

7 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA O SQUID

7.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os aparatos experimentais que foram necessários para realizar a pesquisa com SQUID de baixa temperatura crítica.

Serão apresentados também os vários testes preliminares que foram feitos nos dois tipos de SQUIDs (“SQUID1” e “SQUID_i”) para levantar algumas características como sensibilidade, ruído, calibração. Para isto foram usados muitas vezes os recursos disponíveis no dispositivo eletrônico, controlador do SQUID. Este dispositivo é normalmente conhecido como “Eletrônica do SQUID”.

7.2. Container de hélio líquido

Nosso SQUID é de nióbio, logo, de baixa temperatura crítica (T_c) (9,0 K) e necessita estar imerso em hélio líquido para funcionar. Isto é resolvido ao inserir o SQUID dentro de um *container* CRYOFAB[®] modelo CMSH60 [42] contendo hélio líquido. Ele pode conter até 60 litros de hélio líquido, mas o usamos com um máximo de 50 litros. Na parte superior, ele tem uma abertura circular por onde é baixada a ponteira com o SQUID.



Figura 19: Foto do container CRYOFAB[®] CSMH60 usado na pesquisa.

Os laboratórios de Física Aplicada do Departamento de Física da PUC-Rio dispõem de uma rede de recuperação de hélio. Desta forma, o hélio que vai evaporando do container seque uma rede de tubulações até um balão, que o armazena temporariamente. Posteriormente, ele é bombeado para cilindros onde fica armazenado a alta pressão. Destes cilindros o gás pode ser posteriormente liquefeito voltando a ser hélio líquido. Esta liquefação normalmente é feita no Laboratório de Baixas Temperaturas do Instituto de Física da UFRJ. Em todo este processo existe uma perda média de 25% de hélio.

7.3. Preparação da ponteira

A ponteira foi preparada especialmente para esta pesquisa e é composta de, basicamente, dois tubos coaxiais de aço inoxidável, o externo tem um diâmetro de, aproximadamente, 13 mm e o interno de 4 mm, medidos externamente. O tubo coaxial funciona como uma linha de

RF entre a parte superior da ponteira, onde é conectado à eletrônica de controle do SQUID, e o circuito tanque LC na parte inferior da ponteira.

Na Figura 20 a seguir são mostrados os detalhes da ponteira.

