental envolve as equipes da UFRGS e da UFPel e se constitui em parte dos temas de duas Teses de Doutorado em andamento no Instituto de Física – UFRGS. A linha de trabalho teórica é desenvolvida pelo grupo da UFSM.

[1] E. Dagotto, Science 309 (2005) 257.

[2] The pseudo-gap in high temperature superconductors: an experimental survey, T. Timusk and B. Statt, Rep. Prog. Phys. 62 (1999) 61.

[3] G.D. Gu et al, Supercond. Sci. Technol. 11 (1998) 1118.

[4] R. Sieburger et al. Physica C 181 (1991) 335

[5] N.P. Ong, Physical Properties of High Temperature Superconductors, vol II, ed. D.M. Ginsberg (World Scientific) p. 459 (1990).

[6] E. Calegari, S.G. Magalhães, C.M. Chaves, A. Troper, Solid State Commun. 158 (2013) 20.

I.b *Estudo experimental de propriedades de magneto-transporte dos ferro-pnictídeos tipo 122 com dopagem no sítio do Fe*

A recente descoberta dos supercondutores com base em Fe-As (ferro-pnictídeos) tem motivado um intenso debate sobre a interação e eventual coexistência entre ordenamentos magnético e supercondutor, dada o elevado conteúdo em ferro nos compostos. No caso dos sistemas ternários do tipo 122 $[Ba_{1-x}A_xFe_2As_2]$ ($A = K, Na, Rb$) e $BaFe_{2-x}T_xAs_2$ ($T = Co, Ni, Ru, Cu$ etc) dopados (com K, Na, Co, etc) o estado supercondutor parece evoluir a partir de uma ordem do tipo onda de densidade de spin, dependendo da concentração do elemento dopante [7].

No presente Projeto, pretende-se realizar estudos de propriedades de magneto-transporte (magneto-resistência e efeito Hall) em monocristais de sistemas 122 do tipo $BaFe_{2-x}T_xAs_2$. As impurezas diluídas em diferentes concentrações são Co, Cu, Ni e Mn. O objetivo é a identificação de transporte por duas correntes e a natureza das flutuações de natureza magnética na fase normal dos compostos investigados. As amostras monocristalinas são crescidas por colaboradores da UNICAMP e do CBPF.

Uma variante desta linha de trabalho é o estudo de monocristais de ferro-calcogenetos $FeSe_{0.5}Te_{0.5}$ [8], que envolve técnicas de caracterização por microscopia ótica e eletrônica e medidas de propriedades magnéticas em altos campos. Este tópico em particular é desenvolvido em colaboração entre UFRGS e FURG, com apoio de pesquisador do serviço de altos campos magnéticos de Dresden, Alemanha.

A linha de pesquisas nos ferro-pnictídeos é parte do tema de uma Tese de Doutorado em andamento no IF-UFRGS.

[7] K. Ishida, Y. Nakai, H. Hosono, J. Phys. Soc. Jpn 78 (2009) 062001

[8] J.L. Pimentel Jr., P. Pureur, M.A. Avila, R.A. Ribeiro, J. Phys: Conf. Series 480 (2014) 012016.

I.c *Magnetostricção em supercondutores de alta temperatura crítica*

As propriedades magneto-elásticas dos sólidos referem-se à interação entre campos magnéticos (externos ou internos) e o campo de deformações da estrutura cristalina. Dentre estas propriedades, a magnetostricção é particularmente importante. A magnetostricção de forma descreve as componentes de deformação linear de uma estrutura sólida decorrentes da aplicação de um campo magnético externo. A magnetostricção de volume refere-se à variação do volume de uma amostra sólida resultante da aplicação do campo magnético. Os supercondutores de tipo II, na fase de vórtices, apresentam magnetostricção em razão do aprisionamento (pinning) dos vórtices por imperfeições da rede cristalina [9]. O efeito pode ser pronunciado em sistemas com pinning forte. Assim, importantes informações sobre as propriedades da rede de vórtices e do pinning podem ser obtidas através da magnetostricção [10].

Nos anos iniciais da pesquisa sobre os cupratos supercondutores de alta temperatura crítica, o estudo de suas propriedades magnetostrictivas mereceu atenção especial [9]. Estudos experimentais foram feitos, principalmente, em amostras cerâmicas e monocristalinas dos sistemas YBCO [11] e Bi-2212 [9]. Os resultados revelaram efeitos são duas ou três ordens de grandeza maiores que em supercondutores convencionais. Em geral, tais efeitos são interpretados com base no modelo de estado crítico. Embora este início promissor, a pesquisa na área diminuiu sensivelmente e a tema ainda permanece insuficientemente estudado. Surpreendentemente, segundo nosso conhecimento, não foram feitos estudos detalhados da magnetostricção em amostras texturizadas do sistema YBCO. Em tais sistemas, que tem grande interesse tecnológico, o pinning é extremamente forte. Portanto, o conhecimento dos efeitos magnetostrictivos nestes materiais é de grande importância, pois poderão influenciar o comportamento de dispositivos práticos.

O propósito desta Sub-Projeto é o estudo experimental da magnetostricção no estado de vórtices de supercondutores de alta temperatura crítica. A ênfase será dada às amostras texturizadas do sistema YBCO. Também se deseja investigar os efeitos magnetostrictivos em amostras policristalinas de outros HTCS (exemplo: Hg-2223) e de ferro-pnictídeos do tipo 122 (principalmente $KFe_{2-x}T_xAs_2$ ($T = Co, Ni, Cu$)).

O sistema para medidas de magnetostricção, baseado num dilatômetro capacitivo, foi construído com financiamento parcial do Programa PRONEX de 2009 e está adaptado a um criostato que dispõe de um solenóide supercondutor que gera campo magnético máximo de 6 T. O desenvolvimento instrumental exigirá ainda a operação e testes do dilatômetro para as medidas propostas. O dilatômetro deverá permitir medidas em que o campo é aplicado em orientações paralela e perpendicular à direção de deformação.

