

Tese de Mestrado

**“Sistema eletrônico de excitação e detecção para
determinação da corrente crítica por transporte em
Supercondutores”**

Eduardo Shigueo Yugue

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Rio de Janeiro, 8 de janeiro de 2002

Tese de Mestrado

**“Sistema eletrônico de excitação e detecção para
determinação da corrente crítica por transporte em
Supercondutores”**

Eduardo Shigueo Yugue

Tese submetida à Coordenação de Formação Científica como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Instrumentação Científica

Orientador: Elisa M. Baggio-Saitovitch

Coorientador: Jorge Luis Gonzalez

Dedicatória

“À família e aos amigos”

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Professora Elisa Baggio-Saitovitch, por receber-me em seu grupo de trabalho, pelo incentivo e por ter contribuído para a elaboração desta tese dando toda a infraestrutura necessária para o seu desenvolvimento.

Ao meu amigo e coorientador Jorge Luis agradeço pela dedicação, pelo esforço e pelas inúmeras contribuições para a elaboração desta tese. Sem mencionar sua companhia em todas as horas do café nos intervalos do trabalho.

Agradeço ao Professor Armando Takeuchi pela sua ajuda nas correções finais apesar da distância.

Agradeço aos amigos desse curso, Alexandre Mello, Israel Esquef e Salvador Belmonte, pelo companheirismo e amizade nos bons e maus momentos desta tese.

Agradeço ao CNPq, ao CBPF e ao CFC, por acreditarem e investirem no desenvolvimento desta tese.

Aos meus pais, Shizuo Yugue e Chiyoko Yugue, aos meus irmãos, Cláudio, Elisa e Lia, pelo carinho e dedicação dispensada à minha educação e formação.

À minha esposa, Adryana, agradeço por sua compreensão, pelo seu apoio, pelo amor, pelo carinho e por todos os momentos felizes que estamos passando.

À Vani, minha cachorra, agradeço por sua alegria e fidelidade.

Agradeço a todos os companheiros de laboratórios que de alguma forma me ajudaram.

Termino aqui agradecendo a todos os meus amigos e as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a finalização desta tese, a todos muito obrigado.

Resumo

Supercondutores de temperatura crítica alta (SATC) podem ser uma fonte alternativa de geração e produção de energia elétrica para os próximos anos. Atualmente, muitos esforços são feitos para desenvolver novas tecnologias usando estes materiais. Do ponto de vista tecnológico o parâmetro físico mais importante nos SATC é a corrente crítica. Levando-se em conta este fato mostramos aqui um sistema experimental de determinação e caracterização rápida da corrente crítica nos SATC.

Para suplantiar as dificuldades envolvidas na determinação experimental da corrente crítica (I_C), como a sua dependência com a temperatura, foram desenvolvidos e construídos diferentes circuitos eletrônicos, analógicos e digitais, objetivando a geração e a captação de pequenos sinais elétricos. A novidade a se destacar neste trabalho é a forma em que a amostra é excitada. Foi desenvolvido um circuito analógico, que é capaz de excitar a amostra com uma taxa de subida exponencial de corrente que é obtida através da descarga de um capacitor eletrolítico. O tempo de descarga (assim como sua velocidade) foi controlado através de uma carga contida no capacitor, permitindo evitar o aquecimento nos contatos elétricos da amostra. O sistema experimental foi testado em duas amostras, medindo-se sua I_C assim como a sua dependência com a temperatura. Foi constatado que o valor da corrente crítica depende da taxa de subida da corrente. Este fato é relativamente novo e abre novas questões com relação à caracterização deste parâmetro. As medidas foram comparadas com outras feitas pelo método tradicional em nosso laboratório. O nosso sistema foi de baixo custo e reduziu o tempo envolvido em experimentos deste tipo.

Abstract

High temperature superconductors (HTSC) will be an important alternative to production and distribution of energy in the next years. Nowadays, huge efforts are being made to develop new technological devices using these HTSC materials. From technological point of view the most important parameter is the critical current. Thinking about that, we developed an experimental method to characterize the I_C of HTSC samples.

To avoid the difficulties involved in the experimental determination of I_C (and its temperature dependence) were developed and build analogical and digital electronic circuits in order to supply and detect small electric signals. The key point in our work is the form in which the current excitation is sent to the sample. It was developed an analogical circuit that excites the sample in exponential form. The exponential current sweep rate is obtained using the discharge of a simple electrolytic capacitor, and the discharge time can be controlled through the capacitor value in order to avoid the heat dissipation in the electric contacts. The experimental setup was tested on two HTSC samples, measuring their I_C and temperature dependences. It was also verified the critical current depends on the current sweep rate. This fact is new and it brings new questions concerns the characterization of this parameter. The measurements are compared with others made in our laboratory. Our experimental system is a low-cost one and it allows to reduce the time involved in the experiment.

Sumário

| | |
|--|----------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract | iii |
| Sumário | iv |
| Lista de Figuras | vii |
| Lista de tabelas | viii |
| | |
| 1. Introdução | 1 |
| | |
| 2. Supercondutividade | |
| 2.1 Descoberta da Supercondutividade..... | 4 |
| 2.2 Estado da arte..... | 6 |
| 2.3 Supercondutores de Temperatura Crítica Alta..... | 8 |
| 2.4 Corrente Crítica | 9 |
| 2.5 Tunelamento (Efeito Josephson)..... | 11 |
| 2.6 Corrente crítica em materiais cerâmicos..... | 12 |
| 2.7 Aplicações Tecnológicas dos Supercondutores..... | 15 |
| | |
| 3. Desenvolvimento do Sistema | |
| 3.1 Introdução..... | 18 |
| 3.2 Porta Amostra | 20 |
| 3.3 Controle de Temperatura..... | 22 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4 Contatos da Amostra | 23 |
| 3.5 Fonte de Excitação | 24 |
| 3.5.1 Estado aberto sem corrente | 27 |
| 3.5.2 Estado fechado com excitação exponencial | 27 |
| 3.6 Circuito Operacional Detector Diferencial | 29 |
| 3.6.1 Cálculo do ganho do primeiro estágio | 30 |
| 3.6.2 Cálculo da rejeição no modo comum (CMR) | 31 |
| 3.6.3 Segundo estágio amplificador inversor | 33 |
| 3.7 Circuito Comparador de Nível | 34 |
| 3.8 Circuito Lógico de Disparo para o Sincronismo | 37 |
| 3.8.1 Circuito Monoestável | 38 |
| 3.8.2 Circuito de proteção contra corrente alta | 39 |
| 3.8.3 Circuito sinalizador de aquisição | 40 |
| | |
| 4. Temporização dos circuitos | |
| 4.1 Introdução | 41 |
| 4.2 Tempo total de propagação | 42 |
| 4.3 Sinais da fonte de excitação | 45 |
| 4.4 Resposta no tempo do módulo amplificador diferencial | 47 |
| 4.5 Sinal de sincronismo | 48 |
| | |
| 5. Resultados experimentais | |
| 5.1 Amostras | 50 |
| 5.2 Obtenção experimental das amostras | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.1 Amostra de Tálho..... | 52 |
| 5.2.2 Amostra de YbaCuO..... | 52 |
| 5.3 Corrente crítica na amostra YBaCuO | 53 |
| 5.4 Análise dos resultados experimentais..... | 56 |
| 5.5 Influência do critério nos resultados experimentais | 57 |
| 5.6 Comparação de dados com o sistema DC de excitação..... | 59 |
| 5.7 Dependência de I_C com a velocidade de excitação | 60 |
| 5.8 Corrente crítica na amostra de Tálho | 63 |
| 6. Conclusões | 65 |
| Anexo 1 | 66 |
| Bibliografia..... | 67 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. 1 Cabo SC | 2 |
| Figura 2. 1 Exclusão do campo magnético também chamado de “Efeito Meissner” | 5 |
| Figura 2. 2 Evolução da temperatura crítica ao longo dos anos | 7 |
| Figura 2. 3 Diagrama de fases H-T de um supercondutor do tipo II | 8 |
| Figura 2. 4 Fronteira de grão inclinada com deslocamentos (L) onde D é a distância entre eles..... | 11 |
| Figura 2. 5 Comparação entre a curva de resistividade do SC a base de Bismuto e do metal Cobre em função da temperatura com diversos campos aplicados com seus valores indicados em tesla | 15 |
| Figura 2. 6 Projeção de crescimento para a industria de dispositivos supercondutores..... | |
| Curva de resistência do Tálho com transição em 120,29 K | 17 |
| Figura 3. 1 Sistema experimental para determinação da corrente crítica em SC | 19 |
| Figura 3. 2 Porta amostra com uma amostra de YbaCuO de 16mm de comprimento | 20 |
| Figura 3. 3 Garrafão térmico de Nitrogênio com a haste inserida..... | 21 |
| Figura 3. 4 Amostra de Tálho de 2,95 mm de comprimento com contatos de tinta prata com contatos de tinta prata..... | 23 |
| Figura 3. 5 Fonte de excitação da amostra com os tempos | 26 |
| Figura 3. 6 Gráfico da excitação da amostra em função do tempo com dependência de V_{DD} | 28 |
| Figura 3. 7 Circuito Diferencial com ganho de 1.000.000 | 30 |
| Figura 3. 8 Circuito comparador de nível..... | 35 |
| Figura 3. 9 Gráfico do sinal do amostra amplificada, da referência para o <i>trigger</i> e da fonte de excitação..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 3. 10 Configuração do monoestável usando o 555 | 38 |
| Figura 3. 11 Circuito de proteção contra corrente alta. | 39 |
| Figura 3. 12 Circuito de <i>trigger</i> para o multímetro 2001. | 40 |
| Figura 4. 1 Circuito eletrônico dividido em módulos..... | 41 |
| Figura 4. 2 Tempo total de 87,824 ms de duração | 42 |
| Figura 4. 3 Gráfico da descarga do capacitor em relação a fonte de excitação | 44 |
| Figura 4. 4 Gráfico da resposta no tempo do amplificador diferencial | 46 |
| Figura 4. 5 Espectro em frequência do circuito diferencial..... | 47 |
| Figura 4. 6 Tempo de atraso entre a detecção e o acionamento do trigger..... | 49 |
| Figura 5. 1 Curva de resistência do YBaCuO com transição em 88,61 K. | 51 |
| Figura 5. 2 Curva de resistência do Tálcio com transição em 120,29 K. | 51 |
| Figura 5. 3 Gráfico da corrente crítica do YBaCuO em função da temperatura | 53 |
| Figura 5. 4 Gráfico da corrente crítica do YBaCuO em função da temperatura com desvio padrão..... | 56 |
| Figura 5. 5 Histograma da corrente no YBaCuO na temperatura de 84K e 88,6K. | 56 |
| Figura 5. 6 Distribuição de corrente crítica com 24 amostras a 1 μ V realizado no NIST.... | 57 |
| Figura 5. 7 Dados medidos com o sistema DC usando dois níveis de critério de detecção. | 59 |
| Figura 5. 8 Gráfico da tensão para diferentes capacitores. | 61 |
| Gráfico da corrente crítica do SC a base de Tálcio | 63 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 5. 1 Valores usados para determinação de I_C | 58 |
|---|----|

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nesta tese projetamos um sistema de medida de corrente crítica para caracterizar supercondutores (SC) de alta temperatura crítica (T_C). Desenvolvemos circuitos eletrônicos de detecção e geração de corrente ajustável, possibilitando medidas com alta densidade de corrente e detecção de pequenos sinais.

Um SC pode ser um elemento químico, uma liga intermetálica ou um composto (por exemplo, tipo cerâmico), apresentando duas propriedades básicas: 1) de conduzir eletricidade sem resistência; 2) de blindar um campo magnético externo chamado de efeito Meissner. Estas propriedades se manifestam abaixo de uma determinada temperatura crítica (T_C).

A propriedade mais importante para aplicações tecnológicas é a capacidade do SC suportar passagem de alta corrente elétrica sem haver dissipação. O valor máximo dessa corrente é chamado de corrente crítica (I_C), acima desta intensidade começa a ter dissipação no SC. Há duas formas de se caracterizar I_C por magnetização ou por transporte de corrente elétrica, desenvolvemos um método de determinação de I_C por transporte de corrente, por ser mais importante no estudo das amostras policristalinas usadas na produção de dispositivos. Elas são as mais utilizadas porque é extremamente difícil produzir dispositivos SC de monocristais com grandes dimensões. Todos os dispositivos usados na geração e transmissão de energia são SC de materiais policristalinos, onde o mais importante é a corrente de transporte e a temperatura crítica. Por exemplo, uma rede subterrânea com 3 cabos SC de 120 metros de extensão fabricados

pela Pirelli, foram instalados na subestação de potência de Edison Frisbie em Detroit nos E.U.A. em 2002. Foram produzidos cabos SCs a partir de vários fios SCs como mostra a Figura 1.1 Cada cabo é capaz de conduzir 140 vezes mais corrente do que um cabo equivalente de cobre com o mesmo diâmetro.

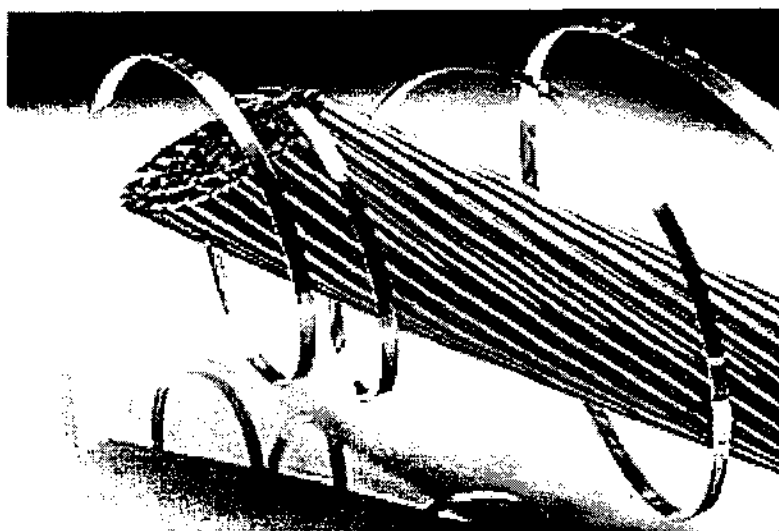


Figura 1.1 Cabo SC

Nesta tese apresentamos o projeto e a elaboração no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas de um sistema com detalhes inovadores para a caracterização de I_C . É um método de caracterização por transporte, dependente de vários detalhes experimentais complicados como a aquisição de pequenos sinais. Esta tese desenvolveu um novo sistema prático de baixo custo e com amplo espectro de aplicação.

Este sistema de medida determinará I_C e caracterizará os SC de forma rápida e precisa. Para fins de aplicação, o importante é o valor da corrente que a amostra será capaz de suportar sem dissipar energia. Esse sistema dará uma idéia precisa desse parâmetro podendo traçar sua dependência com a Temperatura (T) e o Campo Magnético (B). Neste trabalho propomos um sistema de determinação da corrente crítica com uma excitação tipo exponencial, na qual a velocidade de subida da corrente será regulada por um capacitor. A velocidade de excitação da

fonte não depende da resistência da amostra nem da resistência dos contatos. Isso proporciona uma grande vantagem ao estabelecer a taxa de subida da corrente independente das condições da amostra.

O sistema de medida é composto dos seguintes módulos:

- Controlador de temperatura
- Fonte de excitação da amostra
- Circuito detector de nível de tensão na amostra
- Circuito de proteção e sincronismo
- Voltímetro digital
- Porta amostra com aquecedor e sensor de temperatura
- Recipiente térmico de Nitrogênio líquido

Cada aquisição de I_C é feita com a temperatura estabilizada pelo controlador de temperatura. A medida de transporte de corrente na amostra é feita pelo sistema de quatro pontas, dois para a corrente elétrica e dois para a diferença de potencial. O disparo da corrente é iniciado por meio de uma chave manual ou por uma porta paralela do computador, iniciando a subida da corrente na amostra através do circuito de excitação. No momento em que a amostra supercondutora estiver dissipando, haverá uma diferença de tensão entre os contatos de tensão. Este sinal é capturado pelo circuito detector de nível, fornecendo um pulso para o circuito de proteção de corrente e para o sincronismo do disparo da aquisição no voltímetro, registrando a tensão em cima da resistência padrão em série com a amostra, conseqüentemente medindo a intensidade de corrente (I_C) da amostra neste instante.

Supercondutividade e Corrente crítica

2.1 Descoberta da Supercondutividade.

A supercondutividade foi descoberta em 1911 por Kamerlingh Onnes. Ele foi o primeiro a liquefazer hélio e, posteriormente, realizou investigações relacionadas com a dependência da resistividade elétrica com a temperatura e descobriu que a resistividade elétrica do mercúrio desapareceu abaixo de uma determinada temperatura [1]. O novo fenômeno foi denominado “Supercondutividade”, e a temperatura em que ocorre este fenômeno foi denominada “temperatura crítica (T_C)”. Posteriormente, o mesmo fenômeno foi observado em outros elementos químicos e em 1933 foi encontrada uma segunda propriedade que identifica a supercondutividade como um estado novo da matéria, especificamente chamado de “efeito Meissner-Ochsenfeld” [2]. Esse efeito consiste na exclusão do fluxo magnético do interior do material quando este é exposto a um campo magnético. Na Figura 2. 1, o desenho superior mostra o campo atravessando um SC no estado normal, e no desenho inferior o SC está abaixo de T_C excluindo o campo magnético. Do ponto de vista físico, esta propriedade é fundamental para a supercondutividade pois ela identifica esse fenômeno como um estado novo da matéria diferenciando-o do estado de condutividade perfeita, no qual é possível também atingir um estado com resistência elétrica zero.

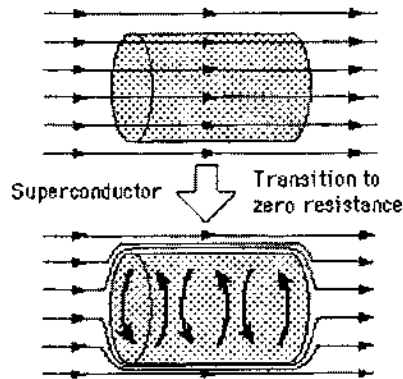


Figura 2. 1 Exclusão do campo magnético também chamado de “Efeito Meissner”.

A primeira teoria para explicar este efeito apareceu no ano 1934 com os irmãos F. e H. London^[3]. Eles postularam um modelo simples com duas equações que explicam as duas propriedades fundamentais dos supercondutores, o estado de resistência nula e o efeito Meissner. A primeira teoria fenomenológica foi desenvolvida por Ginzburg-Landau e surgiu em 1950 e, na mesma teoria de transformação de fases de Landau, foi extrapolada ao caso da supercondutividade^[4]. Nessa teoria, o estado ordenado (supercondutor) é caracterizado por um parâmetro de ordem, que está associado com a densidade de pares de Cooper. A transição de fase é considerada como sendo uma transição do estado desordenado (estado normal) ao estado ordenado (estado supercondutor).

Abrikosov desenvolveu esta teoria e previu a possibilidade da existência de um supercondutor, identificado como de tipo II, onde acima de um determinado valor de campo magnético o SC teria a particularidade de deixar o campo penetrar em forma quantizada formando uma rede de vórtices com cada vórtice levando um quantum de fluxo^[5]. Isto leva à coexistência de regiões normais com regiões supercondutoras no interior do material. Cabe ressaltar que, atualmente, quase todos os supercondutores com temperatura crítica relativamente alta são do tipo II.

Em 1957 foi desenvolvida uma teoria microscópica sobre a supercondutividade por Bardeen, Cooper e Schrieffer^[6]. Ela é conhecida como teoria BCS (as iniciais de seus

autores) e postula que a supercondutividade é carregada por partículas chamadas de pares de Cooper ou super-elétrons. O fato de a supercondutividade ser carregada pelos superelétrons pode ser entendido se imaginarmos que dois elétrons com seus *spins* antiparalelos formam um par de *Cooper*, então o momento total do par é zero. O comprimento de onda associado com o par de *Cooper* é infinito e nestas circunstâncias a partícula não pode ser espalhada pelas imperfeições da rede cristalina. Outro descobrimento importante relacionado com a supercondutividade aconteceu em 1962. Neste ano B. Josephson descobriu que os pares de Cooper podiam atravessar uma barreira de potencial no sentido usual de tunelamento^[7]. Este efeito tem grande importância para a construção de sensores de campo utilizando esses materiais.

2.2 Estado da arte.

O primeiro material supercondutor (mercúrio) foi descoberto no ano 1911. Em seguida, a supercondutividade foi pesquisada em outros elementos químicos. Por volta de 1930 tinha sido observada a transição supercondutora em quase metade da tabela periódica, incluindo o nióbio (1930) que é largamente utilizado na fabricação de bobinas supercondutoras. Cabe ressaltar que, até hoje, novos elementos químicos supercondutores continuam sendo descobertos, como por exemplo, a descoberta recente da supercondutividade no Lítio a altas pressões^[8].

Somente em abril de 1986 descobriu-se o primeiro composto com temperatura crítica em torno de 30 K. Esse composto foi uma cerâmica com composição $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ^[9]. Estudos com pressão nestes materiais incrementaram esse valor até quase 60 K estabelecendo o caminho para a obtenção de novos materiais com temperaturas críticas maiores. Em 1987 foi descoberto o composto *YBaCuO* que foi o primeiro material com T_C acima de 77 K, que é a temperatura do Nitrogênio líquido. Posteriormente surgiram os sistemas a base de

BiSrCaCuO (T_C máxima de 115 K), TlBaCaCuO (124K) e o HgBaCaCuO (132K). Atualmente o recorde de temperatura critica é de 160 K, e foi obtido em 1993 no sistema Hg-1223 sobre pressão. A Figura 2. 2 mostra o desenvolvimento de T_C dos SC ao longo dos anos.