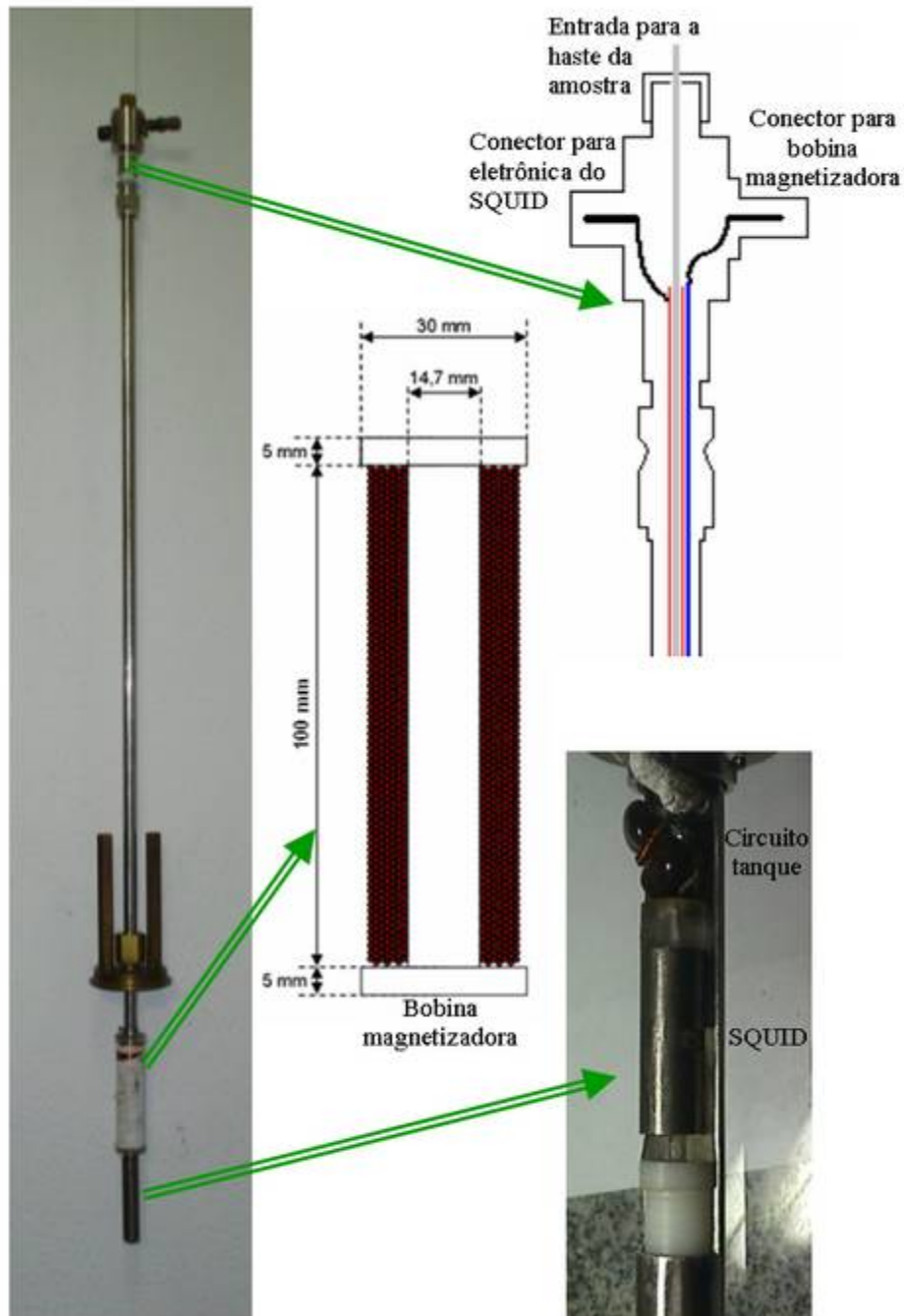


Figura 20: Foto da ponteira; desenho em corte da parte superior; da bobina de magnetização e foto da parte interna da cavidade do SQUID mostrando também o circuito tanque.

Na parte superior da ponteira (Figura 20 à esquerda) existem dois conectores e uma entrada para a haste da amostra (representada em cinza no esquema na parte superior direita da figura).

No conector da eletrônica do SQUID é encaixada diretamente a cabeça pré-amplificadora do controle do SQUID (Figura 21).



Figura 21: Cabeça pré-amplificadora de RF.

Esta cabeça tem várias funções e a colocação dela junto da ponteira melhora a relação sinal ruído e permite que a eletrônica do SQUID possa ficar distante do criostato. O pino central deste conector está ligado ao tubo de aço inoxidável interno (representado em vermelho na Figura 20). Este tubo leva o sinal de RF para o circuito tanque e recebe a resposta do SQUID. Mais abaixo, na ponteira, aparece a bobina de magnetização cujo esquema está no centro da Figura 20. Um fio (representado em azul na figura) desce entre os tubos de aço inoxidável para alimentar esta bobina. O retorno do circuito RF e da alimentação da bobina de magnetização são comuns pelo tubo externo. Na ponta inferior da ponteira está a câmara do SQUID. Ela é envolvida por uma blindagem de nióbio para torná-la mais imune a campos externos. Porém, na foto detalhada na parte inferior direita da Figura 20, esta blindagem foi retirada para mostrar o SQUID e

parte do circuito tanque (o indutor que aparece está em série com a bobina de RF que está dentro do SQUID).

7.4.

Controle do SQUID (“Eletrônica do SQUID”).

Os dispositivos eletrônicos que usamos para controlar o nosso SQUID foi o sistema comercial SHE/BTi® 330x que normalmente é usado para um SQUID comercial. Na Figura 22 é mostrado o painel de controle do dispositivo eletrônico de controle de SQUID.



Figura 22: Controlador do SQUID

Neste caso, a frequência da corrente de rf do gerador ($f_{rf} = \omega_{rf}/2\pi$) tem o valor de 19 MHz. Este sinal é enviado para o circuito tanque.

Na Figura 23 é mostrado o esquema do nosso SQUID de dois furos com o circuito tanque conectado à cabeça de rf do sistema da SHE/BTi®.