As amostras texturizadas do sistema YBCO estão em parte disponíveis e, em parte, serão confeccionadas. Neste projeto, a colaboração entre os grupos da UFRGS, FURG e UFPel é essencial. As amostras dos ferro-pnictídeos poderão, em parte, ser obtidas com colaboradores da UNICAMP e do CBPF. Também é fundamental para este estudo a colaboração com equipe do ICMAB, de Barcelona, Espanha. Esta linha de pesquisas envolve uma Tese de Doutorado em realização na UFRGS.

[9] H. Ikuta et al. , Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 2166

[10] T.H. Johansen, Superc. Sci. Technol. 13 (2000) R121

[11] A. Schmidt et al. Physica B 194-196(1994) 1787.

I.d *Síntese e estudo das propriedades elétricas e magnéticas do supercondutor $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$*

A descoberta de um dos recentes membros da família YBaCuO, o supercondutor $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$, ou simplesmente Y358 [12], permitiu o acesso a novos e importantes resultados relativos à fenomenologia dos cupratos supercondutores [13,14,15], porém, existem algumas importantes diferenças entre os seus membros. Enquanto o supercondutor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y123), um dos sistemas supercondutores mais investigados cientificamente, possui dois planos de CuO_2 e uma cadeia de CuO, o supercondutor $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$ possui cinco planos de CuO_2 e três cadeias de CuO em sua estrutura. Esta diferença têm reflexo em importantes características supercondutoras, como a temperatura crítica (T_c), por exemplo.

O supercondutor Y358 pode ser preparado através de diferentes técnicas de crescimento, tais como sinterização convencional, sol-gel, métodos biopoliméricos e mesmo por fusão texturizada, resultando em diferentes materiais desde amostras policristalinas até nanofios. Diferentes compostos supercondutores têm sido derivados a partir do sistema Y358, tais como $Yb_{1.8}Sm_{1.2}Ba_5Cu_8O_{18}$, $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Sm e Nd), $Y_3Ba_5Ca_2Cu_8O_{18}$, $Y_3Ba_5Cu_8O_{y-x}F_x$ e $Y_3Ba_5Cu_{8-x}Zn_xO_{18-\delta}$. Diversos estudos envolvendo membros da família YBaCuO têm sido realizados no intuito de comparar aspectos relevantes de suas propriedades estruturais, magnéticas e elétricas. Por outro lado, existem muitos aspectos importantes, além de propriedades fundamentais, para serem investigados no supercondutor Y358, de modo que muitas questões estão abertas ainda.

Neste projeto pretende-se sintetizar amostras do supercondutor Y358 com a conseqüente investigação de aspectos fundamentais deste sistema, tais como suas propriedades elétricas e magnéticas [16]. Em relação às propriedades magnéticas, pretende-se investigar detalhadamente o comportamento da linha de irreversibilidade, o mecanismo de aprisionamento de vórtices bem como a sua dinâmica, afim de se obter um perfil do comportamento magnético deste supercondutor. Com relação às suas propriedades elétricas pretende-se investigar a transição supercondutora com especial atenção ao comportamento das flutuações supercondutoras nas vizinhanças da transição supercondutora. Outro objetivo é estudar a correlação entre a irreversibilidade magnética e a temperatura de resistência nula como função do campo aplicado, afim de se obter a compreensão de como o campo magnético degrada os acoplamentos de grãos e a condutividade elétrica. Com relação ao supercondutor Y358 os aspectos acima relacionados necessitam uma investigação detalhada, sendo que em alguns casos os resultados encontrados na literatura são totalmente inexistentes.

Esta linha de pesquisa será conduzida por pesquisadores da UFPel, FURG e UFRGS e envolve uma Dissertação de Mestrado na UFPel.

[12] A. Aliabadi et. al. *Physica C* 469 (2009) 2012

[13] P. Udomsamuthirun et. al. *J. Supercond. Nov. Magn.* 23 (2010) 1377

[14] A. Esmaili et. al. *Eur. Phys. J. B* 79 (2011) 443

[15] N. Akduran *J. Low Temp. Phys.* 168 (2012) 323

[16] F. T. Dias et. al. *J. of Physics: Conf. Series* 568 (2014) 022009

I.e *Efeito Meissner paramagnético em amostras monocristalinas e texturizadas do supercondutor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$*

O efeito Meissner se caracteriza pela resposta diamagnética do supercondutor frente à aplicação de um campo magnético. A expulsão do fluxo magnético do interior de um supercondutor pode ser observada em experimentos do tipo FC (*field-cooling*). Porém, em certos casos, a resposta do supercondutor frente à aplicação de um campo magnético em experiências do tipo FC pode ser paramagnética, contrariando o efeito Meissner convencional. A esta resposta chamamos de efeito Meissner paramagnético, ou simplesmente PME. Na literatura o referido efeito, nos primórdios de sua descoberta, foi por vezes denominado de efeito Wohleben [17, 18], sendo que as primeiras observações experimentais do PME foram relatadas no trabalho de P. Svendlindh e colaboradores [19] em amostras policristalinas de supercondutores de alta temperatura crítica.

O efeito apresenta, às vezes, comportamentos qualitativamente distintos, diminuindo sua intensidade à medida que o campo magnético é aumentado até desaparecer e a susceptibilidade tornar-se diamagnética. Em outros casos, o efeito aumenta com campo magnético, ou seja, uma resposta diamagnética de baixos campos evolui para um comportamento paramagnético quando o campo é aumentado.

Um aspecto notável e intrigante do PME é a dependência temporal observada em alguns casos durante a realização de experimentos de relaxação da magnetização FC. Nestes casos as amostras exibem uma intrigante relaxação paramagnética cujo momento tende a aumentar com o tempo. Um dos exemplos deste comportamento está reportado no trabalho de Terentiev et al. [18] para filmes finos de Nb, no qual a relaxação da magnetização FC observada experimentalmente não segue uma lei logarítmica. Em alguns casos observa-se que a relaxação paramagnética apresenta uma forte dependência com a velocidade de resfriamento, temperatura e campo magnético aplicados [20]. A origem e as causas do PME, bem como de sua dependência temporal ainda são desconhecidas, sendo que não há nenhum modelo teórico ou estudo consistente definitivo sobre o assunto, tornando o tema potencialmente atrativo de investigação científica.