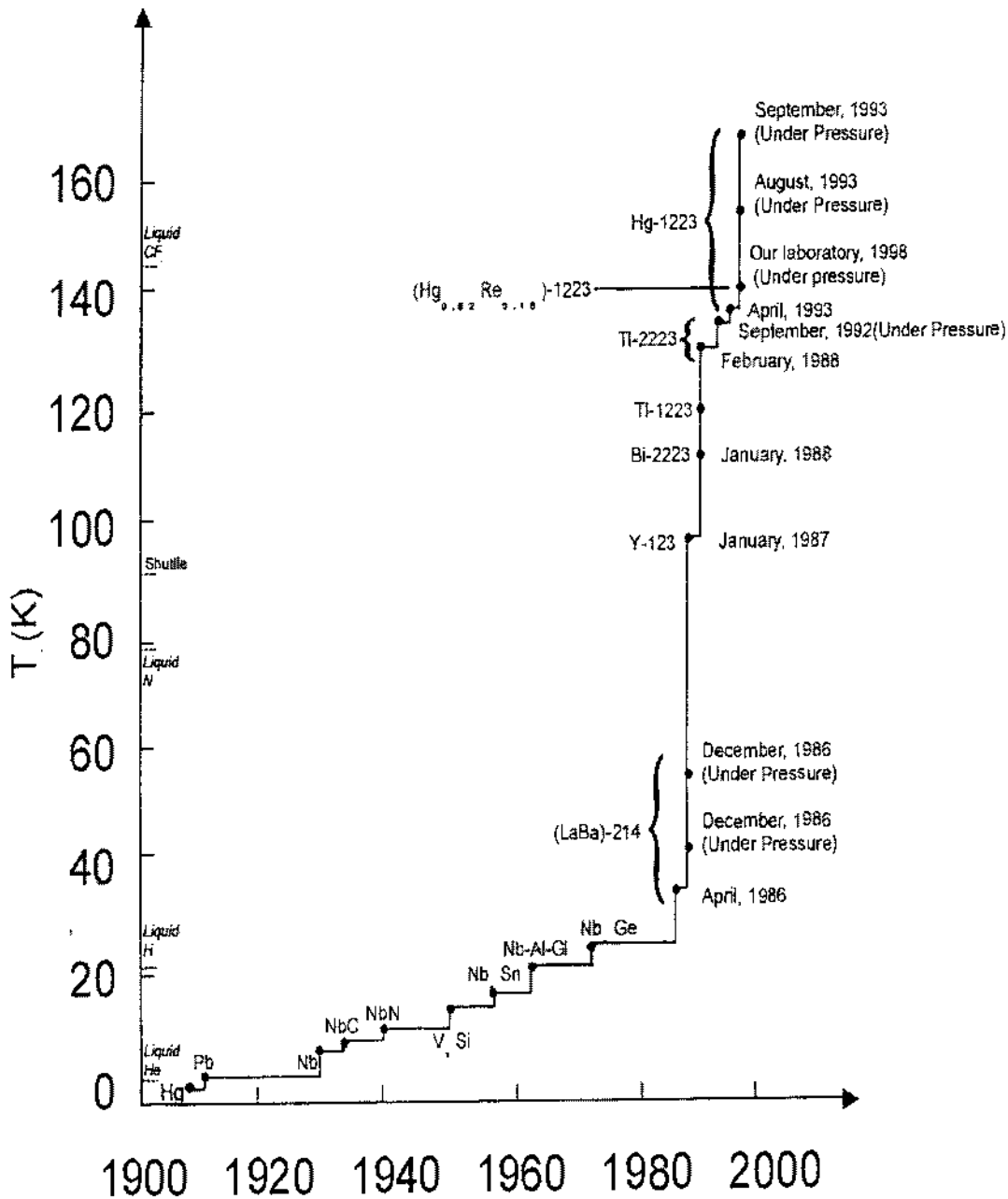


Figura 2. 2 Evolução da temperatura crítica ao longo dos anos.

Recentemente foram descobertos os “supercondutores magnéticos”. Estes sistemas apresentam uma interessante propriedade de coexistência da supercondutividade com o magnetismo em determinadas faixas de temperatura. Cabe também ressaltar a descoberta da

supercondutividade no composto intermetálico MgB_2 com temperatura crítica perto dos 40 graus. Este composto tem apresentado propriedades interessantes que o qualificam como um dos possíveis candidatos para aplicações atuais dos supercondutores^[10].

2.3 Supercondutores de temperatura crítica alta.

Abrikosov formulou, a partir da teoria Ginzburg-Landau, que, para determinadas condições, é energeticamente favorável o campo magnético penetrar em um material supercondutor em forma de tubos de fluxo magnético (vórtice). O supercondutor que apresenta esta propriedade é classificado do tipo II.

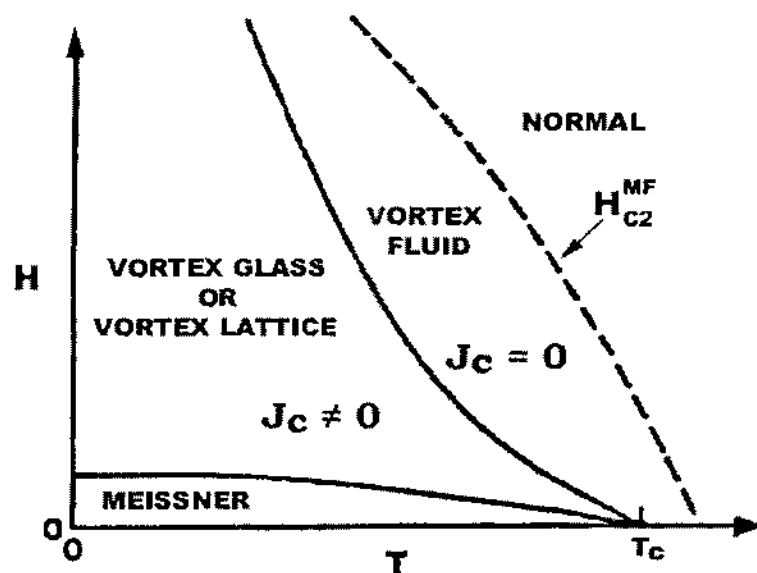


Figura 2.3 Diagrama de fases H-T de um supercondutor do tipo II.

Isto acontece quando o parâmetro $k = \lambda/\xi$ é muito maior que $1/\sqrt{2}$, onde λ representa o comprimento de penetração do campo magnético no interior de um SC, enquanto ξ representa o comprimento de coerência dos pares de Cooper, e pode ser entendido como sendo aproximadamente igual ao raio do núcleo dos vórtices que penetram o material SC. Os supercondutores de baixa T_c normalmente apresentam $k \ll 1$, enquanto que nos

supercondutores de alta T_C , o parâmetro k adquire valores muito grandes ($k \sim 10$) provocando a penetração dos vórtices no mesmo. Uma clara evidência experimental deste efeito pode ser observada nos experimentos de decoração magnética feitos em cupratos de alta T_C [11]. Cabe ressaltar que a presença desses vórtices provoca fenômenos físicos bem diferentes daqueles observados nos supercondutores de tipo I. Entre esses fenômenos destacamos a ativação térmica dos vórtices, que leva a um complicado diagrama de fases com o campo magnético-temperatura. No diagrama da Figura 2.3 [12] podemos observar que as linhas H_{C1} e H_{C2} do supercondutor do tipo II delimitam uma faixa de campos e temperaturas onde o material é penetrado pelos vórtices. Acima do campo crítico H_{C2} o material deixa de ser supercondutor.

2.4 Corrente Crítica.

A propriedade física de maior interesse para esta tese é a densidade de corrente crítica (J_C) conseqüentemente, devemos apresentar o seu conceito com mais detalhe. Num supercondutor do tipo I não existe a rede de vórtices dentro do material e quando uma corrente de transporte é aplicada sobre o material, o mesmo tenta expelir o autocampo magnético desta corrente. Para um determinado valor da corrente, o valor do autocampo chega a ser da ordem do campo crítico H_C , onde o material deixa de ser supercondutor, surgindo conseqüentemente dissipação em forma de voltagem no material. Esta corrente é conhecida como *corrente crítica*, I_C nos supercondutores tipo I [13].

No caso dos supercondutores do tipo II, o material é penetrado pelos vórtices e a interação entre estas estruturas e a corrente provoca o surgimento de uma força tipo Lorentz ($F_L = I \times \phi_0$) sobre os vórtices que tentam movimentá-los, onde I representa a corrente e ϕ_0 o fluxo magnético. A movimentação dos vórtices daria lugar à aparição de uma dissipação (voltagem) no material devido à lei de Lenz. No caso do material ser ideal, os vórtices se

movimentariam com qualquer corrente, sendo que neste caso ideal a corrente crítica do material seria nula.

Já no caso dos materiais reais, existem deformações estruturais que se comportam como regiões normais, sendo energeticamente favorável para os vórtices se localizarem nessas regiões. Estas regiões no material são conhecidas como *centros de ancoramento* (centros de pinning). A força que exercem sobre os vórtices é chamada *força de pinning* (F_p). Esta força é contrária à força de Lorentz e evita que os vórtices se movimentem, pelo menos para correntes abaixo de um certo valor. Para valores de correntes superiores a esse valor a força de Lorentz (F_L) é maior que a força de ancoramento e os vórtices se movimentam surgindo dissipação no material. O valor dessa corrente limite onde $F_L = F_p$ é chamada de corrente crítica de um supercondutor do tipo II. Logo a existência desses centros de ancoramento é responsável por um valor verdadeiro, diferente de zero, da corrente crítica (I_C) nos materiais reais^[14].

No diagrama de fases de um SC do tipo II é bem definida uma outra fronteira que separa duas regiões: uma acima na qual a corrente crítica desaparece e outra, para temperaturas e campos menores, onde existe um valor real diferente de zero para a corrente crítica. Essa linha é chamada *linha de irreversibilidade*^[15] e ela surge de uma combinação entre o movimento termicamente ativado dos vórtices (desordem dinâmica) e a desordem estática produzida pelas imperfeições do material que atuam como centros de ancoramento evitando a sua movimentação.

Destacamos que a densidade de corrente é um dos parâmetros mais importantes para a aplicação tecnológica de um supercondutor. Nessa abordagem, a corrente crítica num supercondutor deve ser definida segundo critérios experimentais, como a corrente que passa pelo supercondutor provocando o surgimento de uma dissipação (voltagem) no mesmo. Como

veremos mais adiante, existem vários critérios para se determinar seu valor, assim como vários parâmetros técnicos e experimentais.

2.5 Tunelamento (Efeito Josephson).

Tunelamento é um processo quântico pelo qual os elétrons podem viajar de um metal para outro através de uma barreira isolante. O tunelamento ocorre através de uma barreira de potencial suficientemente fina (da ordem de 10 \AA) onde os elétrons atravessam mesmo com energias menores que as correspondentes à barreira^[16].

No caso dos supercondutores, os pares de Cooper podem atravessar a barreira isolante (ou normal) de um supercondutor para outro sem voltagem aplicada. Este fenômeno acontece enquanto a supercorrente não superar um valor limite chamado de “Corrente crítica de Josephson”. Este efeito foi descoberto por Josephson e é chamado de “efeito Josephson dc”. Cabe ressaltar que esta corrente depende da temperatura e é fortemente afetada pelo campo magnético.

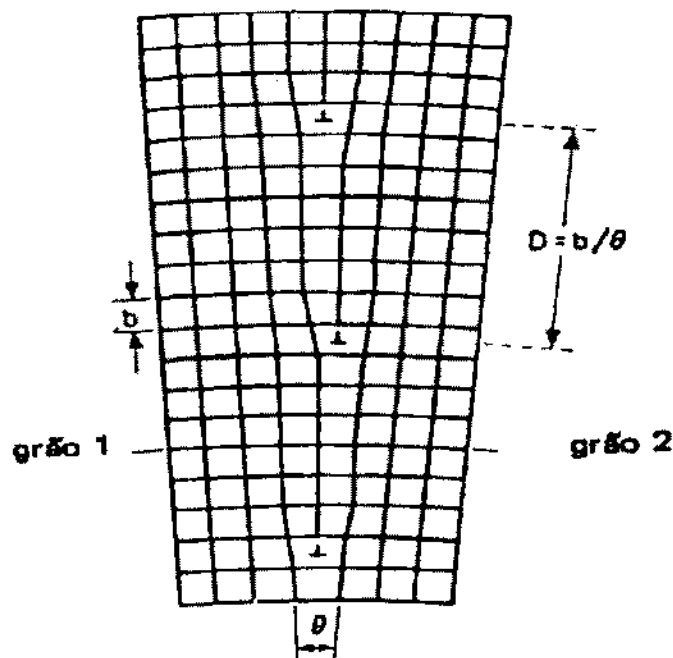


Figura 2. 4 Fronteira de grão inclinada com deslocamentos (L) onde D é a distância entre eles.

Como pode ser observado na Figura 2. 4, existe no interior da região intergranular uma rede bem aleatória de núcleos com alguns canais entre eles, através dos quais os pares de Cooper passam de um grão a outro. A largura destes canais é menor do que o comprimento de coerência (ξ), e a condução de pares de *Coopers* se dá via o efeito *Josephson* citado nos parágrafos iniciais deste item^[17,18,19]. Estas fronteiras são conhecidas como ligações fracas (*weak-links* identificada nesta tese com as siglas WL), e são fortemente influenciadas pelo campo magnético externo aplicado^[20].

2.6 Corrente Crítica em materiais cerâmicos.

Atualmente um grande número de aplicação necessita de materiais com grandes dimensões, como na fabricação de cabos, e boas propriedades físicas como a rigidez e a flexibilidade de um metal condutor. Estes materiais só podem ser obtidos em forma de cerâmicas. Sua obtenção envolve diferentes técnicas de produção de materiais que usam diferentes precursores como ponto de partida. O resultado final é uma cerâmica (material policristalino) composta de uma distribuição de grãos. As propriedades físicas destes supercondutores granulares são diferentes daquelas dos *monocristais* e estão relacionadas com as próprias estruturas granulares dos materiais.

Estes materiais cerâmicos são formados por grãos (regiões intragranulares) interconectados entre si por regiões intergranulares. Dependendo do método de obtenção destas amostras, a sua microestrutura tem várias formas, com características diferentes como, por exemplo, o tamanho médio do grão e a porosidade, que modificam as propriedades elétricas e magnéticas destes materiais. Podemos classificar as propriedades físicas de um material supercondutor cerâmico como intragranular ou intergranular. A propriedade intragranular está caracterizada no interior dos grãos enquanto uma intergranular está associada com as regiões entre os grãos. Por exemplo, ao se colocar um supercondutor

cerâmico na presença de um campo magnético, em uma determinada intensidade de campo magnético, ele irá começar a penetrar as regiões intergranulares. Este valor é definido como primeiro campo crítico intergranular, ou H_{C1I} . Um sucessivo incremento do campo magnético fará com que ele comece a penetrar o interior dos grãos, então podemos falar de um H_{C1g} ou primeiro campo crítico intragranular.

Do ponto de vista experimental, a corrente crítica de transporte (I_C) é a corrente elétrica máxima que um supercondutor pode conduzir sem dissipação. As amostras policristalinas são formadas por uma rede aleatória de grãos interconectados por regiões intergranulares e a corrente crítica de transporte tem um caráter percolativo^[21,22]. Isto é determinado pelo fato da supercorrente dos pares de Cooper terem de viajar de um contato de corrente ao outro, encontrando um caminho sem obstáculos que limitem a sua passagem. O termo obstáculo está associado com aquelas regiões de supercondutividade “reprimida” e que são responsáveis pelo surgimento da dissipação.

No caso da corrente crítica podemos também definir corrente crítica intergranular e corrente crítica intragranular^[23]. A corrente crítica intragranular se estabelece no interior dos grãos. O mecanismo que determina seu valor está associado com a competição entre as forças de Lorentz e de ancoragem dos vórtices. Este valor é da ordem de 10^5 A/cm². Já no caso da corrente crítica intergranular ela está limitada pelas imperfeições na região de fronteira intergranular e seu valor é de aproximadamente 100 A/cm², mil vezes menor que a corrente intragranular.

Os principais obstáculos à passagem da supercorrente dentro de uma cerâmica são os defeitos macroscópicos e principalmente as fronteiras entre grãos ou regiões intergranulares^[24]. Uma fronteira de grão acomoda em seu interior um número grande de deslocamentos contendo um campo da deformação associado ao núcleo do deslocamento. Este campo de deformação quebra a simetria da rede cristalina na sua vizinhança e,

conseqüentemente, quebra a supercondutividade. Assim, a área eficaz para a passagem dos pares de Cooper diminui^[25]. Uma fronteira de grão por inclinação é representada esquematicamente na Figura 2. 4.

Mediante experimentos de susceptibilidade AC ou magnetização podemos obter uma estimativa da corrente crítica intragranular^[26]. A grande diferença existente entre o valor de corrente crítica inter e intragranular faz com que a densidade de corrente crítica de transporte (J_{CT}) seja uma medida direta da corrente crítica intergranular que, por sua vez, limita o valor de J_{CT} . Este fato faz com que determinadas amostras cerâmicas supercondutoras apresentem em algumas situações experimentais valores de J_{CT} bem pequenos dificultando a sua determinação experimental.

Conforme já enfatizamos, a propriedade física mais importante de um supercondutor para um grande número de suas aplicações é a densidade de corrente crítica (J_C). Um material no estado supercondutor não deve dissipar energia quando submetido a uma corrente. Como foi visto anteriormente, as flutuações térmicas nos supercondutores tipo II (aqueles de maior T_C) provocam o surgimento da dissipação^[12]. Este efeito não é pequeno nestes materiais e o mesmo tem grande relevância. Isso pode ser constatado na Figura 2. 5 que mostra a dissipação em função da temperatura de um material supercondutor e do cobre comum. Esta figura mostra as curvas de resistividade elétrica com campos magnéticos diferentes (de 0 a 12 Tesla) para o SC a base de Bismuto e duas curvas do Cobre com intensidade de campo de zero e de cinco Tesla. Pode ser observado que abaixo de determinadas faixas de campo e temperatura o supercondutor dissipa mais do que o cobre, limitando suas vantagens tecnológicas em relação ao metal de Cobre.

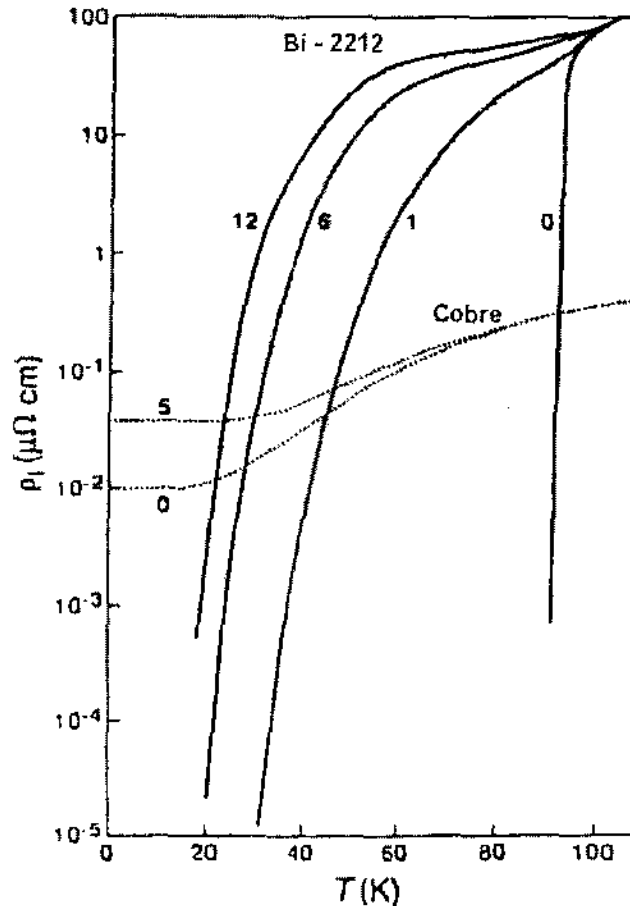


Figura 2. 5 Comparação entre a curva de resistividade do SC a base de Bismuto e do metal Cobre em função da temperatura com diversos campos aplicados com seus valores indicados em tesla .

2.7 Aplicações tecnológicas dos supercondutores.

Não podemos deixar de mencionar brevemente algumas das aplicações dos materiais supercondutores. Os supercondutores possuem principalmente três vantagens sobre os condutores normais:

- Conduzem eletricidade sem perda de energia,
- Redução expressiva dos circuitos elétricos,
- Grande capacidade para gerar campos magnéticos,

Os supercondutores podem ser usados como geradores de energia mais eficientes economizando recursos em comparação com sistemas convencionais. Usando supercondutores, o gerador pode desenvolver um campo magnético muito mais alto do que o

de um gerador convencional, permitindo ao gerador supercondutor ter dimensões menores para a mesma produção de energia. Outra vantagem é que a resistência elétrica associada ao fluxo de eletricidade nos enrolamentos do motor do gerador convencional não está presente.

Não existe, atualmente, nenhum método difundido e eficiente de armazenar grandes quantidades de eletricidade. Um sistema conhecido como SIMSAE (Sistema Magnético de Armazenagem de Energia) poderia prover, algum dia, um meio prático e eficiente de armazenar grandes quantidades de energia elétrica. Seriam grandes bobinas supercondutoras, a maioria das quais subterrâneas, capazes de armazenar grandes quantidades de eletricidade por períodos de tempo muito grandes. Este sistema poderia ser conectado à rede de energia.