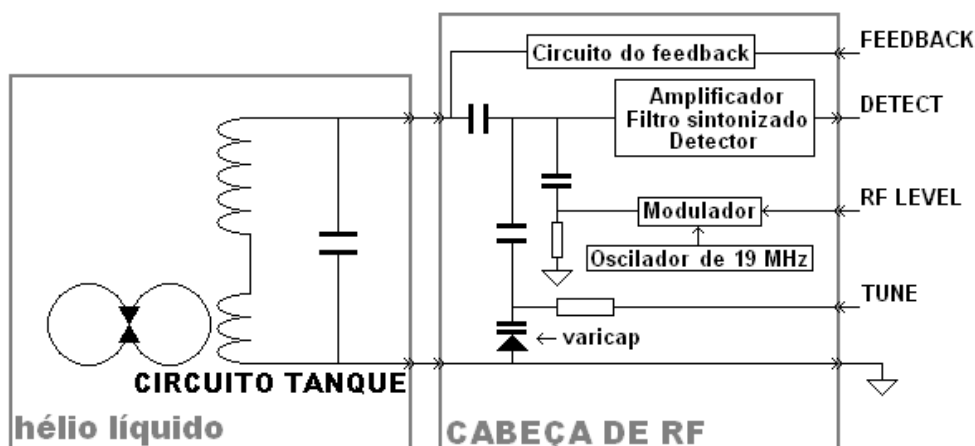


Figura 23: Esquema com SQUID, circuito tanque e cabeça de RF. Os sinais mostrados a direita vão para o controlador do SQUID.

Neste sistema, o gerador de corrente alternada fica localizado na cabeça de RF. A frequência é determinada por um cristal que gera uma portadora senoidal e entra num modulador (no caso, o cristal é de 19 MHz). O modulador serve para alterar a amplitude (0 a 300 μA) desta senoide e esta alteração é controlada por um sinal “RF LEVEL” enviado pela controladora e ajustado pelo botão correspondente no painel do controle (Figura 22). A saída do modulador é, portanto, uma fonte de corrente senoidal. O circuito tanque é projetado para ser ressonante em 19 MHz. Um diodo varicap em paralelo com o circuito tanque faz o ajuste fino deste ponto de ressonância. O valor da capacitância em um diodo varicap é controlado por tensão proveniente do botão “TUNE” (Figura 22) e seu valor varia de 1 a 15 V.

Nos ajustes preliminares estes dois controles são usados para colocar o circuito tanque em ressonância e a amplitude da corrente no ponto de operação na primeira metade do platô na Figura 6.

Com o controlador do SQUID no modo de operação denominado “SET1” um sinal aproximadamente senoidal de frequência 200 Hz e amplitude pico a pico de aproximadamente 10 μA é aplicado pela linha denominada “Feedback”. Este sinal simula um fluxo aplicado no SQUID chamado de Φ_{dc} , pois se soma à senoide de 19 MHz do sinal rf. Nos nossos SQUIDs, isto significa varrer uma faixa de aproximadamente $4 \Phi_0$ dentro do SQUID. Se o sistema está ajustado para o ponto de operação indicado no item 5.4, este sinal de 200 Hz fará aparecer na saída da eletrônica um sinal como, por exemplo, o mostrado na Figura 24.

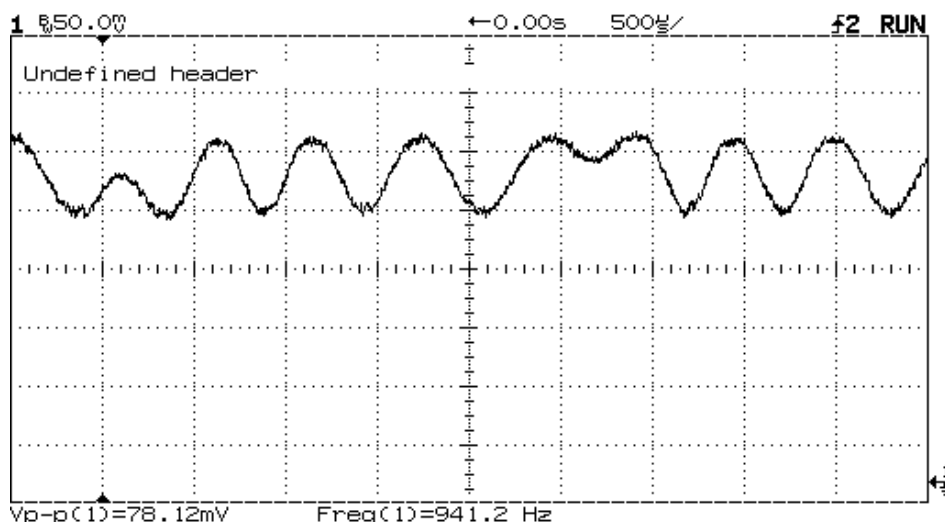


Figura 24: Exemplo dos “Triângulos”