Neste projeto pretende-se investigar o efeito Meissner paramagnético em amostras do supercondutor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ preparadas na forma monocristalina e policristalina texturizada, através de medidas de magnetização FC e de relaxação magnética, com o objetivo de estudar as causas do efeito bem como a origem de sua dependência temporal, além da influência de fatores como a intensidade e orientação do campo magnético, temperatura e velocidade de resfriamento. Pretende-se também investigar a influência de fases secundárias e de dopantes químicos, os quais serão adicionados durante o preparo das amostras, no surgimento dos momentos paramagnéticos na magnetização FC, bem como na sua evolução temporal. Com isso espera-se que os resultados obtidos possam fornecer subsídios para uma melhor compreensão deste intrigante efeito, o qual ainda carece de uma explicação consistente acerca de sua origem.

Esta linha de pesquisa envolverá pesquisadores da UFPel e UFRGS e uma dissertação de mestrado na UFPel.

[17] Riedling, S. et al. *Physical Review B* 49, 13283 (1994).

[18] Terentiev, A. et al. *Physical Review B* 60, R761 (1999).

[19] Svendlindh, P. et al. *Physica C* 162/164, 1365 (1989).

[20] Dias, F. T. et al. *Physical Review B* 70, 224519 (2004).

I.f *Energia de condensação de supercondutores do tipo II: determinação e caracterização a partir da magnetização de equilíbrio DC*

Esta linha de pesquisa se fundamenta na realização de um estudo experimental de magnetometria DC em amostras de supercondutores do tipo II policristalinas e monocristalinas onde se dará ênfase aos efeitos provenientes da dopagem química sobre a energia de condensação do estado supercondutor.

O estudo da densidade de energia cinética de condensação, $K_s(T,H)$, dos portadores carga de supercondutores do tipo II tem se mostrado uma ferramenta eficiente empregada na compreensão da dinâmica apresentada por estes durante a transição normal-supercondutor desses sistemas. Em particular, nos de supercondutores do tipo II o comportamento de $K_s(T,H)$ pode ser obtido diretamente das medidas de magnetização DC por meio da aplicação do teorema virial da supercondutividade (SVT) [21-23].

Além da determinação do comportamento de $K_s(T,H)$ esta linha de pesquisa prevê que a energia do potencial do condensado supercondutor seja igualmente determinada a partir dos resultados experimentais de magnetização DC. De acordo com M. Dória, o tratamento da energia livre de Gibbs dos supercondutores do tipo II sobre a luz do teorema virial da supercondutividade possibilita a realização desta ação. Este trabalho se desenvolverá em colaboração com o pesquisador Dr. Mauro Dória da UFRJ e com a equipe de pesquisadores e estudantes da UFPel e UFRGS.

Desta forma pretende-se pesquisar, pioneiramente, a energia do condensado supercondutor obtida através da análise do comportamento da magnetização DC de supercondutores do tipo II onde o emprego de substituições químicas colaborará para a modificação das propriedades supercondutoras destes matérias e conseqüentemente de sua energia de condensação.

A preparação e a caracterização das amostras ocorrerá no Laboratório de Materiais Supercondutores (LMS) da UFPel e as medidas de magnetização DC ocorrerão com a utilização do módulo de magnetização de um PPMS, localizado junto ao LMS e com o magnetômetro de SQUID, localizado junto Laboratório de Supercondutividade e Magnetismo da UFRGS.

Esta linha de pesquisa envolverá pesquisadores da UFPel e UFRGS. Uma dissertação de mestrado na UFPel está associada com o tema.

[21] Dória M M, Salem-Sugui Jr S, de Oliveira I G et al. Physical Review. B 65, 1445090 (2002).

[22] Vieira V N, Mendonça A P A, Dias F T, da Silva D L, Pureur P et al. Journal of Physics: Conference Series 568, 022049 (2014).

[23] Pena A J P, Martinez D. B, Parra Vargas C A et al. B. J. Phys 25, 1250 (2013).

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

LINHAS DE PESQUISA

II. MAGNETISMO

II.a *Configurações complexas de spins na interface de filmes finos bi-camadas*

Usualmente, em sólidos magnéticos de momentos localizados, os spins alinham-se todos paralelamente, situação denominada de ordenamento ferromagnético, ou o alinhamento entre spins vizinhos é antiparalelo e o ordenamento denomina-se de antiferromagnético. Arranjos complexos, no entanto, também podem ocorrer. Genericamente designa-se tais configurações por “texturas de spins”. Recentemente, arranjos em que os spins organizam-se em configurações espiraladas tem sido muito estudadas. Teoricamente, se tem demonstrado que tais estruturas são muito estáveis em razão de uma proteção de natureza topológica às pequenas perturbações [24], tal como ocorre em estruturas espiraladas observadas em outros contextos, como nos casos clássicos de tornados, torvelinhos e galáxias, ou em exemplos quânticos como os vórtices em supercondutores e superfluidos.

No caso do magnetismo, ocorre a formação de vórtices de spin em amostras nanoscópicas [25]. Por vezes, estes vórtices são acompanhados de anti-vórtices. Também interessantes são as quiralidades de spin, que são fundamentais na interpretação do efeito Hall anômalo em sistemas magnéticos desordenados. Recentemente, outro tipo de ordenamento tem motivado intensos esforços de investigação: trata-se dos skyrmions [26], que são excitações tipo sóliton, de geometria circular, em que os spins invertem progressivamente sua orientação à medida que suas posições avançam das bordas para o centro. Cálculos teóricos propõem a existência de skyrmions isolados, bem como líquidos de skyrmions [27]. Estas possibilidades são consideradas em vista da fraca energia de pinning destas excitações, que podem ser deslocadas por ação de uma corrente elétrica [28]. O fraco pinning, e o pequeno tamanho dos skyrmions são considerados características potencialmente interessantes para uso em dispositivos de memórias binárias, que seriam manipuláveis com correntes elétricas de fraca intensidade [28].