A supercondutividade propiciará também um importante avanço tecnológico para a indústria eletrônica. Juntando-se ao transistor e aos circuitos integrados, a supercondutividade poderia afetar drasticamente o campo da eletrônica. O fato dos supercondutores conduzirem eletricidade sem resistência reduziria a dissipação de calor dos circuitos integrados e transistores. Os supercondutores poderiam acrescentar alguns benefícios adicionais, tais como a eliminação de interferência magnética em circuitos integrados por causa de sua capacidade de expelir campos magnéticos. O uso de interligações supercondutoras permitiria que os componentes fossem compactados em um grau maior, permitindo, assim, ainda mais componentes caberem num único circuito integrado, diminuindo muito os tempos de operação.

A pesquisa ligada aos dispositivos SC está apenas começando, muitas outras aplicações serão encontradas e existem ainda muitas dúvidas sobre esta nova tecnologia. Tentamos aqui apenas criar uma ferramenta para desvendar mais um dos mistérios envolvendo esses novos dispositivos. Serão necessários muitos investimentos nesta área, a perspectiva de crescimento é muito grande de acordo com os gráficos mostrados da Figura 2. 7 segundo o *International Superconductivity Industry Summit*.

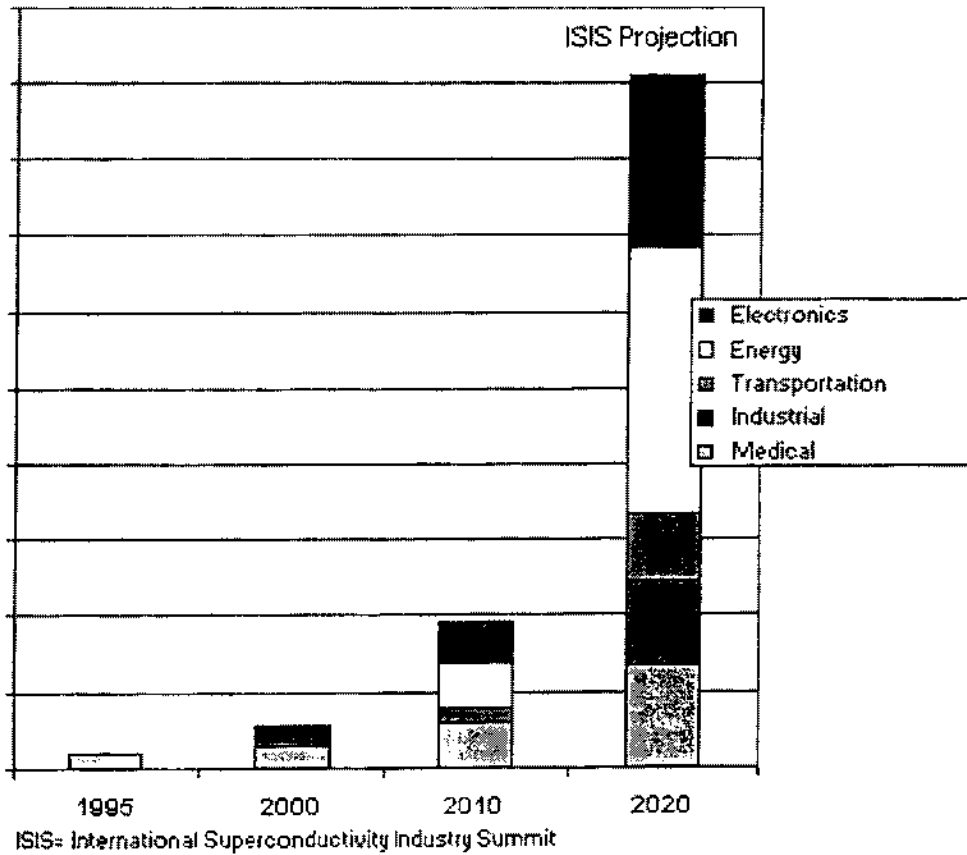


Figura 2. 7 Projeção de crescimento para a indústria de dispositivos supercondutores

Observamos para os próximos anos um acentuado crescimento nesta área, a maior fatia de crescimento será na área de geração e distribuição de energia. São dispositivos que necessitam ter alta densidade de corrente elétrica, justamente um dos parâmetros que acreditamos ser um dos mais importantes nos supercondutores motivo pelo qual dedicamos esta tese ao seu estudo.

Experimental

3.1 Introdução

Tendo em vista que a propriedade mais importante de um SC para aplicação em dispositivos é a densidade de corrente crítica (J_c), foi proposto o desenvolvimento desta tese nesta área. O objetivo deste trabalho é caracterizar este parâmetro adequadamente do ponto de vista experimental e instrumental, assim como sua dependência com a temperatura (T). Nossa proposta é construir um sistema de caracterização que tivesse grande utilidade tanto em nosso laboratório como em qualquer outro que trabalhe com pesquisa aplicada para dispositivos SC. O trabalho foi dividido em duas etapas, a primeira foi à busca bibliográfica que dessem informações e detalhes técnicos sobre os sistemas já produzidos com finalidade semelhantes. Isto ajudou a compreender as dificuldades neste tipo de medida e os tipos de soluções já publicadas em revistas técnicas. A segunda etapa envolveu o projeto do sistema de medição que atendesse grande parte dos tipos de abordagem experimentais na determinação de I_c .

O objetivo central foi fazer um sistema capaz de determinar a corrente crítica e traçar automaticamente uma curva de I_c em função da temperatura, assim como mostrar a sua dependência com o campo magnético. Diferentes obstáculos foram encontrados no desenvolvimento do nosso sistema de medição como, por exemplo, garantir uma temperatura estabilizada, evitar correntes elevadas que pudessem provocar dissipação térmica nos contatos e processar um pequeno sinal da amostra.

A idéia básica da nossa abordagem é fixar a temperatura (ou o campo magnético) e aumentar a corrente até detectar o início da dissipação no SC. A solução para minimizar o

problema da dissipação térmica nos contatos elétricos foi programar uma subida rápida de corrente antes que a dissipação nos mesmos provocasse o aquecimento local da amostra. No momento do início da dissipação do SC registramos no multímetro a tensão da resistência padrão, dando a informação sobre o máximo de corrente que a amostra suporta sem dissipar, isto é, sua corrente crítica.

O início da dissipação da amostra SC é um ponto muito crítico exigindo um bom critério^[27] para sua determinação. Assim, escolhemos um nível de tensão muito pequeno, na ordem de micro volt, como critério para determinar o início da dissipação. Ele foi escolhido devido a outros diferentes sistemas de medidas o utilizarem. Para esta aquisição usamos os equipamentos que tínhamos a mão. Também construímos um circuito de detecção para pequenos sinais, capaz de ler este tipo de informação e processá-la.

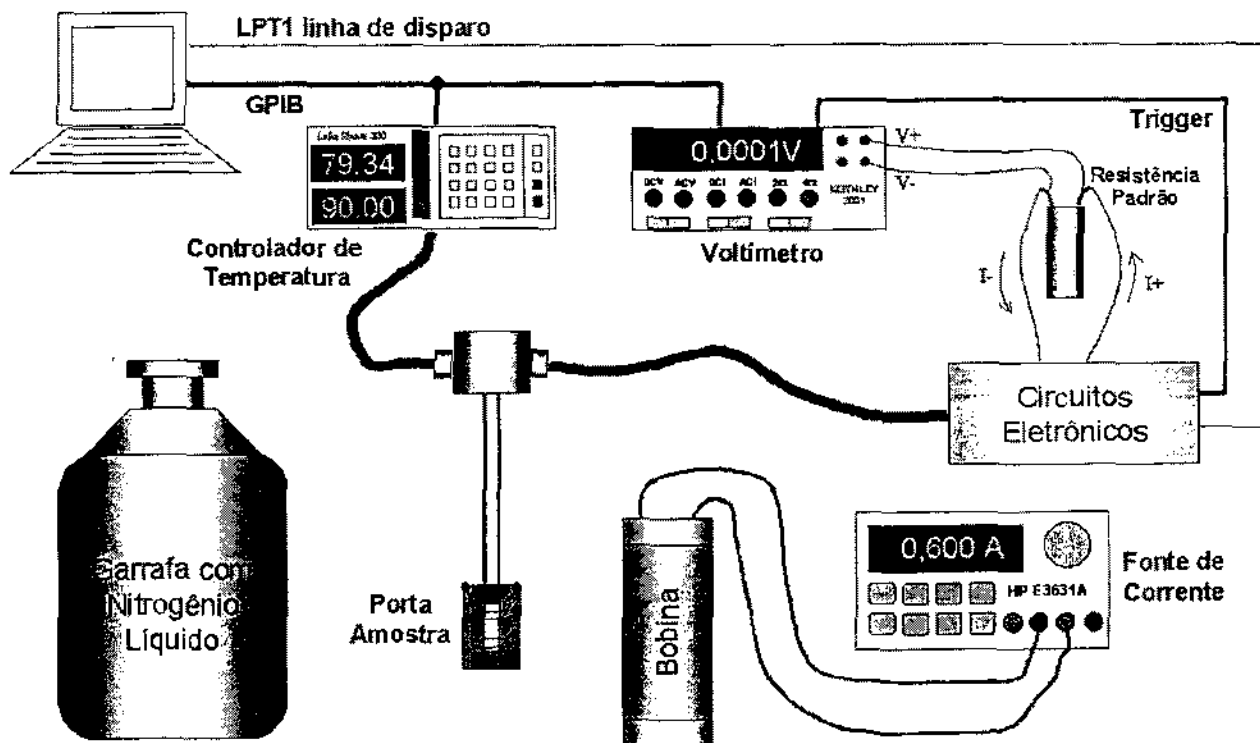


Figura 3. 1 Sistema experimental para determinação da corrente crítica em SC

O sistema completo de medida usado na determinação experimental de I_c está ilustrado na Figura 3.1. Ele é formado por alguns instrumentos de medidas e os circuitos eletrônicos projetados e construídos durante a tese.

Para facilitar o entendimento do sistema revolvemos dividi-lo em módulos. Nos itens a seguir descrevemos detalhadamente como cada bloco um funciona.

3.2 Porta amostra

O porta-amostra é utilizado para fixar a amostra e colocar os contatos elétricos (fios da tensão e da corrente). Funciona também como um harmonizador da temperatura entre a amostra, o sensor de temperatura, o aquecedor e o banho térmico, proporcionando um mínimo gradiente de temperatura. Ele é feito de uma peça de cobre folheada a ouro; ambos os metais tem uma boa condução térmica. A amostra fica eletricamente isolada do porta-amostra por meio de um verniz, papel de seda ou outro material com boas propriedades térmicas. A título de exemplo o porta amostra com uma amostra de YBaCuO instalada é mostrado na Figura 3.2. O sensor de temperatura é fixado na face oposta a da amostra, garantindo um bom contato térmico com a mesma. O aquecedor está fixado na parte branca à direita no porta-amostra, como mostra a Figura 3. 2.



Figura 3. 2 Porta amostra com uma amostra de YbaCuO de 16mm de comprimento

O porta-amostra é fixado na ponta de uma haste feita de um tubo de aço para o isolamento térmico, este conjunto é inserido num garrafão térmico (*dewar*) de Nitrogênio líquido - como mostra a Figura 3.3 - isolada do líquido por um copo de alumínio que tem uma bobina enrolada em sua volta. Este copo fica imerso no Nitrogênio líquido protegendo o porta amostra do contato direto com o líquido resfriando-o apenas por condução térmica do gás frio de N_2 . Este sistema de refrigeração com a bobina foi construído pelo Professor Jorge Luis Gonzales Alfonso na sua tese de doutorado e pode gerar campos magnéticos com intensidade de até 400 Oe.

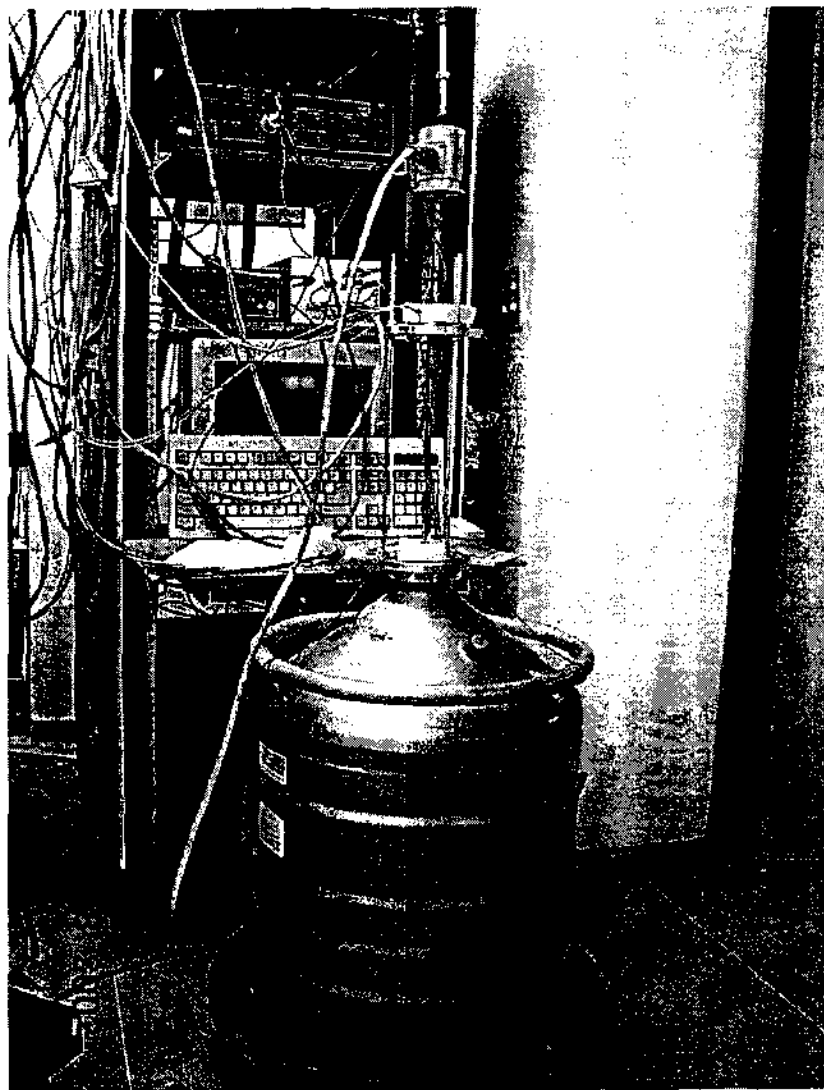


Figura 3. 3 Garrafão térmico de Nitrogênio com a haste inserida

3.3 Controle de temperatura

Como a corrente crítica depende da temperatura, é necessário ter uma excelente estabilidade térmica garantindo a qualidade dos dados adquiridos. Esse ponto é essencial para dar confiabilidade na medida ao determinar I_C . Para isso utilizamos um controlador de temperatura Lakeshore modelo 330 ou 340. Medimos a temperatura a partir de um sensor de diodo de silício calibrado, com sensibilidade de 1.9 mV/K a 77K dando uma resolução de 21mK em temperatura. Para aquecermos a amostra usamos um fio resistivo de manganina com 35 Ohms. Este controlador de temperatura fornece uma corrente máxima de 1 A para o aquecedor, permitindo uma variação de temperatura de 77 a 250 K no porta-amostra dentro do garrafão térmico com Nitrogênio líquido. O controle de temperatura é feito com um sistema de controle por parâmetros Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D). O aquecedor pode trabalhar em três faixas de potências 250mW, 2,5W e 25W.

O controlador possui dois mostradores digitais que permitem visualizar a temperatura desejada e a real simultaneamente, com uma resolução de 0,01 K abaixo de 200 K e 0,1 K acima respectivamente. É um aparelho compacto e versátil, pode ser utilizado em outros tipos de sensores como o diodo de Gálio, termopares, resistores de platina, etc. O controle na faixa de 77,5 até 90 K é muito crítico. Como a diferença entre a temperatura do líquido refrigerante e do porta-mostra é pequena, qualquer subida de potência altera o equilíbrio do ambiente. Precisamos usar parâmetros PID apropriados para o nosso sistema, que podem exigir longo tempo para atingir a estabilização de temperatura, dificultando a medida. Para temperaturas acima de 90 K o controle torna-se mais eficiente.

Este aparelho possui interface GPIB e RS232, possibilitando o controle e o monitoramento remoto de suas funções, possibilitando sua integração aos outros equipamentos por meio de um software.

3.4 Contatos elétricos da amostra

Os contatos elétricos de corrente na amostra precisam ter baixa resistência, na ordem de alguns ohms. O valor dos mesmos determina o valor da potência dissipada neles, podendo afetar a estabilização da temperatura pelo auto-aquecimento local da amostra. Experimentalmente, a dissipação nos contatos elétricos provoca diferentes efeitos indesejáveis como, por exemplo, o deslocamento da curva $I_C(T)$ para uma temperatura diferente da real. O ideal seria obter contatos quase nulos ou bem pequenos. Como trabalhamos com cerâmicas supercondutoras, isto é muito difícil - sua superfície é muito rugosa e áspera.



Figura 3. 4 Amostra de Tálho de 2,95 mm de comprimento com contatos de tinta prata

Os contatos são feitos com fios de cobre colados com tinta prata condutiva e sua qualidade depende de vários fatores como, por exemplo, a difusão da tinta na superfície rugosa da cerâmica, sua porosidade, tratamentos térmicos, etc. No nosso caso obtivemos contatos com valores de resistência menores de 100Ω . São muito comuns os contatos deteriorarem ao longo da medida mascarando os resultados experimentais. Uma amostra de

um SC à base de tálio, com contatos de tinta prata como aquele mostrado na Figura 3.4 apresenta contatos elétricos de 98Ω .

A detecção do início da dissipação é feita através dos contatos da tensão. Um pequeno aumento de tensão na ordem de micro volts entre os contatos produz na entrada do amplificador diferencial um sinal com valor suficientemente grande para disparar o circuito detector de nível. Os contatos devem ser de boa qualidade, com baixa resistência, pois um acoplamento ruim provocará uma capacitância entre os contatos e a amostra, produzindo um deslocamento de tensão que pode prejudicar a atuação do circuito de detecção e do sincronismo. Os contatos elétricos podem apresentar até mais de $10 \mu V$ de deslocamento dependendo da sua resistência, saturando o circuito de detecção antes da corrente da excitação provocar uma diferença de potencial entre os contatos de tensão. Para pequenos valores de deslocamento (até $\pm 3 \mu V$) o circuito de detecção permite o ajuste de zero, deslocando o nível de tensão do sincronismo para mais ou para menos. Isso ajuda a resolver pequenos problemas termoelétricos provocados pelos contatos e fios elétricos e representa uma das facilidades experimentais importantes no nosso sistema.

3.5 Fonte de excitação

A fonte é a principal parte do sistema de medida, sendo responsável pela corrente de excitação que passará através da amostra, controlando o tempo e a máxima tensão aplicada na amostra. Para realizar este trabalho foi projetada e construída uma fonte de baixo custo, que tem uma excitação exponencial dependente da descarga de um capacitor (C1) conforme ilustrado na Figura 3.5. Aproveitamos a característica de inércia da tensão do capacitor para controlar a corrente de elétrons que flui pelo SC. Mostraremos como este fato tem uma

importância vital na determinação experimental de I_C . Este desenvolvimento representa um aspecto inovador neste trabalho.

A idéia básica é criar uma descarga de corrente crescente suficientemente grande para determinarmos o I_C do SC. Quanto maior a taxa de subida, menor a energia dissipada pelos contatos elétricos. Nossa filosofia é produzir uma descarga rápida de alta intensidade para que a energia dissipada seja tão pequena que a temperatura da amostra não varie, possibilitando a determinação da corrente crítica da amostra o I_C . Paralelamente deve ser enfatizado que esta fonte permite controlar a velocidade de subida da corrente que está atravessando a amostra. Esta possibilidade é essencial, pois estudos recentes mostram uma dependência experimental de I_C com a taxa de aplicação da corrente. Conseqüentemente estamos diante de novas possibilidades com relação a estudos associados com este último efeito.

O circuito mostrado na Figura 3. 6 representa a fonte de excitação do nosso sistema e o mesmo será detalhado nos parágrafos seguintes. A parte de controle é alimentado com 5 V, representado como V_{CC} enquanto que a parte de potência utiliza uma fonte variável HP representado como V_{DD} . Com fontes diferentes é possível variar a máxima excitação utilizada para cada amostra, independente da alimentação de controle.

A fonte de excitação pode trabalhar em três estados diferentes: aberto sem excitação, fechado com subida exponencial e fechado saturado. O estado fechado saturado possui uma corrente praticamente constante. Este estado não tem nenhuma aplicação prática neste projeto sendo usado apenas os dois primeiros estados.

A amostra é representada pelo resistor R16; o R15 é a resistência padrão utilizada para determinar I_C da amostra como mostra a Figura 3.5. A amostra e a resistência padrão está ligadas em série ao emissor de Q5. Todas a tensões medidas são referenciadas à terra com exceção da tensão diferencial dos contatos elétricos da amostra.