Depois de obtidos os triângulos e ainda durante o procedimento de ajuste inicial, o controlador é colocado no modo “SET2”. Neste ponto é ajustado o controle “MOD” (um ‘trimpot’ ajustável com uma chave de fenda) que muda a amplitude de um sinal de modulação que, no sistema SHE/BTi® é uma onda quadrada de 50 kHz e deve ficar com uma amplitude pico a pico suficiente para alterar o fluxo dentro do SQUID em meio Φ_0 .

O modo final de operação é selecionado ao se apertar, no painel do controle (Figura 22), uma das três teclas “SLOW”, “MED” e “FAST” que correspondem às velocidades de realimentação do circuito. Neste modo a realimentação é fechada.

Neste modo, além do sinal de rf de 19 MHz, é injetado no SQUID, também pela linha de realimentação (“Feedback”), o sinal de modulação de 50 kHz descrito acima. O sinal rf fica “montado” nesta onda quadrada, ou seja, os platôs da modulação servem de nível DC para o sinal de rf. Deste modo, sem ainda a presença de fluxo aplicado, este nível salta entre os centros de dois braços consecutivos dos triângulos (um ascendente e o outro descendente). Estes dois braços dos triângulos servem de função de transferência (Figura 25). Se Φ_{dc} aumentar, o V_{rf} da parte “montada” no platô positivo do sinal de modulação aumenta e o do platô negativo diminui, aumentando assim a amplitude de um sinal da saída.

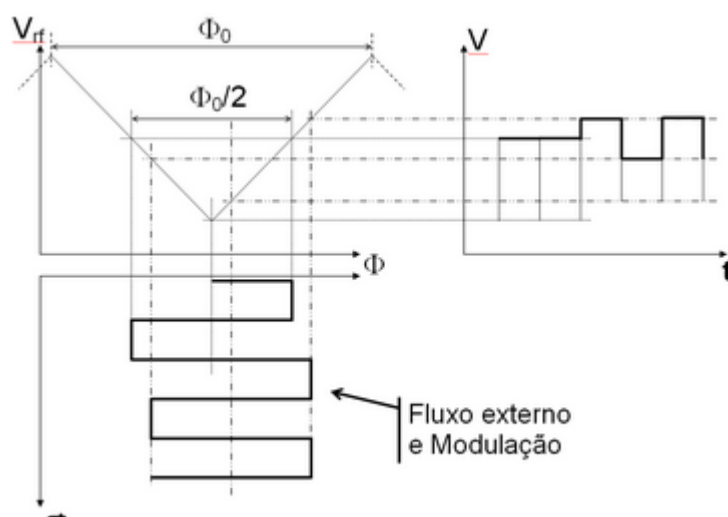


Figura 25: Comportamento do sinal de modulação no circuito.

O circuito eletrônico do controlador, primeiramente extrai a envoltória do sinal rf. O resultado é um sinal com a mesma frequência do modulador (50 kHz). Deste sinal é extraída a amplitude (diferença entre os níveis causados pelos platôs positivos e negativos). Esta amplitude será proporcional ao incremento do fluxo a ser medido. Para aumentar o intervalo de valores do fluxo externo aplicado a ser medido, este aumento é acumulado num integrador e a saída deste integrador é levada para o circuito tanque de forma a gerar um fluxo contrário ao aplicado (realimentação negativa). Assim, a soma fluxo externo aplicado com o fluxo devido à realimentação vai a zero. Neste momento a entrada do integrador volta a ser zero e a saída fica estável. Qualquer nova mudança no fluxo externo aplicado faz este processo recomeçar. Com isto temos uma alta sensibilidade com melhor intervalo.