O presente sub-projeto visa explorar a possibilidade de estabilização de skyrmions na interface entre (i) bicamadas formadas por um filme fino ferromagnético e um filme de metal não-magnético, porém com forte interação spin-órbita. Neste caso, a interação Dzyaloshinskii-Morya é esperada pela natural quebra da simetria de inversão na fronteira entre os filmes e pela presença de centros spin-órbita nas vizinhanças dos sítios magnéticos. Num tal caso, os skyrmions se formariam espontaneamente, sem necessidade de qualquer perturbação extra [24]. Outra configuração que se pretende explorar corresponde a (ii) bicamadas entre um metal ferromagnético e um metal supercondutor de tipo II. Neste caso, a aplicação de pequenos campos magnéticos na orientação perpendicular ao plano do filme gera vórtices de Abrikosov no lado supercondutor. Espera-se que excitações do tipo skyrmions sejam estabilizadas no lado ferromagnético, em posições coincidentes com o topo dos vórtices. No caso (i), os sistemas que se pretende

confeccionar inicialmente são bicamadas de Fe/Ru e Co/Ru. No caso (ii), os sistemas previstos são Fe/Nb e Co/Nb. Supomos que skyrmions possam ser estabilizados espontaneamente na superfície dos filmes ferromagnéticos. As estruturas bi-camadas ferromagneto/supercondutor também oferecem a oportunidade de estudo do acoplamento e interação entre estes dois tipos de ordenamento, os quais em geral são excludentes.

Medidas da característica “corrente-voltagem” e experiências de magneto-transporte deverão ser realizadas. As medidas I versus V serão úteis para o estudo do pinning dos skyrmions na interface das bicamadas. Por outro lado, o deslocamento de skyrmions deverá produzir dissipação, tal como ocorre com um fluido de vórtices em movimento sob ação de um campo elétrico. Pretendemos também investigar os efeitos de aplicação de um campo magnético perpendicular ao filme nesta dissipação, ou seja, a contribuição dos skyrmions à magneto-resistência.

Uma Tese de Doutorado na UFRGS está associada a este sub-projeto. Pesquisadores da UFPel, FURG e UFSM também participam do sub-projeto

[24] U.K. Rössler, A.N. Bogdanov and C. Pfleiderer, Nature 442 (2006) 797.

[25] R. P. Cowburn et al. Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 1042

[26] T. Skyrme, Nucl. Phys. 31 (1962) 556.

[27] S. Blügel, XXXVI Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada (2013)

[28] A. Fert, Workshop em Homenagem a A. Fert, IF-UFRGS, abril 2013

II.b *Transporte elétrico spin-polarizado em ferromagnetos metálicos*

O objetivo desta linha de pesquisas é o estudo experimental das propriedades de magneto-transporte spin-polarizadas de sistemas ferromagnéticos clássicos. A ênfase será dada em medidas de magneto-resistência e efeito Hall e magneto-impedância em amostras dos sistemas metálicos Fe, Co e Ni com diversas impurezas e compostos intermetálicos do tipo $R\text{Co}_{12}\text{B}_6$ (R = terra-rara). Estes compostos, em particular, são ferrimagnetos no caso em que os átomos de terra-rara são magnéticos [29]. Um aspecto interessante nestes casos é a ocorrência de uma temperatura de compensação em torno de 50 K, na qual as sub-redes magnéticas de Co e do terra-rara se compensam quase exatamente, fazendo com que a magnetização macroscópica se anule [30].

Nos metais de transição ferromagnéticos, a banda de condução é fortemente polarizada em spin. Em particular, as densidades de estado no nível de Fermi são muito distintas para elétrons das sub-bandas majoritária e minoritária. Em razão deste fato, o transporte eletrônico nestes sistemas é descrito por uma associação paralelo de duas correntes cujas condutividades podem ser muito diferentes. Efeitos de mistura de spins ocasionados pela interação spin-órbita e pelo espalhamento elétron-magnon em geral tem que ser considerados na descrição das propriedades de magneto-transporte dos metais ferromagnéticos. Por esta razão, é conveniente a diluição de impurezas que permitem, sobretudo, o controle da interação spin-órbita. A dependência em temperatura da resistividade elétrica das correntes spin-polarizadas foi muito estudada nos metais ferromagnéticos [31]. O efeito do termo de mistura de spins foi detalhadamente descrito. No entanto, as propriedades de magneto-transporte, em particular a magneto-resistência e o efeito Hall, dependentes da orientação de spin não foram estudadas em profundidade. Por exemplo, não existe sequer uma teoria fenomenológica que permita descrever e interpretar os efeitos da polarização de spin nos termos ordinário e anômalo do efeito Hall. Da mesma forma, a teoria fenomenológica existente para descrever a anisotropia espontânea da resistividade é aplicável somente no limite de muito baixas temperaturas. O objetivo inicial do sub-projeto é a caracterização detalhada da dependência com a temperatura e o campo magnético aplicado de ligas diluídas, na forma de filmes

finos dos sistemas diluídos $\underline{\text{FeCo}}$, $\underline{\text{FeCr}}$, $\underline{\text{CoFe}}$, $\underline{\text{CoNi}}$, $\underline{\text{CoCu}}$, $\underline{\text{NiMn}}$, $\underline{\text{NiFe}}$ e $\underline{\text{NiCu}}$, com diversas concentrações de impurezas.