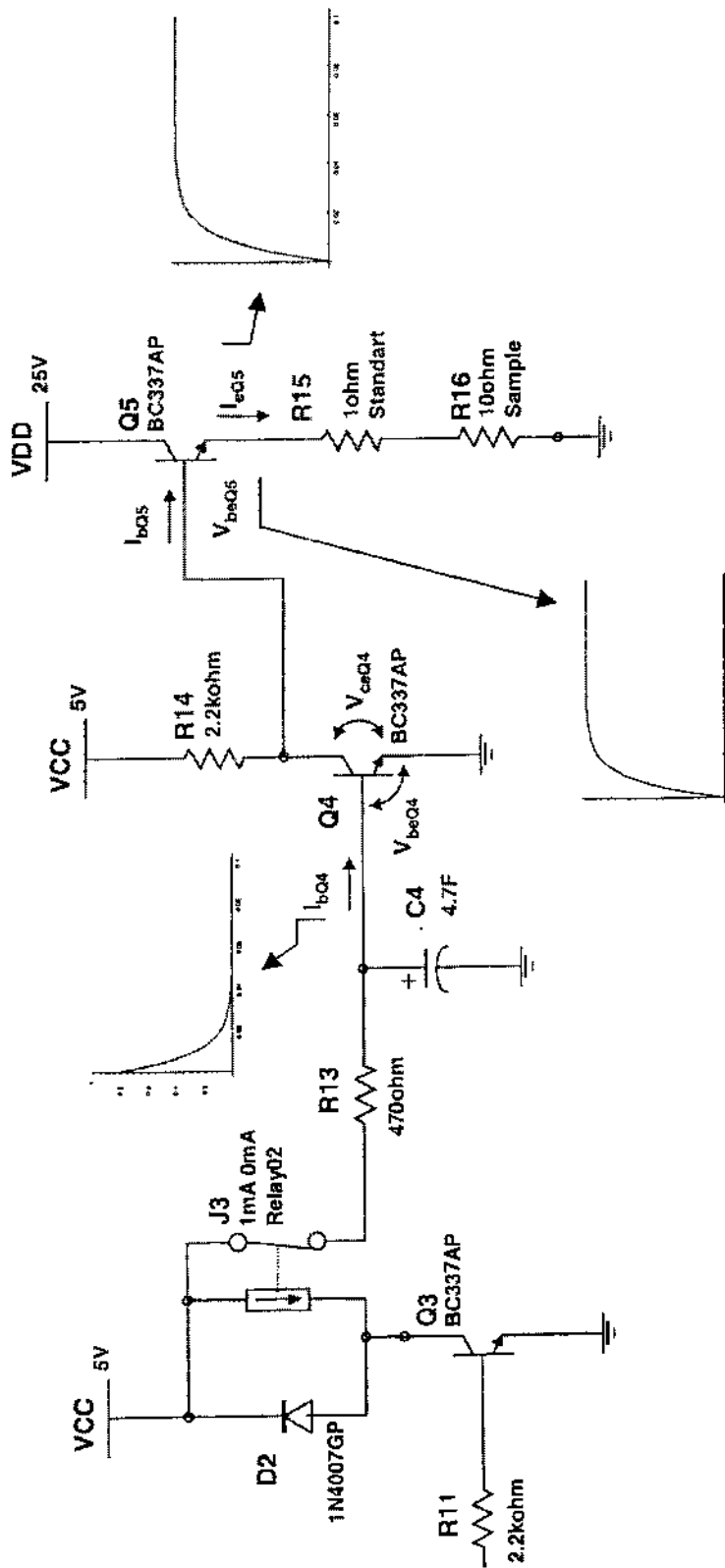


Figura 3. 6 Fonte de excitação da amostra com os tempos

3.5.1 Estado aberto sem corrente.

Tomando com base o circuito da Figura 3.5 quando o transistor Q3 recebe um sinal positivo (seja de uma chave analógica ou um sinal digital vindo de uma porta paralela do micro, por exemplo) na sua base ele conduz sendo responsável pela abertura e fechamento da chave (Relay02). No estado fechado não há corrente de base em Q3 para provocar sua condução, deixando a chave Relay02 fechada e o capacitor C4 carregado com o valor da tensão base-emissor (V_{beQ4}) de Q4. Dessa forma, o transistor Q4 está trabalhando na região de saturação. Como a tensão coletor-emissor (V_{ceQ4}) é muito pequena, a corrente de base (I_{bQ5}) do transistor Q5 é praticamente nula, provocando o seu corte. A amostra em série com o transistor Q5 - como mostra o circuito da figura 3.5 - recebe uma corrente de emissor (I_{eQ5}) nula.

3.5.2 Estado fechado com excitação exponencial.

Este segundo estado do circuito marca o início do disparo da corrente. Pode ser feito por meio de uma chave analógica ou digital aplicando-se uma tensão de 5 V no resistor R11. Com isso, uma corrente flui na base de Q3 ($I_{bQ3} \neq 0$), provocando sua condução acionando o Relay02, forçando-o a abrir e causando uma interrupção na alimentação do capacitor (C4) e na base do transistor Q4. A carga contida em C4 é consumida para manter a corrente de base (I_{bQ4}) no transistor Q4. Como a tensão do coletor (V_{ceQ4}) do transistor Q4 é inversamente proporcional à tensão do C4, conforme C4 se descarrega, a tensão V_{ceQ4} sobe. Com este aumento, a tensão de base (V_{bQ5}) do transistor Q5 também aumenta, produzindo uma corrente de emissor (I_{eQ5}) que começa a excitar a amostra SC. Essa excitação é proporcional à tensão de V_{DD} e à variação da tensão do Capacitor C4. Dependendo da quantidade de carga contida em C4, teremos um disparo mais lento ou mais rápido. Isto resulta num ponto importante. A intensidade máxima de corrente aplicada à amostra depende da tensão V_{DD} e das resistências

dos contatos da amostra e da resistência padrão. Na figura 3.5 podemos observar, desde o início do disparo, os gráficos da tensão em função do tempo em cada ponto do circuito.

Na figura 3.6 podemos ver a simulação de como V_{DD} influencia na máxima excitação da amostra em função do tempo. Tomando como base esse gráfico, observamos que para o mesmo tempo de 2 segundos a tensão de excitação varia dependendo do valor de V_{DD} , mostrando como a excitação depende fortemente dessa tensão. Para o cálculo dos valores de tensão representados nesse gráfico foram utilizadas a mesma capacitância e a mesma resistência em todas as curvas, para valores diferentes de V_{DD} .

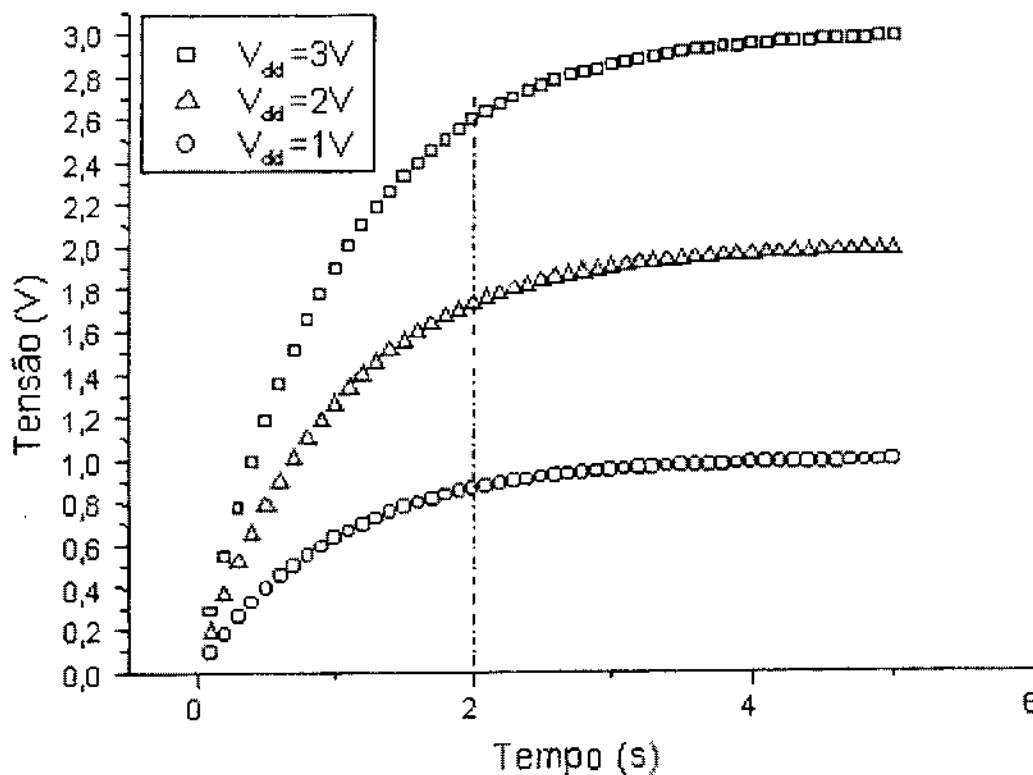


Figura 3.7 Gráfico da excitação da amostra em função do tempo com dependência de V_{DD} .

Conseguimos um ótimo controle da corrente a partir da descarga de um simples capacitor, utilizando somente componentes simples e econômicos, atingindo um dos objetivos

deste trabalho. Como foi dito, isto representa um ponto inovador em relação aos outros trabalhos reportados na literatura.

3.6 Circuito Operacional Detector Diferencial

A amostra na fase supercondutora apresenta nos contatos de tensão uma diferença de potencial praticamente nula. Com o incremento da corrente elétrica na amostra, a partir de um certo valor, há o início da dissipação, isto é, a amostra começa a apresentar resistência elétrica. De acordo com a relação:

$$V = R \times I \qquad \text{Equação (3.1)}$$

Onde, V é a tensão dos contatos elétricos, R é a resistência da amostra e I a corrente que está passando, o surgimento de uma dissipação na amostra é equivalente ao surgimento de uma voltagem nos contatos elétricos da amostra. Existem vários critérios para determinação de I_C . Neste trabalho usamos o nível de tensão experimental de um micro volt como indicador do início da dissipação na amostra.

Nosso circuito é capaz de detectar diferenças menores que um micro volt, possuindo um ganho de tensão de um milhão. Foram usados dois operacionais de precisão (U_2 e U_3) com baixo ruído para o circuito detector diferencial como é mostrado na figura 3.7.

O circuito possui dois estágios tendo cada um ganho de 1000, um com configuração diferencial e o outro inversor. Este tipo de configuração diferencial^[28] é usado em diversos sistemas onde há a necessidade de ler a diferença de potencial sem referência. Existem vários tipos de circuitos diferenciais, uns simples e baratos, outros mais complexos e caros. A configuração mais comum consiste de um número de operacionais interconectados entre si e uma rede de resistores de precisão associados a eles. Essa é a técnica mais popular para

amplificadores usados em instrumentação quando se deseja desenvolver um circuito prático com um mínimo de componentes.

Existem outros circuitos diferenciais com fonte de corrente controlada e refletores. Isso elimina características redundantes e tende a minimizar problemas de dependência dos circuitos ativos com a precisão dos resistores. Um dos problemas desses circuitos é a precisão dos circuitos integrados. Operacionais com características diferentes irão provocar uma não linearidade nesses circuitos entre baixo e altos ganhos.

Circuito Diferencial de ganho 1000000

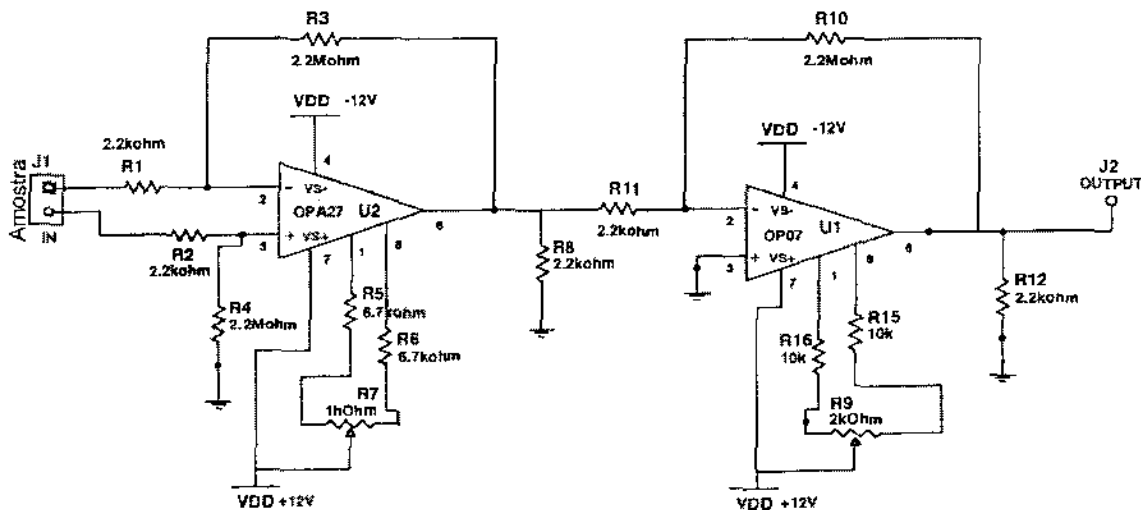


Figura 3. 8 Circuito Diferencial com ganho de 1.000.000

3.6.1 Cálculo do ganho do primeiro estágio

Usamos o método mais simples de implementação diferencial com um amplificador operacional. Tomando como base o circuito da Figura 3. 8 o estágio do operacional OPA27 ilustra essa configuração, a tensão de saída pode ser derivada pela superposição das entradas. Usando esta configuração vamos calcular o ganho (G_1) deste primeiro estágio detector/amplificador.

Chamando a saída do OPA27 de V_{out1} para a entrada V_{R2} (com V_{R1} aterrada) obtemos

$$V_{out1} = V_{R2} \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

Agora chamando a mesma saída do OPA27 de V_{out2} para a entrada V_{R1} (com V_{R2} aterrada) obteremos

$$V_{out2} = -V_{R1} \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad \text{Equação 3.3}$$

Por superposição

$$V_{out} = V_{R2} - V_{R1}$$

$$V_{out} = V_{R2} \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) - V_{R1} \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad \text{Equação 3.4}$$

Como $R_3=R_4$, $R_1=R_2$ e $V_{in}=V_{R2} - V_{R1}$:

$$G_1 = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_4}{R_2} \quad \text{Equação 3.5}$$

Como $R_4=2,2 \cdot 10^6 \Omega$ e $R_2=2,2 \cdot 10^3 \Omega$ o ganho (G_1) neste estágio diferencial é de:

$$G_1 = \frac{2,2 \times 10^6}{2,2 \times 10^3} = 1000$$

Obtivemos o ganho esperado, para este tipo de implementação.

3.6.2 Cálculo da rejeição no modo comum (CMR)

Muitos operacionais, para uma entrada nula (curto circuito nas entradas) possuem um pequeno deslocamento de tensão na saída, isto é chamado de offset. O operacional OPA27 possui um ajuste por meio de potenciômetros que permite minimizar este erro. Com um curto circuito nas entradas, ajustando o potenciômetro R7 até atingir uma tensão mínima na saída do operacional, conseguimos diminuir o deslocamento para um valor desejável. Foi utilizada

uma configuração de circuitos de alta resolução indicado pelo catálogo da Burr-Brown^[29] para minimizar esse erro.

O circuito diferencial precisa de uma corrente na entrada (*bias*) de 15nA e essa corrente é utilizada para a polarização na entrada dos transistores do amplificador operacional. Quando colocamos resistores de entrada com valores diferentes, a corrente de na entrada pode provocar na entrada um deslocamento de tensão também chamado de *offset* de entrada. Este problema também foi minimizado com o ajuste fino do deslocamento de tensão por meio de um potenciômetro (descrito anteriormente). Qualquer sinal indesejado como, por exemplo, o ruído, que apareça com a mesma polaridade nos dois terminais de entrada será fortemente rejeitado na saída do amplificador diferencial, sendo chamado de taxa rejeição em modo comum (CMRR)³⁰. O CMRR é a relação entre o ganho em modo diferencial ideal e o ganho em modo comum ideal. O ganho em modo diferencial ideal foi mostrado na Equação 3.5, com um valor de 1000.

Medimos os valores dos resistores de ganho desse circuito diferencial que correspondem a $R_1=2.199\Omega$, $R_2=2.161\Omega$, $R_3=2.202.500\Omega$ e $R_4=2.185.400\Omega$, com isso calculamos o ganho em modo comum. Assim, fazendo $V_{R1}=V_{R2}$ e substituindo na equação 3.4

$$V_{out} = V_{R2} \left[\left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \times \left(\frac{R_1 + R_3}{R_1} \right) - \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \right] \quad \text{Equação 3.6}$$

Substituindo os valores dos resistores medidos na equação 3.6 resulta no ganho em modo comum de $G_c=0,00958167$

Quando transformamos CMRR em decibel (dB) temos o CMR de

$$CMR = 20 \times \log \left(\frac{G}{G_c} \right) = 231dB$$

Isso quer dizer que, sinais com a mesma polaridade e intensidade nas duas entradas serão fortemente rejeitados. Assim, mostramos uma qualidade do circuito contra ruídos indesejados que eventualmente poderiam interferir na medida.

3.6.3 Segundo estágio amplificador inversor

No segundo estágio amplificador inversor com ganho de tensão de mil, usamos um operacional OP07^[31] de custo menor que trabalha numa faixa de operação menos crítica, pois não é necessária alta precisão na entrada. Esse operacional tem baixo *offset* e uma grande estabilidade por causa do baixo ruído interno. Mantendo em toda faixa de temperatura uma baixa corrente de *bias* e alta impedância de entrada, sua temperatura de operação está entre 0° a 70°C. A 25°C possui um CMRR típico de 110dB de acordo com o seu fabricante.

Pequenas variações de tensão (o ruído e o *offset* por exemplo) com ganho alto poderiam deslocar nossa referência a níveis de saturação do nosso circuito sem corrente na amostra SC. Nesse estágio ajustamos o operacional, por meio do potenciômetro R9 mostrado na figura 3.7, para um *offset* mínimo. Esse recurso foi muito importante para determinarmos o nível de zero volt no nosso circuito.

O circuito detector de tensão com estágio diferencial e inversor produziu um ganho total de 1.000.000 em tensão. Testamos o circuito com uma série de experimentos de detecção. Para simularmos a sensibilidade do circuito, usamos um divisor de tensão resistivo, com dois resistores e um potenciômetro multivolta, alimentado por uma fonte estabilizada. Nos testes variamos a tensão e o potenciômetro para conseguir uma diferença menor do que 1µV. O circuito apresentou a capacidade de detectar diferenças menores do que 200nV. Nossa necessidade é detectar diferenças de potencial na ordem de 1µV. Com esta precisão ficamos plenamente satisfeitos com os resultados de sensibilidade desse circuito.

Testamos a imunidade do circuito contra ruídos provocados pelas fontes de tensão. Como a bateria é teoricamente uma fonte ideal livre de ruídos, confirmamos os dados testando o circuito alimentado por baterias de 12 V. Observamos que não houve diferença entre um sinal adquirido alimentado por baterias e o outro alimentado por fontes de tensão HP, comprovando a alta imunidade do circuito contra ruídos provenientes das fontes de tensão ligadas à linha de força.

O circuito detector diferencial apresentou características satisfatórias para nosso trabalho, passando em todos os testes de detecção e proteção. Testamos seu funcionamento detectando o começo da dissipação nos supercondutores. Os dados experimentais adquiridos com o circuito detector serão discutidos no próximo capítulo.

3.7 Circuito comparador de nível

O circuito comparador de nível tem a função de enviar um sinal para o circuito de trigger assim que a tensão de entrada, fornecida pelo circuito detector diferencial, atingir um determinado valor. Funciona também como um desacoplador entre os circuitos de detecção e os circuitos lógicos. O circuito é ilustrado na Figura 3.8.

Para o circuito comparador de nível foi utilizado o operacional OP27. Configuramos o OP27 como um comparador com ganho muito alto, trabalhando como uma chave aberta ou fechada. Projetamos uma referência ajustável através do potenciômetro R1 de $20K\Omega$ na entrada positiva do OP27, como mostra a Figura 3.8. Dessa forma, é possível configurar um nível de tensão de detecção do comparador para o acionamento do sincronismo. Escolher a tensão do início da dissipação da amostra através de um simples potenciômetro permitiu regular a voltagem do circuito de detecção e corrigir o deslocamento de tensão provocado pelos contatos elétricos, além de deixar o circuito flexível para a escolha do nível adequado para o disparo do sincronismo, permitindo configurá-lo para detectar qualquer nível de tensão

(entre -10 a $+10V$). Qualquer sinal menor que a tensão de referência irá saturar a entrada produzindo uma corrente na saída do OP07.

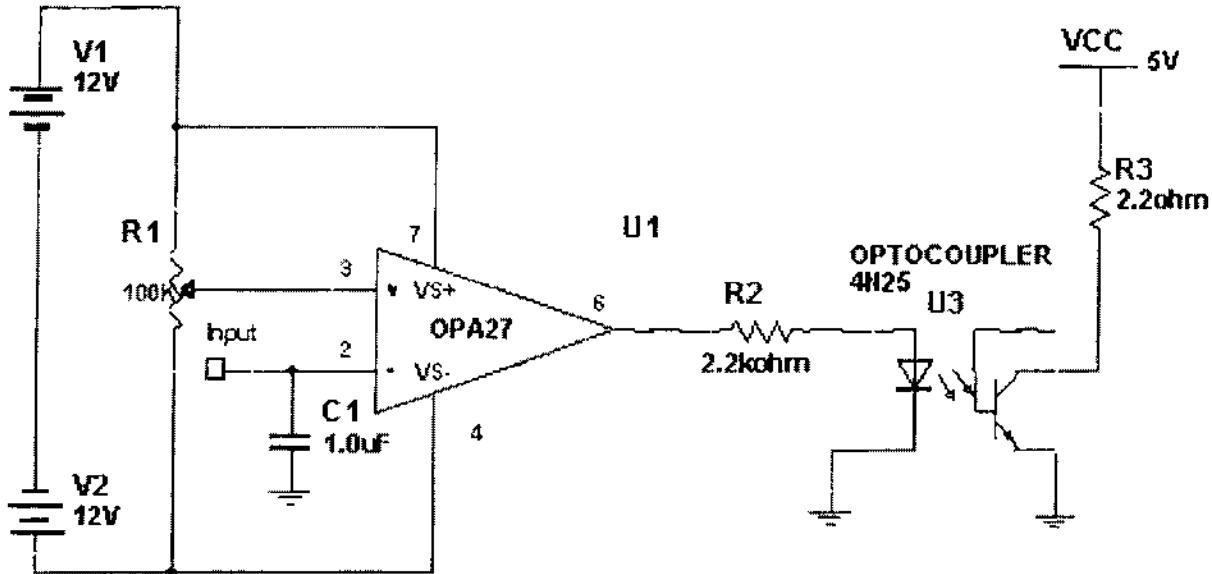


Figura 3. 9 Circuito comparador de nível

Usamos o acoplador-ótico 4N25 para isolar o circuito alimentado por $\pm 12V$ do circuito lógico alimentado por 5V. Separando esses circuitos, evitamos que eventuais problemas de uma fonte danifiquem todo o sistema. O 4N25 é um componente de fácil obtenção no mercado e tem baixo custo. Colocamos um resistor (R2) de $2,2K\Omega$ em série com a sua entrada para limitar a corrente. Trabalhando com uma excitação máxima de 12V teríamos uma corrente de 5mA muito inferior a sua capacidade de 80mA. Sua resposta no tempo é muito rápida comutando a uma velocidade típica de $2\mu s$. Com esse acoplador conseguimos compatibilizar um sinal analógico de tensão variada para um circuito digital padrão TTL.