Por fim a eletrônica do SQUID pode trabalhar em três alternativas de sensibilidade. Na sensibilidade $\times 1$ o ponteiro do mostrador chega ao fundo de escala quando a variação do fluxo externo aplicado é o suficiente para gerar uma mudança de corrente de $50 \mu\text{A}$ no circuito tanque se a realimentação estiver aberta. Para a sensibilidade de $\times 10$ e $\times 100$, esta corrente fica em $5 \mu\text{A}$ e $0,5 \mu\text{A}$ respectivamente. O que cada um destes valores representa em fluxo vai depender das características de cada SQUID, da bobina de rf e dos ajuste descritos a seguir.

7.5. Preparação do SQUID

A geometria do nosso SQUID de dois furos foi mostrada no item 6.2 e 6.3. Aqui será mostrado o procedimento da preparação: ajuste da junção à temperatura ambiente, ajuste dos triângulos e levantamento da calibração (tensão de saída por Φ_0).

7.5.1. Preparação da junção Josephson

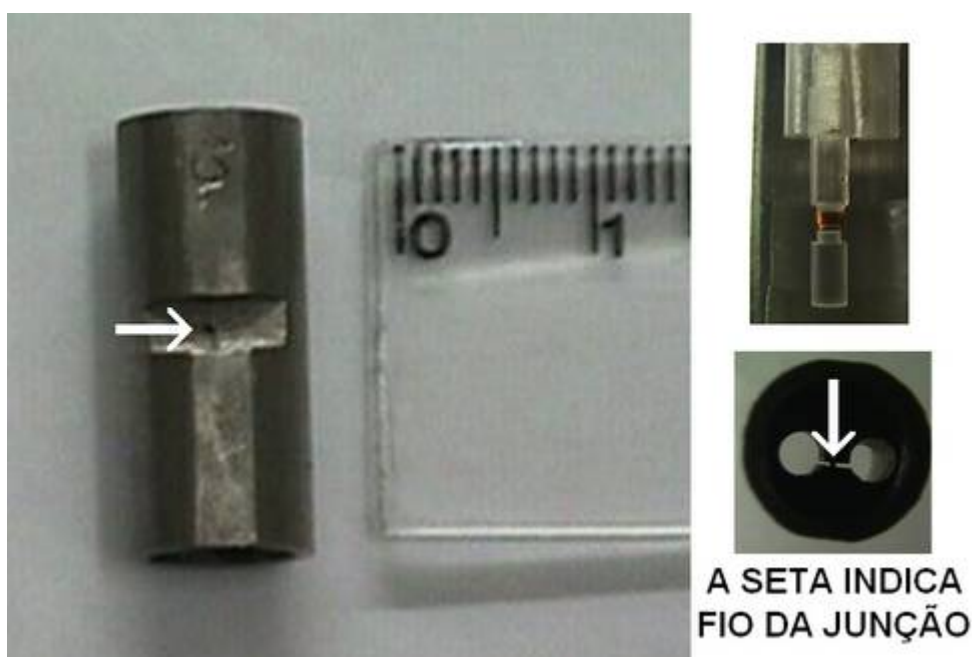


Figura 26: Fotos do SQUID mostrando a junção e o suporte da bobina de rf.

A junção Josephson para o nosso tipo de SQUID é feita com dois fios de nióbio. Este tipo de junção é descrito inicialmente no artigo da referência [9]. Em uma das extremidades de um dos fios é feita uma ponta bem suave e fora do centro e no outro, as duas extremidades são deixadas planas. Eles são entortados em dois pontos (ver Figura 27) para que fiquem firmes na parede dos furos feitos para eles no SQUID.