Por outro lado, no caso dos boretos intermetálico pretende-se estudar, além dos efeitos do transporte dependente de spin, a permeabilidade magnética com medidas de impedânciometria. Tal estudo se insere na temática de propriedades dinâmicas da magnetização e visa especificamente o entendimento do efeito Hopkinson observado nas vizinhanças imediatas da temperatura de Curie dos sistemas $\text{RCo}_{12}\text{B}_6$ ($\text{R} = \text{Y, Gd e Ho}$).

Uma Tese de Doutorado em andamento na UFRGS está associada a este sub-projeto, que envolve colaboração entre as equipes da UFRGS e da UFSM. No desenvolvimento deste tema tem participação importante pesquisadores do Institut Louis Néel, de Grenoble, França. Parte das experiências é realizada neste centro de pesquisas.

[29] L.V.B. Diop, "Structure et propriétés physiques de composés magnétiques de type $\text{RCo}_{12}\text{B}_6$ ($\text{R} = \text{Hf, Ta}$) et leur dépendence en fonction de la pression physique et chimique", Thesis, Université de Grenoble (2014) France.

[30] L.V.B. Diop, O. Isnard, N.R. Lee-Hone, D.H. Ryan, J.M. Cadogan, J. Phys: Condens. Matter, 25 (2013) 316001.

[31] I.A. Campbell and A. Fert, in "Ferromagnetic Materials", Vol 3, ed. E.P. Wohlfarth, (North Holland Co., 1982) p. 747

II.c *Propriedades magnéticas de óxidos de baixa dimensionalidade*

Este sub-projeto envolve uma colaboração teórico-experimental, envolvendo os grupos teórico e experimental da UFRGS com o pesquisador Olivier Isnard, do Institute Néel/CNRS de Grenoble, França. Têm sido estudados compostos do tipo $(\text{A,A}')\text{B}_2\text{O}_6$, onde $\text{A,A}' = \text{Fe, Co, Ni, Mn}$ e $\text{B} = \text{Ta, Sb, Nb}$. Um dos aspectos mais relevantes é a presença de diversas fases magnéticas, com coexistência de fases em algumas regiões de composição química, bem como a predominância de efeitos de baixa dimensionalidade.

Além da síntese de amostras, medidas de magnetização, susceptibilidade magnética, calor específico e difração de neutrons em diversas séries dessa família de compostos, os resultados tem sido analisados com base em modelos para sistemas de spins localizados (Heisenberg anisotrópico ou Ising), utilizando séries de altas temperaturas (compostos planares) ou soluções exatas para cadeia de Ising na presença de campo efetivo devido às cadeias vizinhas (compostos quase-unidimensionais). Isso permite obter parâmetros de interações de troca a partir do ajuste de dados experimentais de susceptibilidade.

Desde 2003, esta linha já envolveu cinco doutorados, com estágios em Grenoble, sendo quatro já concluídos e um em andamento. As publicações decorrentes mais recentes estão listadas nas referências [32-34].

[32] S. R. de Oliveira Neto, E. J. Kinast, M. A. Gusmão, C. A. dos Santos, O. Isnard and J. B. M. da Cunha, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324 (2012) 3245 .

[33] P. W. C. Sarvezuk, M. A. Gusmão, J. B. M. da Cunha, and O. Isnard, Phys Rev. B 86 (2012) 054435.

[34] E. G. Santos, J. B. M. da Cunha, O. Isnard, C. Lacroix, and M. A. Gusmão, J. Phys.: Condens. Matter 24, 256005 (2012).

II.d *Desordem, frustração e correlações quânticas em sistemas magnéticos*

Este subprojeto visa estudar teoricamente sistemas magnéticos desordenados em presença de clusters e fase vidro de spin. As análises serão realizadas com spins clássicos e quânticos, buscando entender a relação entre desordem, frustração e flutuação quântica. Em particular, efeitos de frustração geométrica em sistemas com desordem fraca serão investigados, com ênfase na fase vidro de spin que é encontrada em vários compostos geometricamente frustrados. As investigações serão feitas através de modelos magnéticos usando clusters de diferentes tamanhos e com interações de troca desordenadas que devem ser tratadas analiticamente. Os clusters também devem admitir interações de curto alcance, que serão calculadas usando técnicas de diagonalização exata. No caso quântico, primeiro será estudado as correlações entre as partes constituintes de sistemas físicos sem desordem, em que se considera o problema fundamental da quantificação e da distribuição de correlações em sistemas multipartidos. A dinâmica dessas correlações e o papel delas na determinação das propriedades físicas de sistemas com transições de fase quântica serão investigados. Posteriormente, será investigado o efeito da desordem nas interações de um sistema com correlações quânticas.

Este subprojeto é parte do tema de uma Tese de Doutorado e de uma Dissertação de Mestrado em andamento na UFSM. Investigações experimentais nesta linha de pesquisas são atividades tradicionais da equipe da UFRGS.

II.e *Exchange-bias em nanoestruturas magnéticas*

O fenômeno de "exchange-bias" é caracterizado por um deslocamento na curva de histerese magnética e por um aumento na sua largura. Ele é observado quando os momentos magnéticos de um ferromagneto estão ao menos parcialmente acoplados aos momentos magnéticos de um segundo material, tal como um antiferromagneto, um ferrimagneto, ou um vidro de spin. Embora o efeito seja extensivamente usado em sensores para deslocar a resposta das curvas de magnetorresistência gigante ou túnel [35], ou em memórias magnéticas de dimensões reduzidas para estabilizar a magnetização [36], o "exchange-bias" ainda é um objeto de estudo devido à complexidade do acoplamento na, ou perto da, interface entre os dois materiais [36].

O que se pretende nesse estudo é aplicar diferentes técnicas experimentais para abordar problemas que persistem no entendimento do fenômeno, em particular: a influencia da qualidade da interface nas propriedades finais da nanoestrutura; como e porque é estabelecida a não-colinearidade entre os eixos de anisotropias uniaxial e unidirecional. Serão produzidas e investigadas nanoestruturas magnéticas produzidas pela deposição consecutiva de ferromagnetos e antiferromagnetos, é possível ajustar o grau de assimetria presente na estrutura ferromagneto-antiferromagneto.