Foi realizado um experimento onde obtivemos um *offset* de 1V na saída do circuito detector diferencial. O circuito de *trigger* foi configurado para ser acionado quando tiver uma diferença de potencial de $2,75\mu V$ nos contatos de voltagem da amostra. Para isso, ajustamos o potenciômetro R1 para uma tensão de referência de 4,25V. Dessa forma, quando a tensão

amplificada da amostra chegou a $-4,25\text{V}$, o sincronismo foi acionado, como mostra o gráfico da Figura 3.9. O tempo de $7,64\text{ms}$ mostra o atraso entre a detecção e a atuação do disparo do sincronismo.

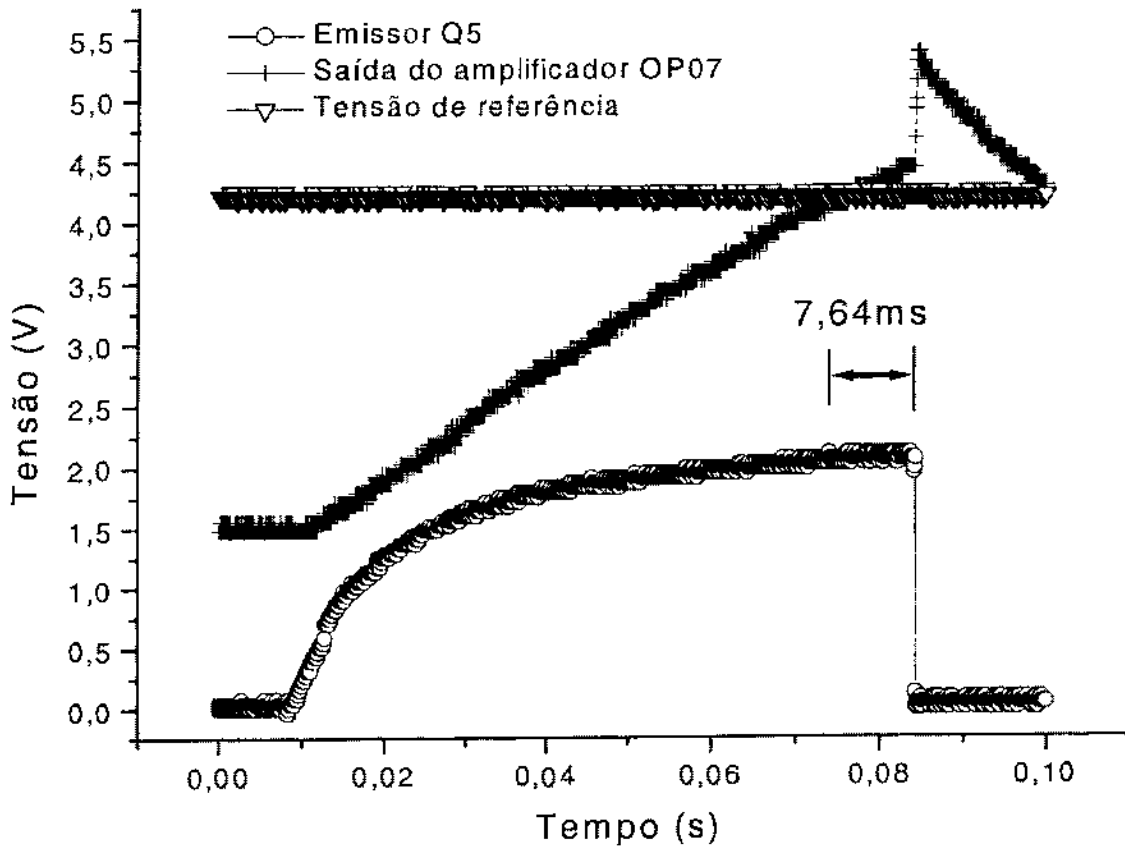


Figura 3. 10 Gráfico do sinal do amostra amplificada, da referência para o *trigger* e da fonte de excitação

Na Figura 3.9 ilustramos, os níveis da tensão dos sinais da referência, da saída do detector diferencial (OP07) e da tensão da fonte de excitação (emissor de Q5), em função do tempo. Neste teste usamos uma amostra de YBaCuO a 85 K e um capacitor de $47\mu\text{F}$ na fonte de excitação. Todos os valores experimentais foram adquiridos através de um osciloscópio digital e os resultados foram considerados satisfatórios para os nossos objetivos.

3.8 Circuito Lógico de Disparo para o Sincronismo

Nosso sistema de medida foi projetado para proteger a amostra contra altas correntes, deixando passar somente o nível necessário para a determinação de I_C . Quando atingir o valor de I_C , pré-definido através do circuito comparador de nível, há um corte na corrente. O circuito lógico protege os contatos contra o excesso de corrente, amenizando o efeito Joule na amostra. Preservar os contatos é um fato muito importante na nossa medida, como já foi mencionado, precisamos garantir que as condições físicas sejam as mesmas do começo ao fim de uma caracterização.

O circuito lógico envia um sinal de sincronismo para o voltímetro, sendo o responsável pela leitura da corrente que está passando na amostra. Esse sincronismo nós chamamos de *trigger*, quando algo está em sincronismo dizemos que ele está trigado. Uma função do circuito lógico é estar em sincronismo ao detector de nível. Quando receber um sinal do detector de nível o voltímetro deve ser receber o disparo para a aquisição de dados.

Um fato importante no circuito lógico é o tempo que ele deve permanecer habilitado, ou o tempo de duração que a chave de proteção deve estar acionada. Para isso, projetamos um circuito monestável com tempo de disparo programado por um resistor e um capacitor. Quando o circuito de proteção é solicitado, a chave Relay01 deve permanecer aberta até que a chave Relay02 esteja fechada, desligando dessa forma a fonte de excitação, garantindo que nenhuma corrente passe pela amostra.

Para melhor entendimento dividimos o circuito lógico em três tópicos com funções distintas, embora estejam interligadas entre si. São circuitos especificamente projetados para realizar um trabalho seqüencial.

3.8.1 Circuito Monoestável

Esse circuito foi projetado com a ajuda de um circuito integrado analógico/digital muito comum, chamado de unidade temporizadora 555^[32], sendo produzido com uma combinação de comparadores lineares e flip-flops digitais. Usa o encapsulamento DIP de 8 pinos como um multivibrador monoestável^[33]. A configuração do 555 está ilustrada na figura 3.10. Usamos a relação entre o capacitor C_2 e o resistor R_4 como base de tempo para o período do disparo.

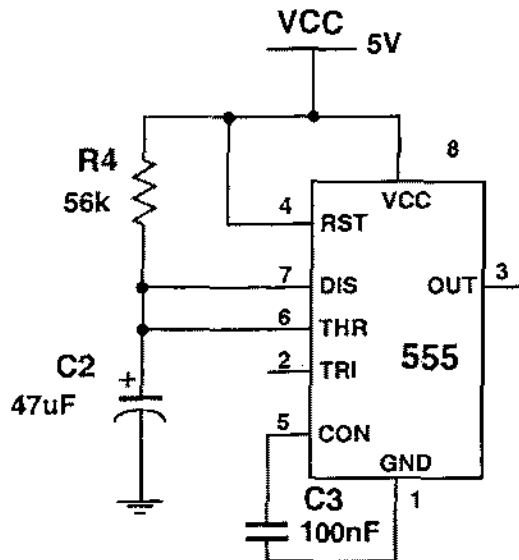


Figura 3. 12 Configuração do monoestável usando o 555

Quando um sinal, na entrada do pino 2, se torna negativo, ele dispara o monoestável, produzindo na saída, pino 3, um sinal de nível alto com um período de

$$T_{alto} = 1,1R_4C_2 \text{ [33]}$$

No circuito ficamos com um tempo de

$$T_{alto} = 1,1(56K\Omega) \times (47\mu F) = 2,9s$$

Quanto menor o tempo que a amostra fica exposta a corrente elétrica, menor é o dano provocado pelo efeito do aquecimento. Por isso procuramos fazer a fonte de excitação

trabalhar com um disparo rápido de corrente menor que 1s. O tempo do monoestável é responsável pela habilitação do circuito de proteção contra corrente alta.

3.8.2 Circuito de proteção contra alta corrente.

A proteção contra alta corrente é feita por um circuito isolador que serve para acionar um relé ligado em série com a amostra. Quando a chave (Relay01 na Figura 3.12) está aberta, a amostra fica protegida contra alta corrente. O sinal de controle é fornecido pela saída do monoestável para as entradas das portas lógicas U5C e U5B mostrado na Figura 3.11. O circuito de proteção está ilustrado na figura 3.11 sendo composto basicamente por uma porta lógica de OR, um transistor BC337 e um relé Metaltex acionado por 5V.

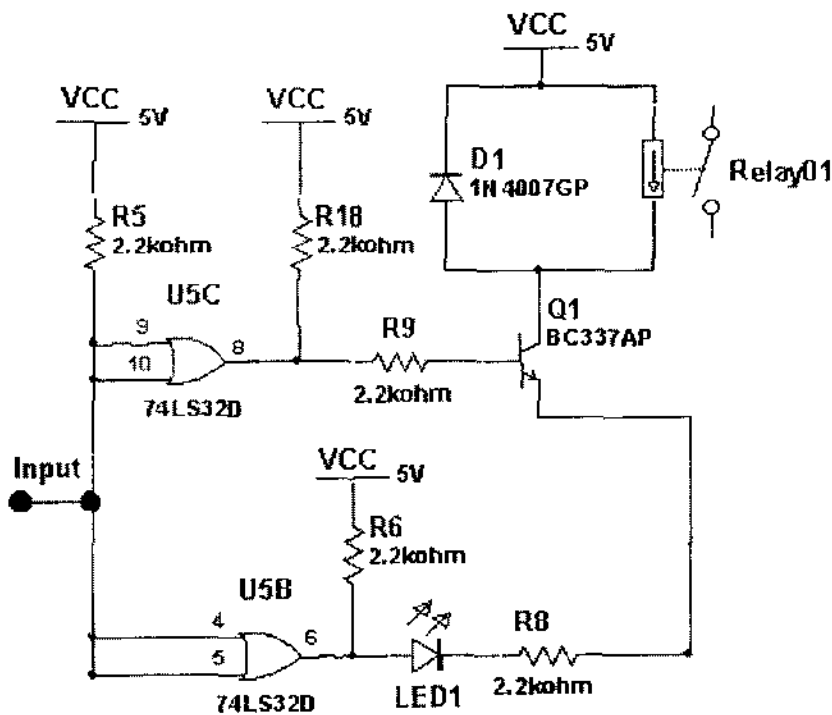


Figura 3. 13 Circuito de proteção contra corrente alta.

A porta lógica U5C tem a função de isolar o monoestável do transistor BC337 e fornecer uma corrente para a base do BC337 suficiente grande para saturá-lo. O transistor passa a conduzir com essa excitação na base, fluindo uma corrente de coletor em série com o RELAY01, produzindo uma força eletromotriz capaz de acioná-lo. O relé está normalmente

fechado, abrindo quando o monoestável envia um sinal em nível alto para a entrada da porta U5C. A outra porta lógica OR U5B é usada apenas para acender o LED1, um sinalizador da chave aberta. O diodo D1 em paralelo com o Relay01 é usado para diminuir o ruído provocado pela indutância da bobina quando ele é acionado.

3.8.3 Circuito sinalizador de aquisição

Foi usada uma resistência padrão, da Leeds & Northrup de $10\ \Omega$ com precisão de 0,001%, em série com a amostra para determinar o valor da corrente nesse circuito. Dessa forma garantimos que a mesma corrente passe sobre ambos. Lendo a tensão da resistência padrão, podemos determinar a corrente da amostra. A tensão é adquirida através de um multímetro Keithley 2001 com *trigger* ativado externamente.

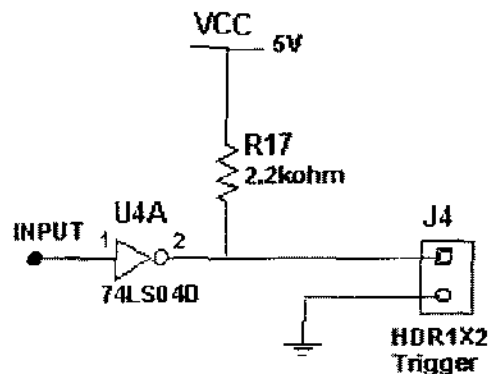


Figura 3. 14 Circuito de *trigger* para o multímetro 2001.

Um dos pontos críticos é o momento do registro do valor de I_C , isto é, o disparo de sincronismo do multímetro é acionado para guardar o valor da corrente no momento exato do início da dissipação na amostra. O sinal de disparo é dado pela porta lógica inversora U4A, ilustrada na Figura 3. 14, enviando um pulso negativo para a entrada de sincronismo externo do multímetro 2001. O pulso, com duração de 2.9 s, é proveniente da saída do monoestável, com o sinal invertido pela porta lógica U4A. Após a aceitação do sinal de sincronismo ele guarda o valor da tensão, dividindo esse valor pelo da resistência padrão determinamos o valor da corrente crítica.

Temporização dos circuitos

4.1 Introdução.

Dada a importância que tem a seqüência temporal de eventos no circuito experimental, explicaremos como o sinal se propaga no circuito desenvolvido, começando na detecção diferencial e terminando no sinal de *trigger* para o chaveamento do Relay01 de proteção.

A Figura 4. 1 mostra todo o circuito eletrônico em módulos e seguindo este caminho iremos mostrar a propagação do sinal em diversas partes do circuito.

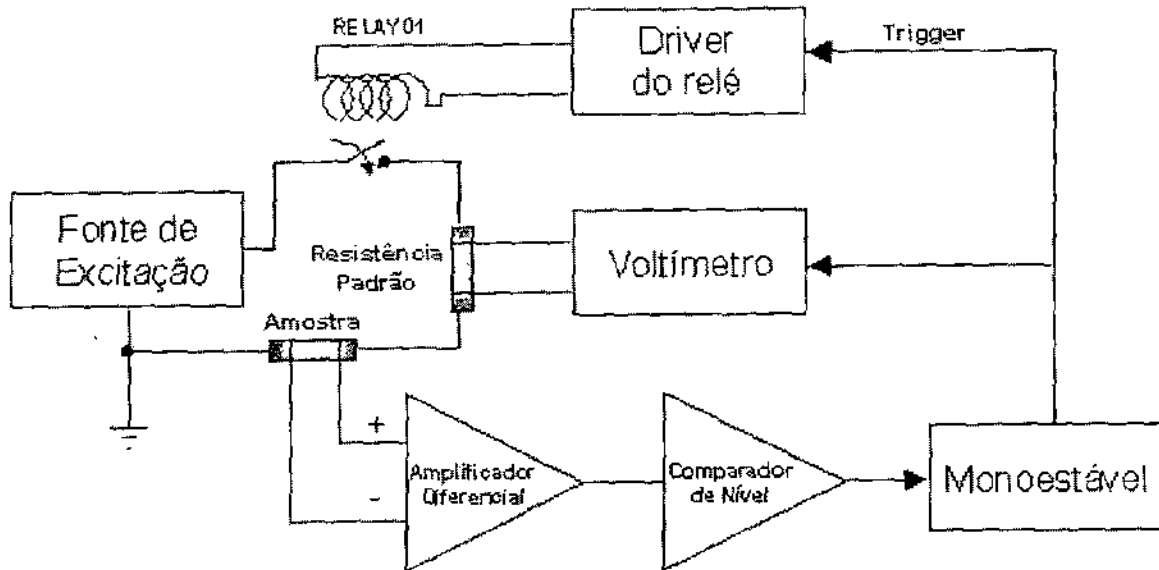


Figura 4. 1 Circuito eletrônico dividido em módulos

Usamos para a medição dos tempos um osciloscópio digital Tektronics TDS220, com interface GPIB para aquisição por computador dos gráficos. Cada gráfico foi adquirido com 2500 pontos, independente da escala de tempo utilizada. Para os testes medimos uma amostra

de YBaCuO à temperatura estabilizada de 85K. Os resultados obtidos a outras temperaturas são qualitativamente equivalentes. Estando a amostra na temperatura abaixo de T_C , conseguimos realizar os testes em condições reais de medida. Um capacitor eletrolítico de $2,2\mu F$ foi usado para controlar a duração da descarga da fonte de excitação.

4.2 Tempo total de propagação.

Do início do disparo da fonte de excitação até o disparo do sincronismo é gasto um certo de tempo, esse período é chamado de resposta do circuito e é o tempo total de excitação da amostra. Esse tempo registra a duração do experimento, do início da descarga do capacitor até a detecção do sinal na saída do comparador de nível (antes de entrar no monoestável).

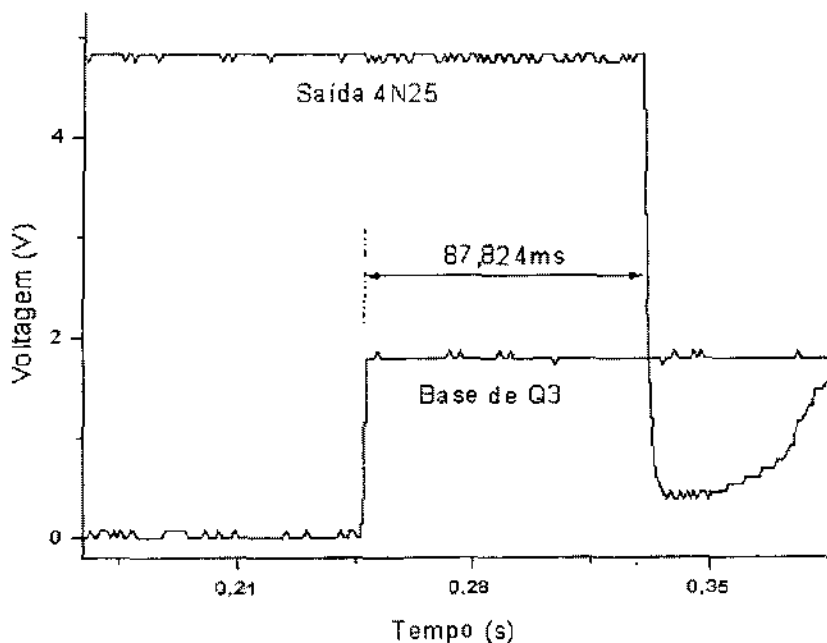


Figura 4. 2 Tempo total de 87,824 ms de duração

A Figura 4. 2 mostra a tensão na base do transistor Q3, responsável pelo início do disparo da corrente na amostra, elevando-a de 0 V para cerca de 2 V. Essa transição marca o começo do experimento para a determinação da corrente crítica. Usando como base o circuito do Anexo 1, quando se tem uma excitação de corrente na base do transistor Q3, no seu coletor

flui uma corrente capaz de acionar o Relay02, iniciando a descarga do capacitor da fonte de excitação.

Na outra curva mostramos a tensão de saída do opto acoplador (4N25) que é o estágio final do circuito detector analógico, ilustrado na Figura 4.2 como o comparador de nível. Deste estágio em diante o sinal trafega como um sinal digital de alta velocidade através de portas lógicas TTL que possuem um tempo de propagação na ordem de algumas dezenas de nano segundos. Este tempo representa um período insignificante em comparação com o tempo de propagação da parte analógica. A diferença dos tempos entre a transição de subida da base de Q3 e de descida da saída do 4N25 nos dá o valor aproximado do tempo total de propagação do sinal ao longo do sistema de medição. Este tempo é da ordem de 87 ns e é mostrada na Figura 4. 2.

4.3 Sinais da fonte de excitação.

Segundo foi explicado no Capítulo 3, foi desenvolvida uma fonte de baixo custo, baseado na descarga de um simples capacitor para provocar a excitação controlada de uma amostra supercondutora. A Figura 4. 3 mostramos como é a resposta da fonte em relação a descarga do capacitor.

Usando como referência o circuito do anexo 1 explicaremos os sinais da fonte de excitação. Abrindo-se a chave J3, o capacitor C4 começa a se descarregar em função do tempo, como ilustrado na Figura 4. 3. Sua carga de elétrons flui pela base do transistor Q4, diminuindo com o tempo. Como observamos, dependendo da quantidade de carga de um capacitor teremos uma descarga mais rápida ou mais lenta. Analogamente seria como esvaziar duas caixas d'água de tamanhos diferentes, fazendo um furo com o mesmo diâmetro nas duas, a caixa menor perderia todo seu líquido mais rapidamente. Conseguimos desse modo um

método simples e eficaz para o controle da taxa de subida de excitação da fonte variando apenas os capacitores.