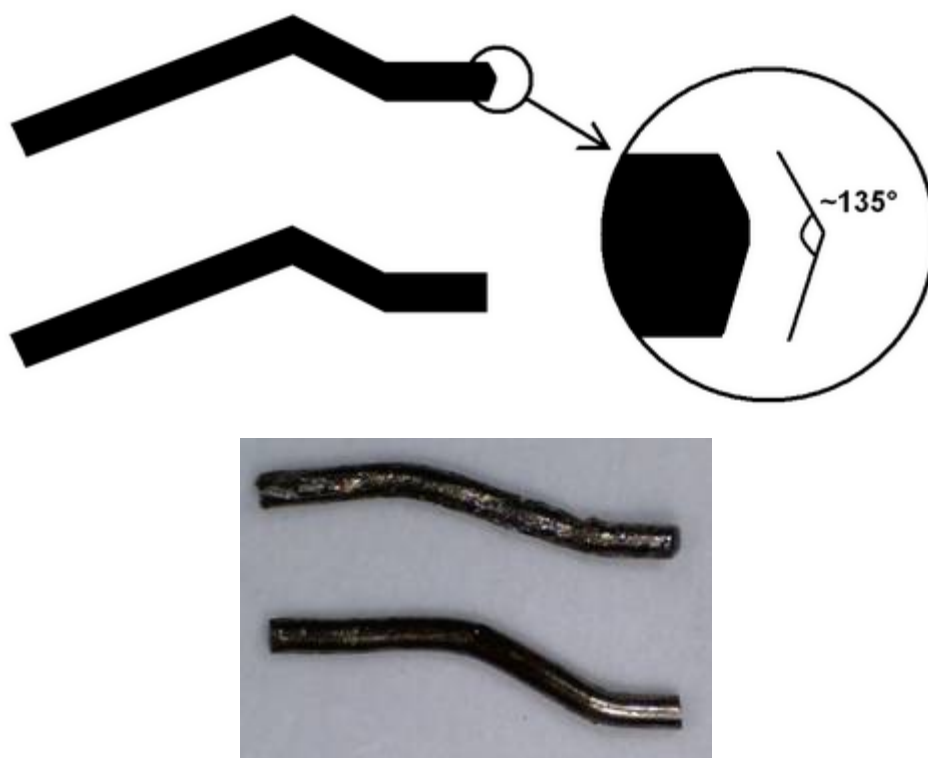


Figura 27: Representação e foto dos fios da junção.

Para facilitar o procedimento de ajuste da junção (ver detalhes abaixo) o fio de duas extremidades planas passa por um processo de oxidação com o seguinte procedimento. Ele fica em uma estufa por um tempo determinado, submetidos a uma temperatura controlada. Estes valores de tempo e temperatura da estufa podem mudar se for desejável aumentar a oxidação, porém com um tempo de 25 min e temperatura de 250 °C foi possível obter o ajuste da junção de forma relativamente fácil. O outro fio, com ponta, não passa pela oxidação. O ângulo da ponta é de aproximadamente 135° e de ponta arredondada fora do centro como mostra a Figura 27. O motivo da ponta ser suave e arredondada é melhorar o curso do ajuste enquanto esta ponta penetra o óxido de nióbio da extremidade plana do outro fio. E o motivo da ponta ser fora do centro é garantir a possibilidade de outra tentativa de ajuste de junção, com os mesmos fios. Neste caso é possível puxar o fio de volta, rodá-lo e recommear o ajuste da ponta que agora se aproximará de uma região na extremidade do outro fio onde o óxido ainda não foi pressionado. O comprimento do fio com as duas extremidades planas deve ser muito próximo ao comprimento do furo no SQUID que vai da lateral não

chanfrada até a parede da fenda interna. O fio com ponta é dimensionado para que a extremidade plana fique com um pedaço para fora na região do chanfrado quando a ponta está na região da fenda.

7.5.2.

Ajuste da junção Josephson

O ajuste da junção é feito na temperatura ambiente usando um dispositivo feito a partir de um bloco de alumínio (Figura 28). Com os dois fios da junção prontos e o de extremidades planas já oxidado, pode-se fazer o ajuste da junção Josephson. Diferenças neste ajuste irão causar, quando o SQUID estiver à temperatura de hélio líquido, mudanças na corrente crítica característica da junção.

Na Figura 28 é mostrado o dispositivo desenvolvido para a realização do ajuste da junção Josephson. Este ajuste, feito à temperatura ambiente, funciona baseado no fato da indutância mútua entre o SQUID e uma bobina inserida em um dos seus furos ser função da eficiência do contato entre os dois fios.



Figura 28: Dispositivo confeccionado para o ajuste da junção Josephson.

Primeiramente o fio de nióbio com as duas extremidades planas é colocado no furo no lado do SQUID que não está chanfrado. Como ele tem um comprimento próximo do comprimento deste furo, a sua extremidade interna coincide com a parede da fenda quando a extremidade externa faceia a parede externa do SQUID. Esta colocação deve ser feita com cuidado para não danificar o depósito de óxido da sua

extremidade no momento que ele entra no furo. Depois o fio com ponta é colocado somente o suficiente para prender no furo.