Este sub-projeto é parte do tema de uma Tese de Doutorado e duas Dissertações de Mestrado na UFSM e envolve colaboração com pesquisadores da UFRGS.

[35] J. Noguees, I.K. Schuller, J. Magn. Magn. Mater. 192 , 203 (1999).

[36] J. Nogués et al, Phys. Rep. 422, 65, (2005).

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

LINHAS DE PESQUISA

III. OUTROS TEMAS SOBRE CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM SÓLIDOS

III.a *Desordem e correlações em sistemas fermiônicos e bosônicos*

Um dos aspectos mais desafiadores no estudo de modelos relacionados com a física dos chamados sistemas eletrônicos fortemente correlacionados refere-se à inclusão de efeitos de desordem (fisicamente causados, por exemplo, pela dopagem) sobre as propriedades eletrônicas e magnéticas. Esses efeitos são relevantes no contexto da transição metal-isolante, pois uma transição desse tipo pode ser devida à interação coulombiana (transição de Mott-Hubbard) ou por efeito de desordem (transição de Anderson), sendo muito interessante estudar a presença simultânea desses dois mecanismos.

Por outro lado, condensados de Bose-Einstein contituídos por átomos ultra-frios confinados em redes ópticas têm, atualmente, realização experimental amplamente difundida, proporcionando uma nova classe de sistemas quânticos que podem ser analisados em laboratório. Tais sistemas oferecem a possibilidade de observação da localização por efeito de desordem, pois parâmetros como as profundidades dos poços de potencial a que os átomos estão sujeitos podem ser controlados experimentalmente.

Nossa abordagem teórica para esses sistemas utiliza tanto a diagonalização numérica exata em redes de tamanho finito, quanto métodos não perturbativos baseados no cálculo de funções de Green, como a Teoria de Campo Médio Dinâmico (DMFT). Outros estudos, não necessariamente envolvendo desordem, estão sendo também desenvolvidos para sistemas de átomos frios em poucos poços de potencial, incluindo, p. ex., bósons de spin não nulo.

Esta linha de trabalho teve recentemente um doutorado e dois mestrados concluídos, e tem dois doutorados em andamento na UFRGS. As publicações mais recentes associadas a esta linha estão listadas nas referências [37-40].

[37] J. C. C. Cestari, A. Foerster, and M. A. Gusmão, Phys. Rev. A 82 (2010) 063634 .

[38] J. C. C. Cestari, A. Foerster, M. A. Gusmão, and M. Continentino, Phys. Rev. A84 (2011) 055011.

[39] R. D. B. Carvalho and M. A. Gusmão, Phys. Rev. B 87, 085122 (2013).

[40] R. D. B. Carvalho and M. A. Gusmão, Phys. Rev. B 90, 085108 (2014).

III.b *Férmions pesados e “ordem oculta” em compostos de urânio*

Esta linha de pesquisa foi iniciada recentemente, envolvendo um projeto de pós-doutorado de pesquisador beneficiário de uma bolsa do programa de Atração de Jovens Talentos da CAPES. O sub-projeto, de enfoque teórico, envolve o grupo da UFRGS e contempla o estudo das propriedades eletrônicas, termodinâmicas e de transporte de modelos para compostos de urânio que se caracterizam como sistemas de férmions pesados, como UGe_2 , $URhGe$ e $UCoGe$, cujo maior atrativo é apresentarem competição entre ferromagnetismo e supercondutividade. Em um segundo momento, será dada atenção especial à chamada "fase escondida" do composto URu_2Si_2 , que também interessa ao grupo teórico da UFSM. A terceira etapa visa ao estudo "ab initio" dos mesmos compostos, buscando uma maior adequação dos modelos no sentido da compreensão de resultados experimentais.

A chamada ordem oculta no URu_2Si_2 é um problema em aberto desde sua descoberta em 1985. Nesse sistema existe uma transição para uma fase de natureza desconhecida que não pode ser classificada como uma fase magnética usual. Essa transição é caracterizada por um pico no calor específico. Inicialmente, acreditava-se que essa transição seria uma transição de uma fase paramagnética para uma fase *spin-density wave*. No entanto, hoje sabe-se que essa transição não está associada a uma magnetização efetiva. Embora essa transição tem sido muito investigada desde a sua descoberta a 30 anos, a natureza do parâmetro de ordem permanece desconhecida. A fase associada a essa transição é conhecida por ordem oculta do URu_2Si_2 . Mesmo sendo desconhecida, é consenso que a ordem oculta resulta de comportamentos coletivos complexos em sistemas de elétrons f , com banda estreita e fortemente interagente. Nesse sentido, a questão central desse problema é que seu entendimento pode revelar mecanismos totalmente diferentes do magnetismo convencional, semelhante ao que tem acontecido com os supercondutores de alta temperatura quando comparados aos supercondutores convencionais tipo BCS. Neste projeto, utilizaremos a abordagem introduzida na referência (Phys. Rev. B 85, 165116 (2012)) para investigar a ordem oculta no URu_2Si_2 . A originalidade nessa abordagem proposta é a identificação de um parâmetro de ordem para caracterizar o estado associado a ordem oculta. Para estudarmos o calor específico, iremos utilizar o formalismo introduzido por R. Kishore e S. K. Joshi (J. Phys. C: Solid St. Phys. 4, 2475 (1971)). Resultados experimentais recentes envolvendo medidas de torque magnético mostram que abaixo da temperatura que marca a transição para a ordem oculta, a susceptibilidade magnética torna-se anisotrópica. Portanto, a susceptibilidade magnética também será objeto de estudo no presente projeto.

O tema da ordem oculta no URu_2Si_2 , em particular, além de envolver um pós-doutorando na UFRGS, também motiva uma Tese de Doutorado e uma Dissertação de Mestrado na UFSM.