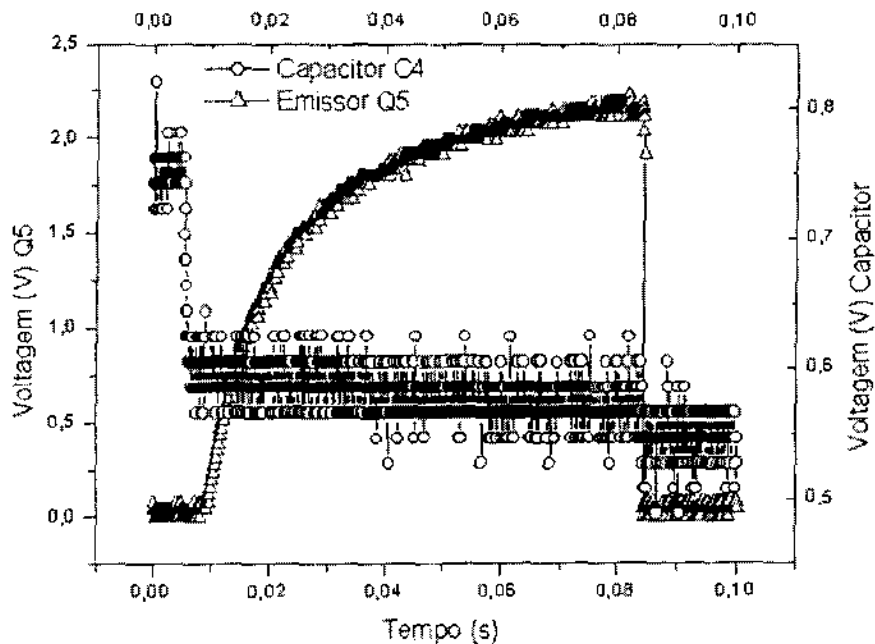


Figura 4.3 Gráfico da descarga do capacitor em relação a fonte de excitação

Os transistores em geral possuem três regiões de operação: de corte sem corrente de coletor, região linear de polarização e região de saturação com corrente máxima de coletor. Os parâmetros híbridos funcionam apenas na região linear de polarização. Para fazermos a função transferência de corrente de base em função da corrente de coletor $I_c(I_B)$ precisaríamos usar esses parâmetros. Como nosso circuito trabalha na região de corte e na região linear dos transistores essa função não serviria para representar as duas regiões de trabalho. Observamos que na região linear de polarização, usando-se um programa de simulação matemática ele funcionou perfeitamente, apenas no limite da função (região de corte e saturação) ele não corresponde à realidade.

Não podemos usar a equação^[34] $I_c = \beta I_b$, porque não existem parâmetros híbridos (β, α) para a região de corte e saturação. Nessa região o β e a resistência interna da base variam, tornando-se impossível estabelecer uma relação entre a corrente da entrada com a corrente de

saída. Foram realizados os testes de caracterização desse circuito - como mostra a Figura 4.3 - onde foi medido ao mesmo tempo a tensão da descarga do capacitor e a saída da fonte de excitação que corresponde à tensão do emissor do transistor Q5. Eles representam fielmente as características desejadas para nossa fonte de excitação, confirmando nossas expectativas de projeto.

4.4 Resposta no tempo do módulo amplificador diferencial.

O módulo Amplificador Diferencial - mostrado na Figura 4. 1 - foi testado com sinais arbitrários fornecidos por um gerador Wavetek modelo 395. Inicialmente foi gerado um pulso quadrado com período, largura e amplitude determinada. Para adquirirmos a resposta do amplificador a esse tipo de sinal, usamos um divisor de tensão para excitar a entrada do diferencial e não saturar sua saída. Os tempos e as amplitudes dos sinais foram adquiridos com a ajuda de um osciloscópio Tektronics 220 com interface GPIB. Esse teste foi importante para determinar a velocidade de resposta desse circuito. A Figura 4. 4 mostra o gráfico adquirido neste teste. Medimos um pulso com largura determinada colhida na entrada do divisor de tensão junto com o sinal da saída do amplificador diferencial. Caracterizamos a resposta do nosso amplificador em relação a uma entrada pulsada, determinando seu atraso de 2,9 ms. Para nossa aplicação essa ordem de grandeza de atraso não acarreta problemas como veremos no Capítulo 5.

Cada circuito tem uma determinada característica em relação à resposta em frequência: o passa tudo tem a mesma resposta para toda faixa de frequência; o passa faixa responde a uma determinada banda de frequência sintonizada, o passa alta às altas frequências e o circuito passa baixo somente as frequências baixas. Este circuito, como vimos, não necessita de alta velocidade de resposta. Ele é apenas um circuito de detecção e controle. Procuramos desenvolver um detector com boa resposta à frequência baixa tornando-se útil na

rejeição de ruídos à alta frequência. De acordo com o gráfico da Figura 4. 5 a forma de onda da saída do módulo amplificador diferencial (OP07) representa o funcionamento de um integrador de sinal, também usado como um circuito passa baixo.

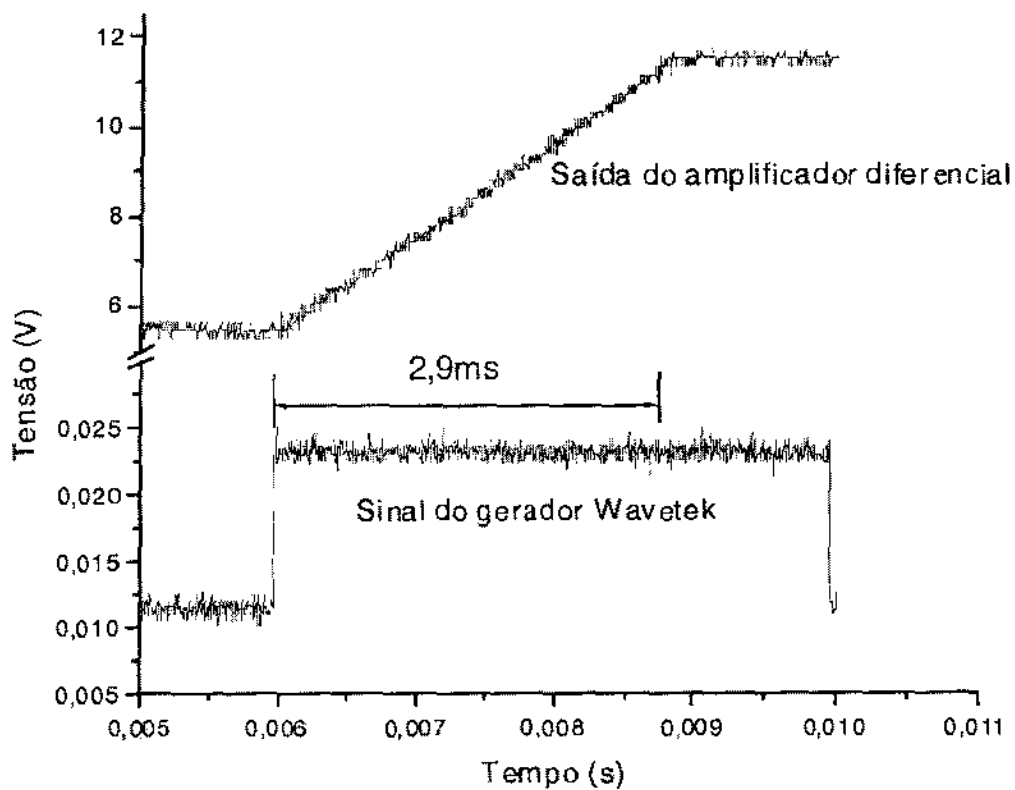


Figura 4. 4 Gráfico da resposta no tempo do amplificador diferencial

O segundo teste foi verificar a resposta em frequência do circuito. Usamos uma função do Wavetek para gerar na entrada do amplificador diferencial um sinal com amplitude constante em todo espectro de frequência, esse sinal é conhecido como ruído branco. Ele foi gerado para a realização dos testes de resposta do circuito a frequências baixas.

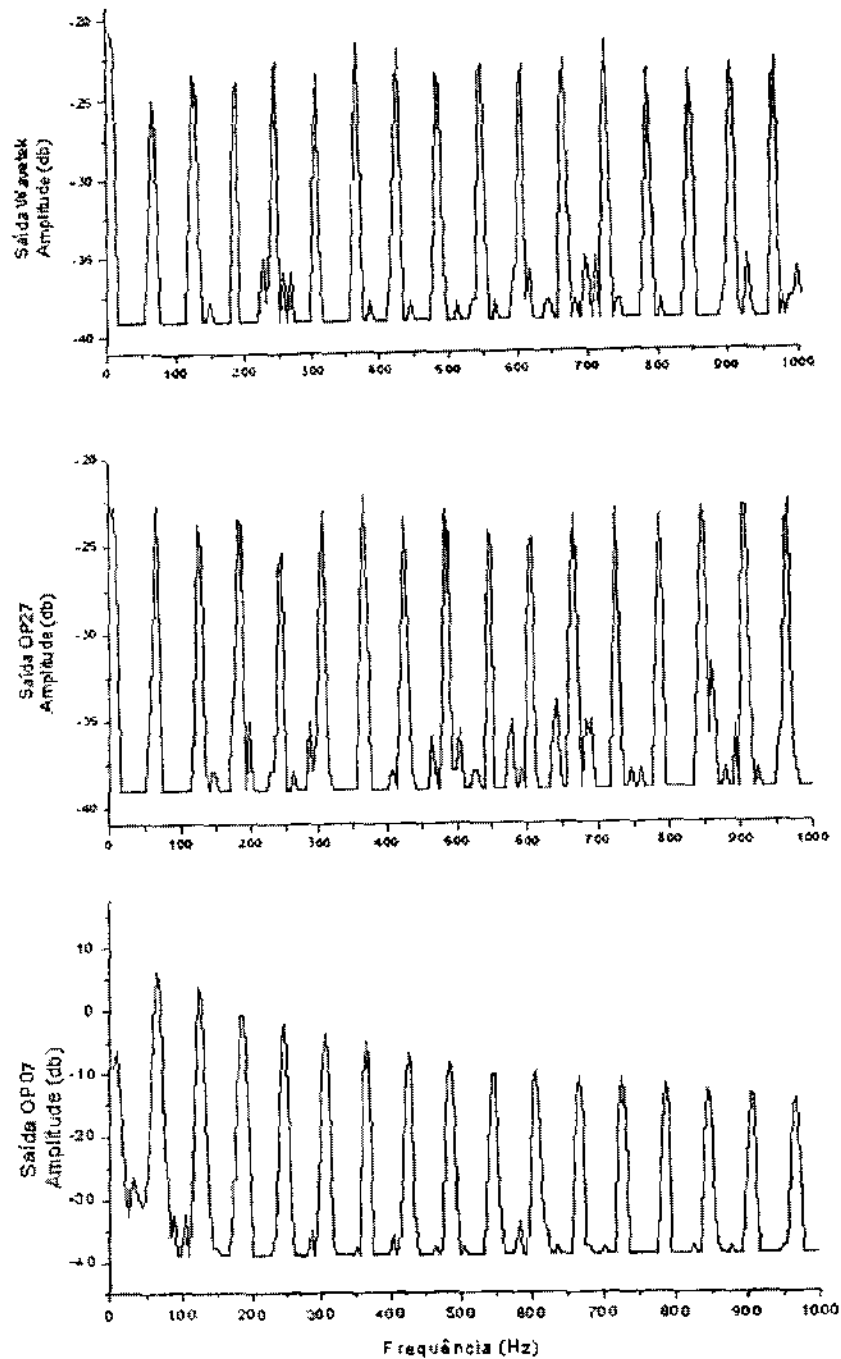


Figura 4. 5 Espectro em frequência do circuito diferencial.

Os gráficos foram adquiridos com a ajuda do analisador de espectro do osciloscópio TDS220 e aparecem representados na Figura 4.5. Eles ilustram a amplitude dos sinais em função da frequência: o primeiro espectro representa o ruído branco gerado pelo Wavetek, o segundo mostra o sinal da saída do primeiro estágio diferencial (OP27) e o terceiro a saída do segundo estágio amplificador (OP07). Usamos um divisor de tensão resistivo para diminuir a diferença de potencial e excitar a entrada do OP27. Observamos um ruído branco com

amplitude praticamente constante de 0 a 1000 Hz na saída do gerador e também na saída do OP27. Na saída do operacional OP07 houve uma pequena queda na amplitude para frequências maiores, uma característica de circuitos integradores. Esta queda foi causada pelo pequeno capacitor de 22nF colocado em paralelo com o resistor de ganho (R10), mostrado na Figura 3. 8. Sua função é filtrar os ruídos de alta frequência que acionam indevidamente o circuito de disparo de sincronismo. Isto proporcionou uma ótima estabilidade no circuito detector. Este módulo amplificador diferencial apresentou ótimas propriedades de resposta no tempo e na frequência. Suas características o qualificou para nossa aplicação.

4.5 Sinal de sincronismo.

O tempo gasto para a detecção do sinal na amostra até o acionamento do trigger corresponde ao tempo total de resposta do nosso circuito todo, isto é analógico, digital e eletromecânico (*relay*). Esse tempo pode ser determinado somando-se o atraso do módulo amplificador diferencial, com o do módulo comparador de nível, com o do circuito digital e com o do acionamento do *relay*. O módulo amplificador diferencial possui um atraso de 2,9 ms como mostramos no item anterior (Figura 4. 4).

O comparador de nível possui uma resposta no tempo de 3ms, como podemos estimar na Figura 4. 6. O primeiro gráfico ilustra a entrada do comparador de nível com transição de tensão. Após essa transição o comparador demorou 3 ms para mudar o estado da sua saída, conforme é mostrado no segundo gráfico. Grande parte desse atraso se deve ao capacitor C1 na entrada do operacional OP27, usado para retirar os ruídos de alta frequência. O terceiro gráfico foi adquirido na base do transistor Q1, responsável pelo chaveamento do relé de proteção contra corrente elevada. Representa uma medida da tensão no tempo e está sincronizado com o gráfico da entrada do comparador de nível. Observamos que o atraso é

praticamente o mesmo, apesar de percorrer um circuito maior. Isso se dá porque nosso circuito digital tem uma resposta no tempo muito menor que a parte analógica. Uma porta digital tem um tempo de propagação da ordem de 10ns, uma contribuição praticamente insignificante em relação aos 3 ms do circuito analógico. A soma de todos os tempos dos circuitos resultou em 5,9 ms o tempo total de resposta do sistema. Esse tempo é satisfatório para nossa aplicação, sendo equivalentes em frequência a mais ou menos 166 ciclos por segundo de detecção, isto é a capacidade de resposta deste conjunto de circuitos eletrônicos.

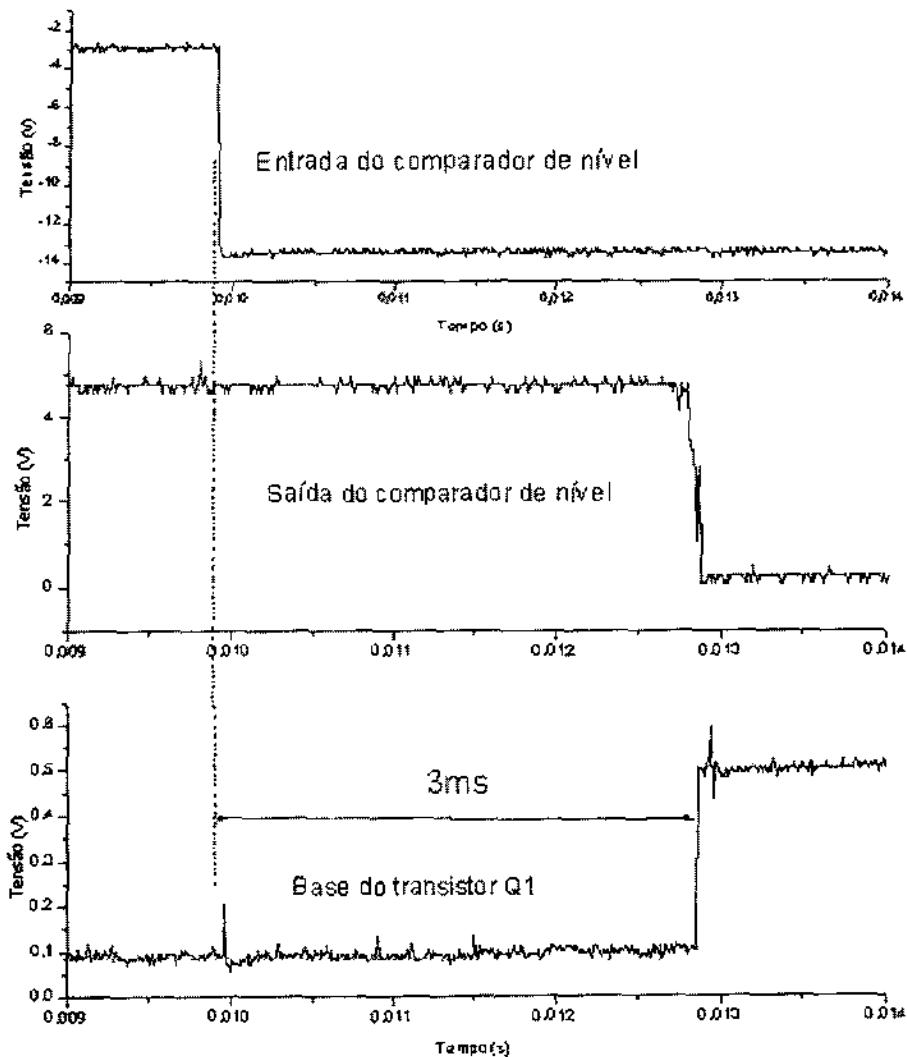


Figura 4. 6 Tempo de atraso entre a detecção e o acionamento do trigger.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

5.1 Amostras

Neste capítulo são apresentados os dados e as curvas experimentais adquiridas com o sistema desenvolvido. Os experimentos foram feitos sobre dois tipos de amostras cerâmicas supercondutoras com o objetivo de testar a reprodutibilidade de nosso sistema experimental. As amostras escolhidas foram uma cerâmica supercondutora a base Tálcio com a seguinte estequiometria $(\text{Tl}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})(\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.8})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ e o composto clássico $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$. O composto representante do sistema Tl-1223 apresenta uma temperatura crítica em torno de 122 K (a segunda mais alta obtida para uma família de supercondutores). No caso do YBaCuO , o sistema mais estudado dentro de todos os supercondutores de alta T_C , suas propriedades físicas estão amplamente caracterizadas e o mesmo apresenta uma T_C ao redor de 92 K. As transições resistivas dos compostos aparecem representadas na figuras 5.1 e 5.2

Como podem ser observados nas Figuras 5.1 e 5.2 os compostos policristalinos apresentam ótimas transições supercondutoras. As temperaturas críticas foram obtidas usando como critério a temperatura onde a primeira derivada apresenta um máximo. Com esse critério encontramos a T_C para o YBaCuO de 88,61 K e para o Tálcio de 120,29 K. Detalhes destas curvas aparecem representado em seus interiores com a derivada da curva de resistividade.

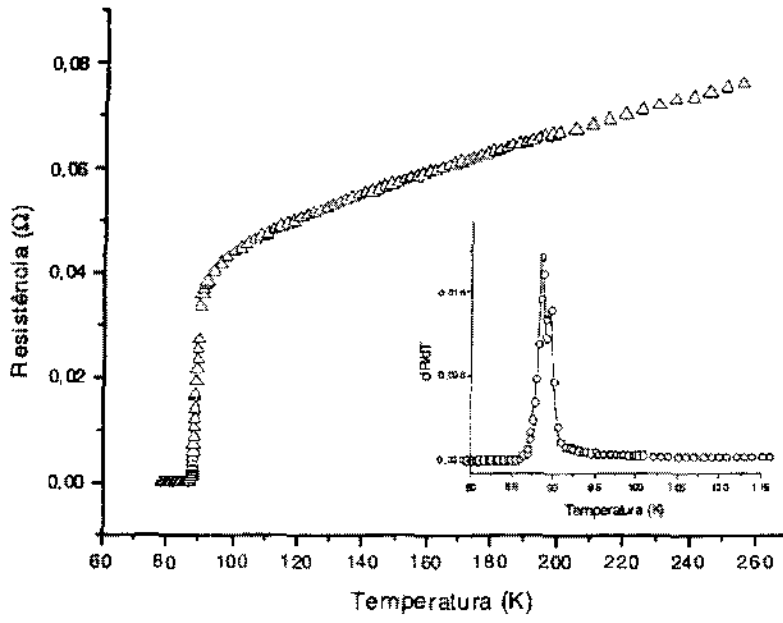


Figura 5. 1 Curva de resistência do YBaCuO com transição em 88,61 K.

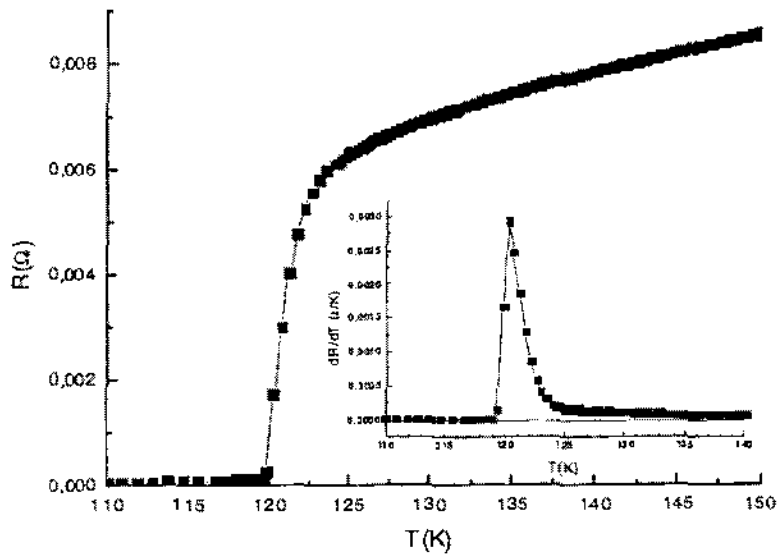


Figura 5. 2 Curva de resistência do Tálho com transição em 120,29 K.

5.2 Obtenção experimental das amostras.

5.2.1 Amostra de Tálíio

As amostras estudadas nesta tese foram obtidas usando um método de elaboração clássico de obtenção a partir de reações do estado sólido. A amostra de Tálíio pertence ao sistema Tl-1223, mais especificamente, $(\text{Tl}_{0.5}\text{Pb}_{0.5})(\text{Ba}_{0.2}\text{Sr}_{0.8})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$. Ao longo da tese esta amostra será identificada com a expressão “amostra de Tálíio”. Ela foi preparada e cedida pelo professor H. T. Peng do grupo de supercondutividade da universidade de Ben-Jhimna China. Ela foi cedida como parte de um programa de colaboração entre essa instituição e nosso grupo de pesquisa no CBPF.

O método de preparação da amostra foi baseado na mistura inicial de vários óxidos de partida. Um tratamento térmico posterior seguido de homogeneização propiciou excelentes precursores de partida. As misturas destes precursores e um adequado tratamento térmico produziram as amostras finais. Deve ser sinalizado que devido à alta toxicidade do tálíio, extremos cuidados foram seguidos durante a sua preparação. Os detalhes sobre a sua obtenção são reportados na referência [35]. A temperatura crítica determinada via resistividade (Figura 5. 2) foi de 120,29 K.

5.2.2 Amostra de YBaCuO.

As amostras foram preparadas usando reagentes químicos de alta pureza, Y_2O_3 , BaCO_3 e CuO . Os pós foram misturados e aquecidos a 900°C em ar. Posteriormente, o composto foi moído e tratado termicamente de novo a uma temperatura de 920°C . Após uma nova moída, o precursor foi compactado numa prensa hidráulica em forma de disco e submetido a um tratamento térmico à temperatura de 950 graus durante 20 horas. Posteriormente, a temperatura foi diminuída lentamente até temperatura ambiente numa atmosfera de oxigênio.

O tratamento produziu amostras de boa qualidade com temperaturas críticas próxima de 89 K (veja Figura 5. 1) que é ligeiramente inferior à T_C de uma amostra otimamente dopada, e que está entorno de 92 K. Isso nos leva a acreditar que ela está ligeiramente *underdopping*(pouco Oxigênio). Esta amostra será identificada como “amostra de YBaCuO” ao longo deste capítulo.

5.3 Corrente crítica na amostra YBaCuO

A amostra de YBCO foi cortada a partir de uma pastilha com a ajuda de uma serra de diamante no laboratório de preparação de amostras no CBPF. A cerâmica elaborada apresentou uma alta densidade e ofereceu grande resistência mecânica ao corte com a serra. Foram cortadas barras retangulares da amostra com dimensões exatas de $16 \times 3 \times 0,506$ milímetros. A espessura pequena permitiu diminuir a intensidade da corrente de transporte usada no experimento. Quatro contatos elétricos foram depositados sobre a amostra usando tinta prata. Os valores dos contatos elétricos foram aceitáveis ficando entorno de 10Ω para os de corrente e 24Ω para os de tensão.

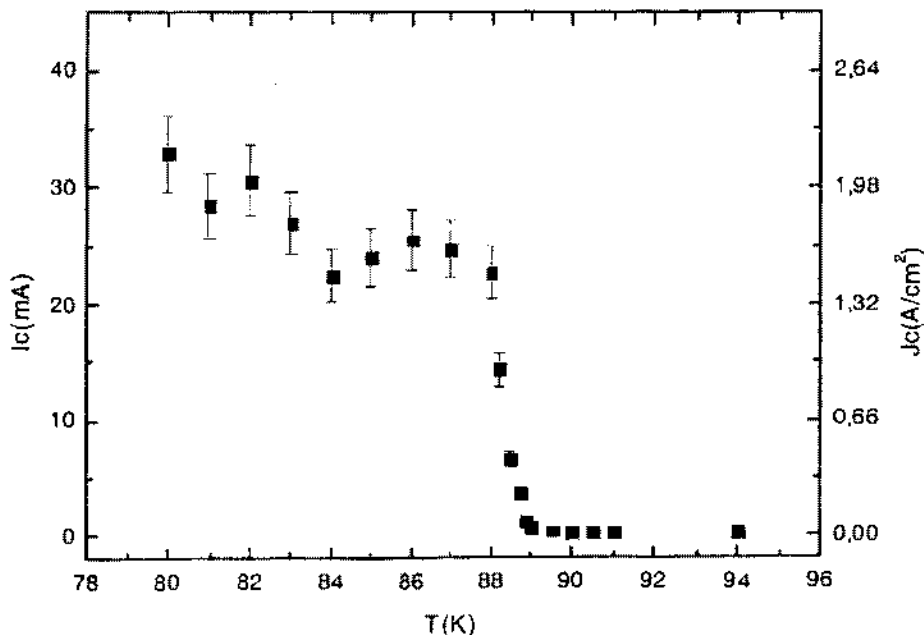


Figura 5. 3 Gráfico da corrente crítica do YBaCuO em função da temperatura

A corrente crítica neste composto foi caracterizada usando um capacitor de 1000 μF na fonte de excitação. Com $V_{\text{DD}} = 2 \text{ V}$ foi possível saturar a amostra ao longo de todo o intervalo de temperatura estudado. Com os parâmetros anteriores determinamos a corrente crítica para diferentes temperaturas. Este resultado experimental é parte essencial da nossa tese, pois o mesmo representa a concretização do nosso sistema de medidas. Os resultados experimentais obtidos aparecem ilustrado no gráfico da **Figura 5.3**.

Usamos uma margem de 10% para o erro relativo^[36] associado com a barra de erro que aparece na Figura 5.3. Isto está de acordo com vários estudos realizados sobre esta problemática em diversos laboratórios de centros de pesquisas do mundo. Experimentalmente foi observada uma queda, abrupta e bem definida, da corrente crítica próxima da temperatura crítica. Conforme a teoria prediz, houve um decréscimo de I_C na medida que nos aproximamos da T_C da amostra, devido às flutuações térmicas na amostra. Foi bem constatado o desaparecimento de I_C quando $T = T_C$.

A não linearidade entre os pontos pode ser relacionada a diversos fatores intrínsecos aos SCs como, por exemplo, o percurso aleatório^[37] realizado pela corrente dentro do SC, a presença de defeitos na amostra, etc. A densidade de corrente e o acoplamento intergranular das amostras policristalinas tem uma relação estudada por diversos autores, veja como um exemplo o trabalho publicado por J.L. Gonzalez^[38] onde estuda-se a dependência da corrente em função do campo magnético. A corrente crítica, assim como outras propriedades de transporte em materiais cerâmicos tem sido estudadas recentemente por nós^[39,40,41,42,43].

Dependendo do caminho aleatório percorrido pela corrente, o acoplamento intergranular de um SC cerâmico pode ser interrompido pelo campo magnético gerado pela própria corrente. Esse campo magnético é chamado de autocampo. O autocampo quebra primeiramente as ligações fracas chamadas de *weak-links*, que são acoplamentos intergranulares de ângulos grandes entre os grãos no interior da amostra. Por ser uma amostra

policristalina ela possui grande quantidade de acoplamentos fracos que podem ser quebrados pela corrente. Este efeito é fortemente influenciado pela temperatura e pelo campo magnético. Isto explicaria a queda abrupta da corrente crítica na medida que nos aproximamos de T_C .

Várias medidas experimentais foram realizadas visando a repetibilidade do sistema. A amostra foi exposta a vários ciclos térmicos, provocando a deterioração dos contatos elétricos da mesma, surgindo um grande deslocamento de tensão na entrada do detector diferencial. Isto nos levou a refazer os contatos e a estudar as curvas $I_C(T)$ em função de diferentes parâmetros experimentais.

Um segundo passo experimental que representa um aperfeiçoamento de nosso trabalho será mostrado no item a seguir.

5.4 Análise dos resultados experimentais.

Com o objetivo de determinar a incerteza experimental na nossa medida, a amostra foi medida novamente com outros contatos elétricos. Os contatos elétricos foram feitos pelo mesmo método usando a tinta à prata. Foram realizadas 10 medidas de corrente crítica a diferentes temperaturas. A cada temperatura foram feitas 50 medidas de I_C que permitiram a construção de histogramas do parâmetro experimental. A Figura 5. 4 ilustra os resultados, onde o ponto experimental representa o valor médio e o tamanho da barra o valor do desvio padrão calculado a diferentes temperaturas

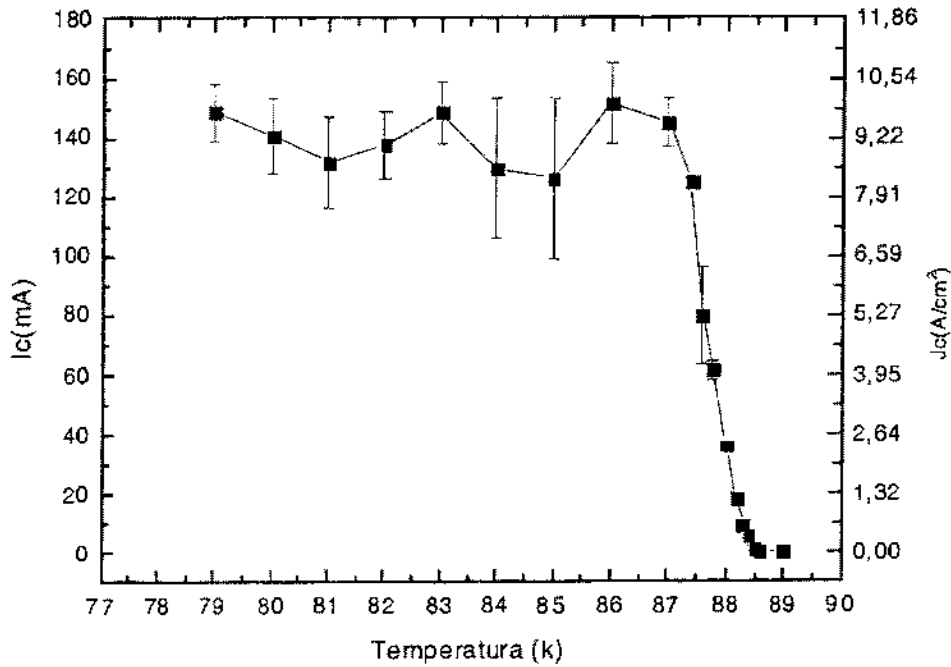


Figura 5. 4 Gráfico da corrente crítica do YBaCuO em função da temperatura com desvio padrão

Conforme explicado, a cada temperatura foram realizadas 50 medidas de corrente crítica com a intenção de obter histogramas deste parâmetro. Todos os histogramas mostraram o mesmo comportamento com uma distribuição gaussiana centrada entorno do valor médio. Dois destes histogramas, obtidos a $T = 84\text{ K}$ e $T = 86,6\text{ K}$, aparecem representados na Figura 5. 5.

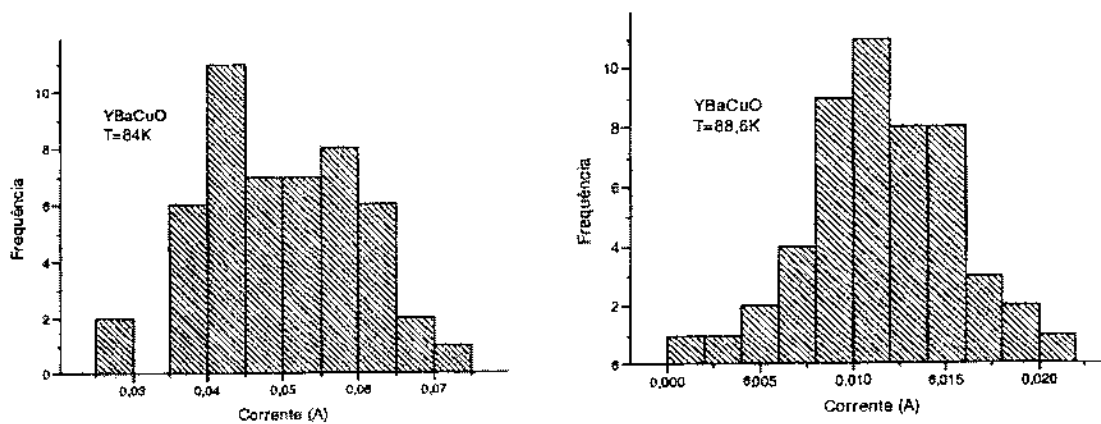


Figura 5. 5 Histograma da corrente no YBaCuO na temperatura de 84K e 88,6K.

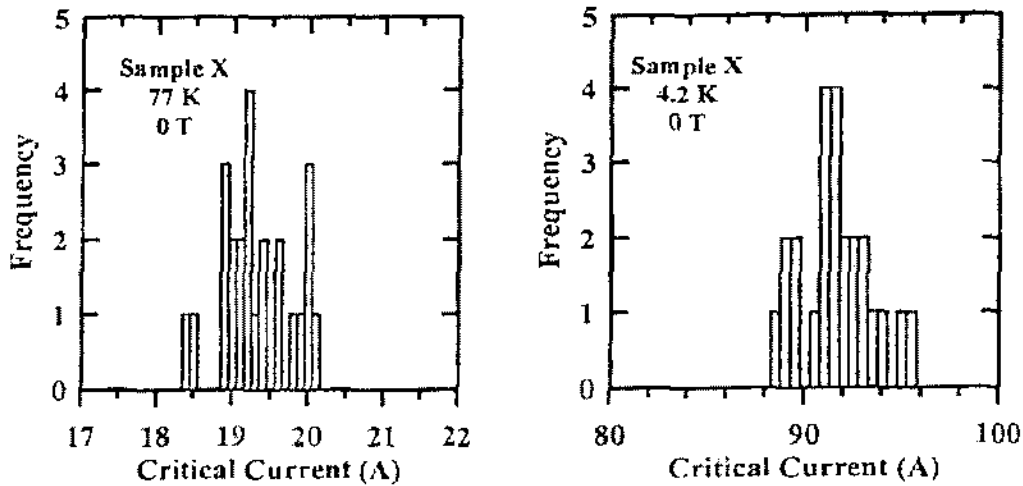


Figura 5. 6 Distribuição de corrente crítica com 24 amostras a $1\mu\text{V}$ realizado no NIST

Como pode ser observado na Figura 5. 5, foi obtida uma clássica distribuição de corrente crítica com desvio padrão de 10 mA e 4 mA para 84 K e 88,6 K respectivamente. Os resultados obtidos nas outras temperaturas mostraram um comportamento similar. Estes resultados são parecidos com os reportados na literatura como, por exemplo, a distribuição reportada por Wiejaczka e colaboradores [44] do *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Mostrados para comparação na Figura 5. 6.

5.5 Influência do critério nos resultados experimentais.

Um ponto interessante a ser destacado é o fato das curvas da Figura 5. 4 e da Figura 5. 3 mostrarem um deslocamento no valor absoluto da corrente crítica para cada temperatura. Para explicarmos este efeito devemos levar em conta o fato das medidas serem realizadas em diferentes condições experimentais. A configuração experimental entre as duas medidas foi alterada por causa da mudança no critério de voltagem usado para determinar I_c .

O dispositivo foi ajustado para disparar o sincronismo a partir de um valor de voltagem nos terminais da amostra. Este critério de voltagem é equivalente a um critério de campo elétrico (E_c)^[61] que é apresentado pela relação $V_c = E_c \times d$, onde d representa a distância entre

os contatos da voltagem na amostra. O fato de variarmos a distância entre contatos ou V_C traduz-se em medir corrente crítica usando um critério microscópico de campo elétrico diferente.

A dissipação da amostra surge devido ao movimento dos vórtices no interior dela. O campo elétrico provocado pela movimentação de um vórtice é dado pela expressão $E = v \times \phi_0$, onde v é a velocidade dos vórtices e ϕ_0 é o quantum de fluxo preso no interior da amostra. A diferença de potencial entre os contatos elétricos de voltagem, gerada por esse campo elétrico é $V = E \times d$ quando $V = V_C$ (ou $E = E_C$) nós definimos esse valor de corrente como a corrente crítica da amostra.

O fato de d e V_C variarem para a determinação de I_C é equivalente a medir em outro nível de E_C ou fisicamente um outro nível de dissipação na amostra. Quanto maior o novo critério microscópico de campo elétrico usado na determinação de I_C , maior será a corrente necessária para atingir esse nível de dissipação (E é proporcional a v do vórtice) e equivalentemente um maior I_C . Na segunda situação experimental variaram d e V_C segundo a Tabela 5. 1. Isto foi responsável pela variação da corrente crítica na amostra. Levando em conta os valores utilizados para ambas as medidas, chegamos a uma variação de 320% no valor do campo elétrico, ou seja, na mesma ordem de grandeza de variação do valor máximo encontrado entre as duas medidas, caracterizando essa diferença como um erro experimental.

| | Figura 5. 3 | Figura 5. 4 |
|------------------------------|--------------------|--------------------|
| Tensão de detecção (V_C) | 2 μ V | 4 μ V |
| Distância entre os contatos | 8 mm | 5 mm |
| Campo Elétrico (E_C) | 2,5 μ V/cm | 8,0 μ V/cm |

Tabela 5. 1 Valores usados para determinação de I_C

Cabe destacar também que vários artigos publicados na área usam como critério à resistividade ou o campo elétrico. O modo mais usado de comparação e reportado em muitos

trabalhos experimentais é o do campo elétrico utilizando $10\mu\text{ V/cm}$ como um bom valor [45] de precisão, nosso detector trabalhou com $2,5\mu\text{ V/cm}$ e $8,0\mu\text{ V/cm}$ que estão abaixo dos utilizados em outros sistemas de detecção, credenciando-o como um sistema de boa precisão. A diferença entre as duas medidas mostrou o cuidado necessário na preparação dos contatos elétricos, no ajuste do off-set de tensão no módulo detector diferencial e no detector de nível. Dependendo dos valores dos parâmetros utilizados neste critério podemos obter duas medidas com valores totalmente diferentes.

5.6 Medida de corrente crítica com um sistema DC de excitação

Foi determinada a corrente crítica da amostra de YBaCuO com um sistema DC. A amostra tem as dimensões de $16,50 \times 2,85 \times 0,46\text{ mm}^3$, medidos com um paquímetro. Esta caracterização foi realizada para a comparação dos dados com um sistema diferente de medição.

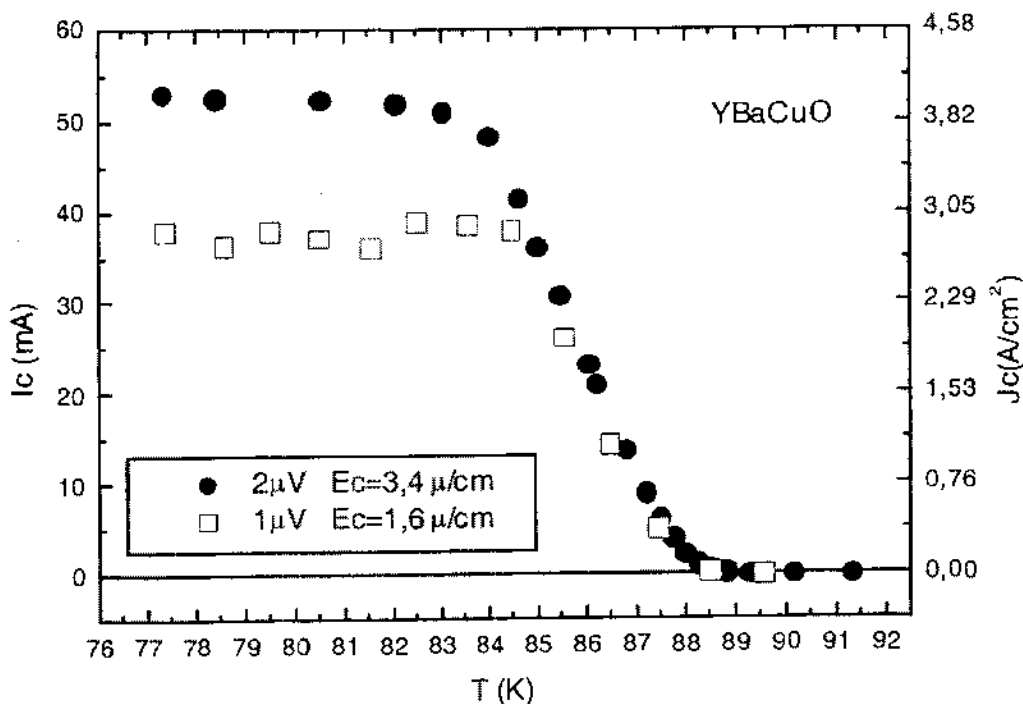


Figura 5. 7 Dados medidos com o sistema DC usando dois níveis de critério de detecção.

Foram feitas medidas usando dois níveis de critérios para o campo elétrico, como mostra a Figura 5. 7, o eixo y a esquerda deste gráfico apresenta os valores em corrente crítica (I_C) e o eixo y a direita apresenta sua escala em densidade de corrente (J_C). Observamos que essas curvas medidas com o sistema DC tiveram seus valores na mesma ordem de grandeza dos valores da curva apresentada na Figura 5. 3 que usou o critério de $2,5\mu\text{V}/\text{cm}$.

Notamos também que o valor máximo da corrente crítica depende fortemente do critério da detecção escolhido. Dobrando-se o valor deste critério de $1\mu\text{V}/\text{cm}$ para $2\mu\text{V}/\text{cm}$ houve um incremento aproximado de 40% no valor da I_C .