III.c *Efeitos quânticos nas propriedades de magneto-transporte de grafite HOPG*

O sub-projeto visa o estudo de efeitos quânticos nas propriedades de magneto-transporte do grafite HOPG implantado com dopantes do tipo-n e do tipo-p. Pretende-se estudar as oscilações de Schubnikov-de Haas na magneto-resistência e no efeito Hall e assim obter elementos que permitam entender o comportamento eletrônico deste sistema fortemente anisotrópico. Espera-se que os resultados auxiliem a dirimir a presente controvérsia sobre a existência ou não de um gap estreito no nível de Fermi no grafite pirolítico [41]. Eventualmente, poder-se-á obter informações sobre a existência de estados tipo férmions de Dirac [42] e sua relevância para as propriedades de magneto-transporte. Pretende-se, também, investigar o quão importantes são os efeitos de correlações eletrônicas nestes sistemas. As amostras investigadas são dopadas com impurezas de tipo-n e tipo-p

via processos de implantação iônica, usando o implantador sediado no Instituto de Física-UFRGS. As impurezas em estudo são: Al, Ga e Na (tipo-n) e P, As e S (tipo-p). Amostras com diferentes concentrações de dopantes são preparadas. Eventualmente, medidas de magneto-transporte serão efetuadas em campos magnéticos pulsados até 50 T, em colaboração com pesquisador do Serviços de Altos Campos Magnéticos de Drenden (Alemanha).

Pretende-se também produzir e estudar amostras micrométricas de HOPG, puro e implantado (com Na, Al e P) e nelas estudar efeitos quânticos de transporte balístico. Os contatos elétricos em tais amostras deverão ser preparados por litografia por feixe de elétrons no Laboratório de Nanociência e Nanofabricação do CBPF, Rio de Janeiro. As medidas de magneto-resistência e efeito Hall serão realizadas no IF-UFRGS. Será também feito um estudo teórico dos efeitos de campo magnético no transporte balístico e serão desenvolvidos esquemas interpretativos dos resultados a serem obtidos com as experiências planejadas nas amostras conformadas em escala micro e sub-micrométrica.

Este projeto envolve uma colaboração experimental-teórica no grupo da UFRGS. Uma Tese de Doutorado está em desenvolvimento na UFRGS em associação com esta linha de pesquisas. A colaboração com o Prof. Yacov Kopelevich e sua equipe no Instituto de Física da UNICAMP é fundamental para o avanço deste sub-projeto

[41] Y. Kopelevich and P. Esquinazi, *Adv. Mater.* 19 (2007) 4559.

[42] I.A. Lukyanchuk and Y. Kopelevich, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 256801.

III.d *A Transição Metal-Isolante do VO₂.*

O dióxido de vanádio (VO₂) apresenta uma transição cristalográfica em temperaturas próximas à ambiente, transição esta que é acompanhada de uma drástica redução na resistividade elétrica e na transmissão da radiação eletromagnética na faixa do infravermelho. Embora a transição no VO₂ seja conhecida a mais de 40 anos, os mecanismos físicos que a geram foram motivo de uma longa controvérsia. Ao contrário do V₂O₃, reconhecido como um isolante de Mott típico há bastante tempo, o papel das correlações eletrônicas no VO₂ foi identificado de maneira clara apenas mais recentemente [43, 44]. Outros aspectos fundamentais da transição, como o papel desempenhado por fónons na estabilização da fase metálica estão atualmente ainda sendo esclarecidos [45, 46].

Se a física da transição metal-isolante no VO₂ não está ainda completamente estabelecida, é inegável a sua potencialidade para aplicações. A produção de transistores de Mott, metamateriais ópticos, filtros eletromagnéticos, janelas inteligentes e atuadores mecânicos são apenas alguns dos exemplos onde o material têm se mostrado promissor. Um aspecto ainda pouco explorado, a ser abordado no presente subprojeto, é a utilização do VO₂ em heteroestruturas com materiais magnéticos. Como o VO₂ apresenta variações de até 1 % em certas direções cristalográficas durante a transição, ele pode atuar sobre a magnetização de materiais magnetostrictivos a ele acoplados. Arranjos podem ser concebidos e produzidos, onde a transição do VO₂ seja induzida por aquecimento joule (current drive transition) e, através da expansão ou contração dimensional, a magnetização seja reorientada, gerando um material com propriedades multifuncionais.

[43] *Science*, 318 (2007) 1750.

[44] *Nature*, 6544, October 2014.

[45] *Nature*, 4854, May 2014.

[46] *Nature*, 6259, September 2014.

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

IV. INSTRUMENTAÇÃO

IV.a *Sistema de Medidas de Propriedades Físicas*

O Laboratório de Supercondutividade e Magnetismo (LSM) do IF-UFRGS estará recebendo em meados de 2015 um sistema “cryogen free” dotado de um magneto supercondutor de 9 teslas. Este sistema, adquirido com recursos do CT-INFRA 2009, é denominado C-Mag-Vari-9 e é produzido pela empresa Cryomagnetics, Inc (USA). Esta plataforma básica permitirá a remontagem do sistema de medidas de propriedades físicas (SMPF), que é complementar ao sistema PPMS, fabricada pela empresa Quantum Design, que está instalado e operacional no LSM. Atualmente, o SMPF realiza experiências de magneto-transporte com precisão superior a do PPMS, embora sem a automatização do sistema comercial e com campo magnético de magnitude inferior (6 T, em lugar de 9 T) e com base num criostato de banho de hélio convencional. A instalação das montagens experimentais na plataforma C-Mag-Vari-9 permitirá a realização de medidas sem o uso de hélio líquido. Este insumo tem se tornado muito caro, inviabilizando a operação contínua dos criostatos convencionais e comprometendo a operacionalidade do LSM. Pretende-se desenvolver um programa de automatização das experiências de magneto-transporte em ambiente visual-basic para tornar o SMPF operável remotamente.