De uma forma geral o nosso sistema de medida desenvolvido apresentou valores muito próximos do sistema de corrente crítica DC, normalmente utilizado no laboratório. A grande desvantagem do sistema DC é o tempo de medida, pois foi necessário um dia para a obtenção de cada curva de I_C adquirida, no sistema de excitação exponencial desenvolvido foi usado apenas um período do dia para a medirmos a curva inteira.

5.7 Dependência de I_C com a velocidade de excitação

Abordamos em capítulos anteriores a mudança na velocidade de excitação da amostra usando dois capacitores de valores diferentes. Quanto maior a capacitância menor a taxa de subida da corrente na fonte. Isso é provocado pela quantidade de carga contida no capacitor. Podemos dizer que a amplitude de excitação é inversamente proporcional à carga contida no capacitor. Com um osciloscópio digital realizamos várias medidas da tensão na saída da fonte de excitação com diversos valores de capacitores, os gráficos da variação da tensão em função do tempo é ilustrado na Figura 5. 8. Utilizamos neste teste a amostra de YBaCuO com temperatura estabilizada em 85 K.

A importância da variação da taxa de subida da tensão na fonte é minimizar a dissipação térmica nos contatos elétricos da amostra, influenciando muito pouco na estabilização da temperatura na amostra. Para uma medida confiável precisamos determinar o $I_c(T)$ com um bom controle de temperatura. Este fato foi um componente muito importante no desenvolvimento desse sistema.

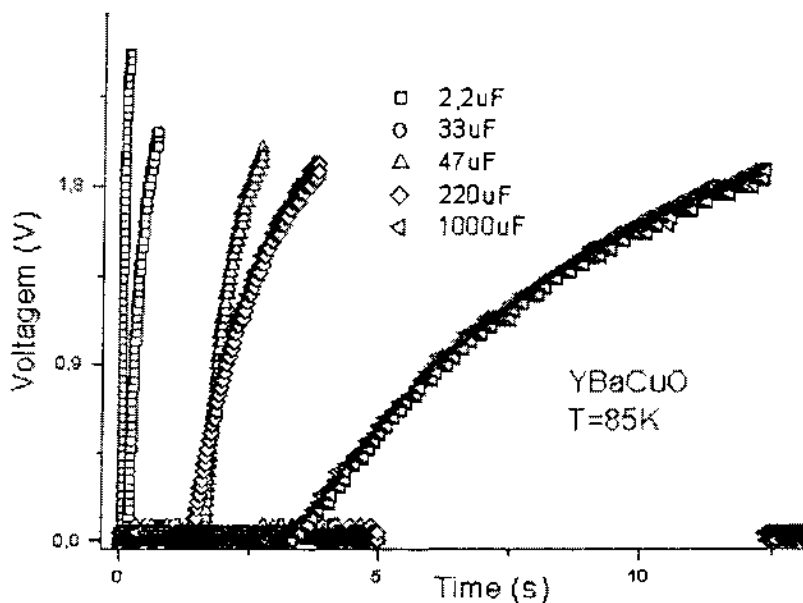


Figura 5. 8 Gráfico da tensão para diferentes capacitores.

A amplitude máxima de tensão alcançada pela amostra para cada capacitor aumentou com o aumento da velocidade da taxa de excitação, ou seja, com a diminuição da capacitância. Isso evidencia a dependência da corrente crítica com a taxa de subida da corrente. Esse comportamento da voltagem - ilustrado na Figura 5. 8 - é um fenômeno relativamente novo que começa a ser detectado em trabalhos recentes. Cabe destacar que numa pesquisa realizada na literatura existente só foram encontradas duas publicações que fazem alusão a este fenômeno e reportam comportamento absolutamente diferente em relação à dependência de I_c com a taxa de subida da corrente.

Inicialmente Ding^[46] e colaboradores observaram que a corrente crítica de fitas de bismuto-2223 aumenta quando a taxa de subida da corrente diminui. Eles não deram uma

explicação a este fenômeno e seus resultados foram encontrados para valores de I_C extremamente altos, da ordem de 20 Amperes. Por outro lado, Xiao^[47] e colaboradores mostraram um resultado interessante no qual a corrente crítica de monocristais supercondutores de $NbSe_2$ esfriados em condições de "field-cooling" (FC) aumenta quando a taxa de subida da corrente de transporte também aumenta. Este resultado é totalmente diferente do anterior.

Os autores deram uma explicação na qual este efeito é uma consequência da reorganização do sistema de vórtices no interior do supercondutor com a ajuda da corrente de transporte. A amostra esfriada abaixo de T_C em presença do campo magnético apresenta os vórtices presos numa configuração de equilíbrio metaestável. A presença de uma corrente de transporte os reorganiza numa posição de equilíbrio estável diminuindo sua corrente crítica.

O interessante foi encontrar a corrente crítica em amostras policristalinas dependente também da taxa de subida da corrente de transporte. A novidade nesse caso foi ter encontrado este fenômeno para amostras policristalinas onde é bem conhecido que a corrente crítica de transporte está limitada pelas fronteiras de grãos onde sua passagem se dá por meio do efeito Josephson (ver capítulo 2). Isto representa algo novo, nunca antes detectado experimentalmente e, atualmente, estamos trabalhando num modelo teórico que possa explicar os resultados experimentais.

A conclusão final importante é que I_C pode ser influenciada pelas condições experimentais nas quais é realizada a sua determinação. Isto abre uma interrogação interessante com relação ao verdadeiro valor da corrente crítica e a sua comparação em amostras obtidas em diferentes laboratórios do mundo. Também representa um ponto interessante a ser levado em conta ao se tentar aplicar tecnologicamente as potencialidades dos materiais supercondutores.

5.8 Corrente Crítica na amostra de Tálío.

O sistema desenvolvido foi testado em outro composto supercondutor pertencente ao sistema Tl-1223. A amostra foi cortada com dimensões de $2,95 \times 1,75 \times 0,5 \text{ mm}^3$. Na figura 3.4 ele é mostrado fixado no porta amostra com contatos elétricos de tinta prata. Conseguimos acoplamento elétrico de $43,2 \Omega$ para os contatos da corrente e de $98,9 \Omega$ para os da tensão. Eles foram feitos com a ajuda de uma lupa Olimpucus 50x para melhor visualização.

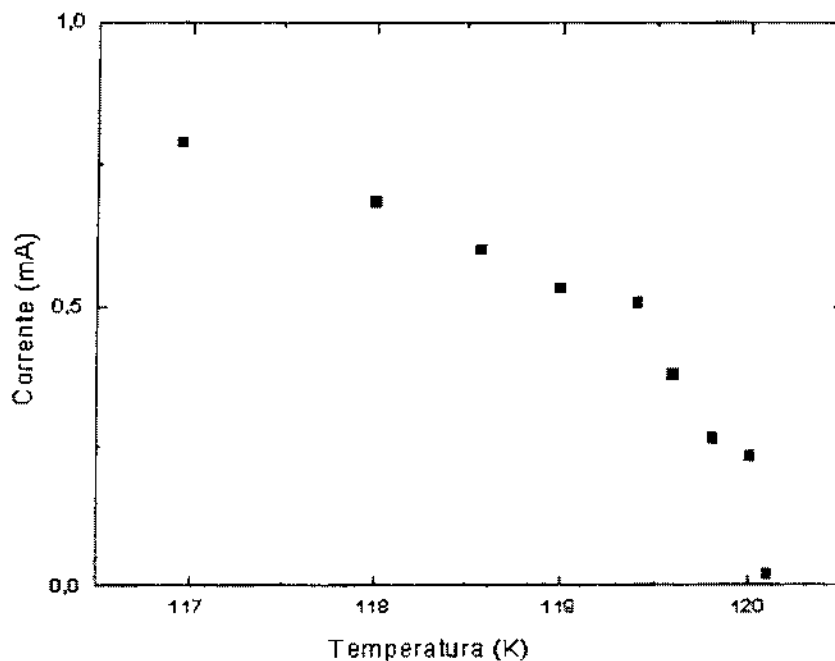


Figura 5.9 Gráfico da corrente crítica do SC a base de Tálío

Os resultados experimentais, assim obtidos, indicam que os valores de corrente crítica foram extremamente pequenos. Isto é uma consequência de vários fatores: 1) os compostos à base de tálío em geral apresentam correntes críticas pequenas. As flutuações térmicas e os baixos valores da energia de ancoramento dos vórtices contribuem fisicamente para este efeito; 2) a amostra é cerâmica, logo os valores de J_{C1} são limitados pelas regiões intergranulares que contribuem com um valor baixo de J_{C1} ; 3) esta amostra pode apresentar uma deterioração temporal nas suas propriedades físicas devido aos extensos ciclos térmicos sofridos ao longo do grande número de experimentos que foram realizados sobre ela. A curva

da corrente crítica versus temperatura, $I_C(T)$, é ilustrada na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

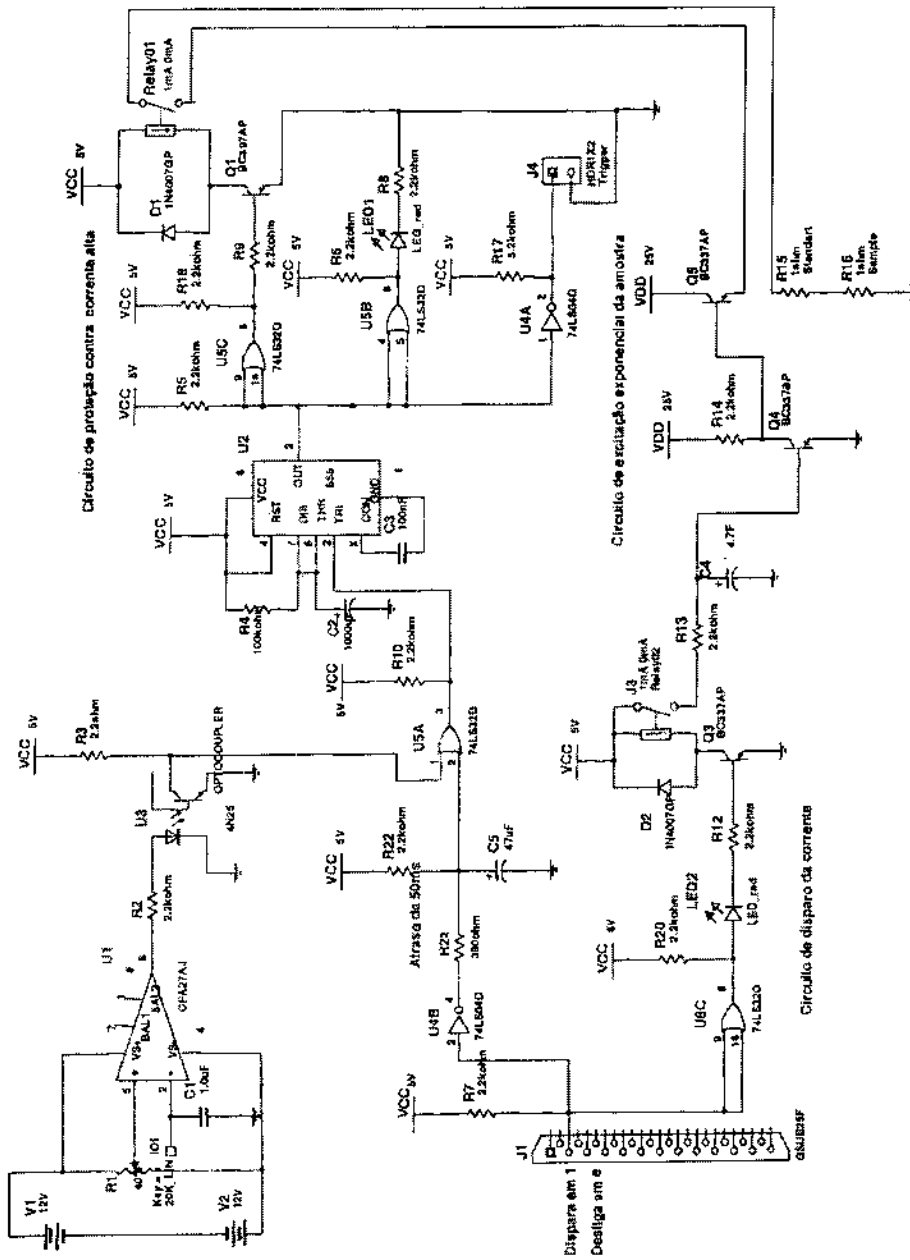
Podemos observar claramente uma diminuição da intensidade da corrente crítica com a temperatura. Perto da temperatura crítica ($T_c = 120,29$ K) a queda é abrupta devido aos efeitos das flutuações térmicas na amostra. Esta amostra possui I_C de valor baixo facilitando nossa medida. Usando V_{DD} a 200mV a amostra saturou possibilitando a determinação da corrente crítica. Nosso sistema mostrou-se flexível na determinação de alto a baixo I_C , variando-se apenas a tensão máxima de excitação (V_{DD}).

Houve boa estabilidade de temperatura na ordem de $\pm 0,01$ K constatado com o controlador de temperatura LakeShore 330. Ao longo do experimento, não notamos variações de temperatura causadas pela dissipação térmica dos contatos, mesmo a temperaturas mais baixas como, por exemplo, a 79 K. A aquisição dos dados não apresentou nenhuma dificuldade experimental.

Conclusão

1. Automatizamos um sistema experimental de baixo custo para a caracterização rápida da densidade de corrente crítica em supercondutores de alta temperatura crítica. O sistema permite a obtenção rápida de I_c assim como sua dependência com a temperatura.
2. Foi desenvolvido um sistema de excitação da amostra que permitiu um aumento exponencial na corrente de transporte. Esta fonte de excitação analógica permitiu controlar a taxa de subida da corrente na amostra evitando o auto-aquecimento nos contatos elétricos da amostra.
3. O sistema de detecção e amplificação de sinais foi ajustado para prover uma resposta rápida após a detecção de sinais com valores da ordem de centenas de nanovolts. Este sistema também permite a correção dos erros de off-set provocado pelos fracos acoplamentos dos contatos elétricos de tensão na amostra.
4. Observamos também uma dependência da corrente crítica com a velocidade de subida da corrente na amostra. Este fato começa a ser reportado em outros laboratórios do mundo e abre interessantes questões sobre a caracterização de I_c .
5. O sistema foi testado verificando-se sua eficiência na determinação experimental da corrente crítica em duas amostras supercondutoras de alta temperatura crítica. O tempo usado nas medidas foi reduzido em 50 %, diminuindo os custos e facilitando sua caracterização.

Anexo 1.



Circuitos do comparador de nível, da fonte de excitação, do trigger e da proteção

Bibliografias

-
- [1] H. Kamerlingh Onnes, Leiden Commun., 120b, 122b, 124c (1911).
- [2] W. Meissner e R. Ochsenfeld, Naturwissenschaft 21 (1933) 787
- [3] F. London e H. London, Proc. Royal Society (London) A 141 (1935) 71
- [4] V. I. Ginzburg e L. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 20 (1950) 1064
- [5] A. A. Abrikosov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 35 (1957) 1442. veja também, Sov. Phys. JETP 5 (1957) 1174
- [6] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **108** (1957) 1175.
- [7] B. D. Josephson, Physics Letters 1 (1962) 251
- [8] Ashcroft NW, NATURE 419 (6907): OCT (2002) 569
- [9] C. W. Chu, J. Bechtold, L. Gao, P. H. Hor, Z. J. Huang, R. L. Meng, Y. Y. Sun, Y. Q. Wang, and Y. Y. Xue, Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 941.
- [10] Hawsey RA, Peterson DE, SCIENCE 296 (5568): APR 26 (2002) 655-655
- [11] U. Essmann e H. Trauble, Physics Letters 24A (1967) 526
- [12] G. Blatter, MV Feigelman, VB Geshkenbein, AI Larkin, VM Vinokur, REV MOD PHYS 66 (4) (1994) 1125-1388
- [13] Rose-Innes, A.C., Rhoderick, E.H, Superconductivity, Editora Pergamon Press Inc., Oxford, 1994
- [14] D. J. Bishop, P. L. Gammel, D. A. Huse e C. A. Murray, Science 255 (1992) 165
- [15] K. A. Muller, M. Takashige e J. G. Bednorz, Physical Review Letters 58 (1987) 1143
- [16] Introduction to Superconductivity e High-Tc materials. M. Cyrot e D. Pavuna. (1992) capítulo 5
- [17] D. K. Lathrop, B. H. Moeckly, S. E. Russek e R. A. Buhrman, Applied Physics Letters 58 (1991) 1095


-
- [18] S. E. Russek, D. K. Lathrop, B. H. Moeckly, R. A. Buhrman e D. H. Shin, *Applied Physics Letters* 57 (1990) 1155
- [19] M. Kawasaki, E. Sarnelli, P. Chaudhari, A. Gupta, A. Kussmaul e J. Lacey, *Applied Physics Letters* 62 (1993) 417
- [20] B. Mayer, S. Schuster, A. Beck, L. Alff e R. Gross, *Applied Physics Letters* 62 (1993) 783
- [21] J. Rhyner e G. Blatter, *Physical Review B* 40 (1989) 829
- [22] M. Prester, E. Babic, M. Stubicar e P. Nozar, *Physical Review B* 49 (1994) 6967
- [23] K. -H. Muller e A. J. Pauza, *Physica C* 161 (1989) 319
- [24] A. Diaz, J. Maza e F. Vidal, *Physical Review B* 55 (1997) 1209
- [25] M. B. Field, D. C. Larbalestier, A. Parikh e K. Salama, *Physica C* 280 (1997) 221
- [26] M. C. Frischherz, F. M. Sauerzopf, H. W. Weber, M. Murakami e G. A. Emel'chenko, *Superconductor Science and Technology* 8 (1995) 485
- [27] J.W. Ekin *Appl. Phys. Lett* 55, 905 (1989)
- [28] Jeffrey R. Riskin, *Analog Devices Application Note AN-244*
- [29] *Linear Products Burr-Brown IC Data Book OPA27 2.8 1996/1997*
- [30] R. Boylestad, L. Nashelsky, *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, Prentice/Hall do Brasil, Capítulo 13.
- [31] *Texas Instruments IC Data Book OPA07 SLOS099D revised 2002*
- [32] *National Application Specific Analog Products Databook*, National Semiconductor, Section 4 Special Functions 4-208 (1995)
- [33] R. Boylestad, L. Nashelsky, *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, Prentice/Hall do Brasil, Capítulo 6.
- [34] R. Boylestad, L. Nashelsky, *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, Prentice/Hall do Brasil, Capítulo 7.

-
- [35] H.T. Peng, Q.Y. Peng, X.Y. Lung, S.H. Zhou, Z.W. Qi, Y.S. Wu, J.P. Chen, Y. Zhong, B.S. Cui, J.R. Fang, G.H. Cao, *Superconductor Science and Technology* 6 (1993) 7901
- [36] L.F. Goodrich, J.A. Wiejaczka, A.N. Srivastava, T.C. Stauffer, and L.T. Medina, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 5 (1995) 552.
- [37] L.F. Goodrich, John Moreland and A. Roshko, *IEEE Transactions On Magnetics* 27 (1991) 1194
- [38] J.L. González, E.V.L. Mello, M.T.D. Orlando, **E.S. Yugue**, E. Baggio-Saitovitch, *Physica C* 364-365 (2001) 347
- [39] J.L. González, M.T.D. Orlando, **E.S. Yugue**, E.V.L. Mello, and E. Baggio-Saitovitch, *Physica C* 341-348 (2000) 485.
- [40] J.L. González, M.T.D. Orlando, **E.S. Yugue**, E.V.L. Mello, and E. Baggio-Saitovitch, *Physical Review B* 63 (2001) 54 516.
- [41] J.L. González, E.V.L. Mello, **E. S. Yugue**, E. Baggio-Saitovitch, and M. T. D. Orlando, *Physica C*, vol 384/1-2 pp 102 110.
- [42] J.L. González, M.T.D. Orlando, E.V.L. Mello, **E.S. Yugue**, and E. Baggio-Saitovitch, *Solid State Communications* 123 (2002) 405-409.
- [43] R.B. Guimarães, M. Mir, M.A. Continentino, J.C. Fernandes, M.B. Fontes, **E.S. Yugue**, E. Baggio-Saitovitch, A.M. Moreira, N.L. Speziali, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 226-230 (2001) 1983-1984.
- [44] J.A. Wiejaczka and L.F. Goodrich, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 102 (1997) 29
- [45] J.W. Ekin, *Appl. Phys. Lett*, 55 (1989) 905
- [46] S.Y. Ding, C. Ren, X.X. Yao, Y. Sun and H. Zhang, *Cryogenics* 38 (1998) 809
- [47] Z.L. Xiao and E.Y. Andrei, *Physical Review Letters*, 86 (2001) 2431

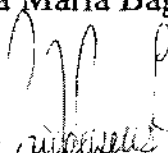
**“SISTEMA ELETRÔNICO DE EXCITAÇÃO E
DETECÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE
CRÍTICA POR TRANSPORTE EM
SUPERCONDUTORES”**

Eduardo Shigueo Yugue

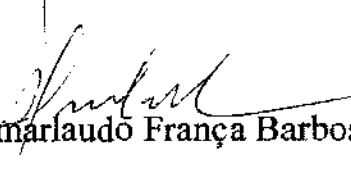
Tese de Mestrado Profissionalizante -
Instrumentação Científica apresentada no
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas do
Ministério da Ciência e Tecnologia fazendo
parte da banca examinadora os seguintes
professores:



Elisa Maria Baggio Saitovitch - Presidente



Paulo Pureur Neto



Ademarlaudo França Barbosa

Rio de Janeiro, 18 de fevereiro de 2003