Pretende-se também implementar, no sistema SMPF, uma técnica de medida de magnetização pelo método de Faraday, com base em célula capacitiva já operacional em medidas de magnetostricção, as quais são realizadas em criostato convencional. No curso do projeto pretende-se ainda implementar uma experiência de transporte térmico no sistema C-Mag-Vari-9.

IV.b *Sistema de Medidas de Transporte Elétrico em Baixas Temperaturas*

O apoio do projeto PRONEX-edital 2009 foi decisivo para o início da montagem do Laboratório de Supercondutividade e Magnetismo da FURG, em Rio Grande. Este laboratório conta, no momento, com uma estrutura mínima para preparação de amostras e de um pequeno criostato que permite medidas na faixa de temperaturas do nitrogênio líquido. Também disponível na FURG está uma excelente estrutura institucional para caracterização de amostras no CEME-Sul.

A presente Proposta visa também dar continuidade à instalação do LSM-FURG, especialmente com a operacionalização de uma montagem para medidas de condutividade elétrica na presença de baixos campos magnéticos longitudinais (até 500 Oe), na faixa de temperaturas entre 77 K e 300 K. Os primeiros passos neste sentido já foram dados, com a transferência de um criostato da UFRGS para o LSM-FURG. No presente projeto consta a aquisição de equipamentos para complementar a montagem da eletrônica de medida.

IV.c *Sistema de Preparação de Filmes Finos Magnéticos Nanoestruturados por Eletrodeposição*

O Laboratório de Materiais Magnéticos e Nanoestruturados da UNIPAMPA tem implementado a técnica de produção de filmes finos nanoestruturados por eletrodeposição. Em particular, filmes ultrafinos produzidos por eletrodeposição têm mostrado propriedades magnéticas muito interessantes e viabilizado a técnica para a produção de novos materiais magnéticos. As propriedades magnéticas dos filmes ultrafinos obtidas são iguais e em alguns casos melhores do que os obtidos por técnicas de deposição em alto vácuo. O grupo da UNIPAMPA dedica-se ao aperfeiçoamento contínuo desta tecnologia e a aquisição de um amplificador lock-in, que será usado em sistema de medidas magnéticas é contemplada no presente Projeto.

ENCONTROS DE TRABALHO DO NÚCLEO PRONEX

Um aspecto considerado de fundamental importância pelos proponentes do presente Projeto, e que se relaciona às metas a serem atingidas, ao progresso das atividades e à avaliação dos resultados obtidos, é a realização de Encontros de Trabalho periódicos congregando todas as equipes componentes do Núcleo PRONEX. Esta prática, que se pretende repetir e aperfeiçoar, foi muito bem sucedida durante a vigência dos Projeto PRONEX de 2004 e 2009. Nestas reuniões é feito o relato detalhado dos progressos obtidos pelas várias equipes componentes do Núcleo e se apresenta uma prestação de contas (pelo coordenador e pelas equipes participantes) dos recursos investidos.

Além disso, os Encontros de Trabalho representam uma oportunidade para apresentação e discussão dos resultados científicos obtidos e em andamento no âmbito do Núcleo. Assim, os estudantes de Pós-Graduação também são convidados a participar dos Encontros, relatando o andamento de suas pesquisas. Isto favorece a interação e colaboração entre os componentes do Núcleo e, em particular, permite que os estudantes aumentem sua cultura científica e incorporem críticas e sugestões ao seu trabalho de Pós-Graduação.

Pretendemos realizar quatro destes Encontros de Trabalho, caso a presente Proposta seja contemplada. O primeiro deles será realizado na UFRGS, em Porto Alegre, durante o primeiro ano de vigência do Projeto. O segundo Encontro será realizado na UFPel, em Pelotas, durante o segundo ano do Projeto. No curso do terceiro ano do Projeto, o terceiro Encontro será realizado na FURG, em Rio Grande. Ao longo do quarto ano, um encontro será realizado na UFSM. Uma última reunião entre os coordenadores de grupo e pesquisadores principais será realizada ao final da vigência do Projeto, para avaliação dos resultados obtidos e encaminhamento do Relatório Final. A experiência anterior nos mostrou que a interiorização dos Encontros do Núcleo leva a resultados extremamente positivos, motivando a equipe hospedeira e galvanizando os estudantes que tem oportunidade para apresentar seus resultados diante de especialistas e podem fazer contato com seus colegas das várias Instituições copartícipes.

O custo destes Encontros, que envolvem um ou dois pernoites por participante e deslocamentos terrestres, é muito pequeno quando comparado ao montante total financiado pelo PRONEX. Ademais, recursos de outras fontes, como taxas de bancadas e auxílios das Universidades, tornam ainda menor seu impacto no orçamento total do Projeto PRONEX.

Projeto PRONEX – Edital 12/2014

*CORRELAÇÕES ELETRÔNICAS EM MATERIAIS AVANÇADOS:
SUPERCONDUTIVIDADE E MAGNETISMO*

RESUMO DO ORÇAMENTO (por Instituição)

UFRGS:	Material Permanente	33.400,00
	Consumo	30.000,00
	Serviços PJ	30.000,00
	Diárias	3.400,00
	Passagens	4.700,00
	Total	<u>101.500,00</u>
UFSM:	Material Permanente	9.000,00
	Consumo	12.000,00
	Serviços PJ	10.000,00
	Diárias	7.200,00
	Passagens	14.550,00
	Bolsas IC (02 / 36 meses)	28.800,00
	Total	<u>81.550,00</u>
UFPeI:	Consumo	40.000,00
	Serviços PJ	38.000,00
	Diárias	2.160,00
	Passagens	3.020,00
	Total	<u>83.180,00</u>
FURG:	Material Permanente	22.140,00
	Consumo	22.100,00
	Serviços PJ	18.000,00
	Diárias	7.200,00
	Passagens	14.550,00
	Total	<u>83.990,00</u>
UNIPAMPA:	Material Permanente	31.520,00
	Consumo	14.000,00
	Diárias	640,00
	Passagens	680,00
	Total	<u>46.840,00</u>
	TOTAL GERAL	397.060,00