O SQUID com os fios é colocado no lugar apropriado do dispositivo para o ajuste da junção. Um micrômetro é então ajustado (no ajuste grosso) enquanto a fenda do SQUID é observada num microscópio. Quando a ponta aparece na fenda e fica próxima de encostar na parte plana do outro fio, o ajuste grosso do micrômetro é interrompido.

Neste momento é colocada uma bobina especialmente construída para o ajuste da junção em um dos furos do SQUID. Esta bobina deve ter uma geometria que facilite o maior acoplamento magnético com o SQUID, isto é, deve ter um diâmetro só um pouco inferior ao diâmetro do furo do SQUID e um comprimento igual ou maior que este furo. Um capacitor é colocado em paralelo a esta bobina. Nesta situação (ainda com o ajuste da junção não completado) o capacitor deve ter um valor tal que possibilite um valor de frequência de ressonância próxima de 19 MHz. Desta forma é possível o ajuste para esta frequência pelo Varicap na cabeça do controle do SQUID que fica eletricamente em paralelo com o conjunto capacitor e indutor do dispositivo. O valor do Varicap é ajustado pelo controle “TUNE” na eletrônica do SQUID. O procedimento para o ajuste a partir deste momento é o seguinte:

- Conectar a cabeça do controle do SQUID no dispositivo.
- Conectar a saída “DETECT” da eletrônica do SQUID a um voltímetro.
- Ligar em “SET1” e ajustar o “RFlevel” até obter uma pequena deflexão no ponteiro.
- Ajustar o “TUNE” para maximizar esta deflexão. Este máximo deve acontecer no intervalo do curso do parafuso de ajuste. Se ele acontecer quando o parafuso de ajuste do “TUNE” estiver todo para o sentido horário, devemos aumentar o valor do capacitor e se for no sentido anti-horário, devemos diminuí-lo.
- Ajustar novamente o “RF LEVEL” até que o voltímetro marque 400 mV.
- Deixar nesta situação por uns 20 minutos

- Depois deste tempo, reajustar o “TUNE” e o “RF LEVEL”.
- Aproximar a ponta com o ajuste fino do micrômetro até a tensão marcada no voltímetro diminuir para um valor um pouco menor que o anterior.

O valor apropriado para este decréscimo na tensão depende da geometria do SQUID e das características dos fios de nióbio da junção, isto é, geometria da ponta de um fio e grau de oxidação do outro. No caso do SQUID1 com a ponta descrita na Figura 27 e procedimento de oxidação descrito anteriormente, um valor com decréscimo de 2 % dos 400 mV pré-ajustados, logo o valor de 392 mV é procurado. O teste real da qualidade deste ajuste será feito depois, quando o SQUID for introduzido em hélio líquido.

7.5.3.

Ajustes em He líquido.

Monitorando o DETECT da eletrônica de controle de SQUID com um osciloscópio e em modo SET1, se a junção estiver bem ajustada, com a corrente crítica característica apropriada, irão aparecer os “Triângulos” (ver Figura 24). Os controles TUNE e RFlevel devem ser reajustados para procurar os triângulos. Como vimos antes, o ajuste do TUNE serve para fazer com que o conjunto do circuito tanque entre em ressonância em 19 MHz. De forma semelhante, como foi falado acima sobre o ajuste do “TUNE”, um valor máximo deve ser buscado. Se este maior valor for no fim do sentido horário, significa que é necessário um pouco mais de capacitância e isto pode ser obtido ao colocar externamente um capacitor em paralelo, não é necessário retirar a ponteira. Mas se o maior valor for obtido no fim do sentido anti-horário será necessário retirar a ponteira do hélio líquido para alterar o circuito tanque. Quando o máximo for obtido dentro do intervalo do curso, os triângulos podem ser procurados ajustando o botão RFLEVEL para aumentar a amplitude (I_{rf}) da fonte de corrente alternada de rádio frequência (19 MHz). Como foi explicado no item 5.4, quando esta amplitude atinge o valor da corrente crítica

característica da junção começam a aparecer os triângulos na tela do osciloscópio.

Caso os triângulos não apareçam em hélio líquido mesmo com todo curso do RFLEVEL, deve ser feita uma pequena alteração no ajuste da junção. O procedimento para identificar que tipo de alteração na junção é o seguinte:

- Ir retirando lentamente do hélio líquido enquanto se ajusta o TUNE e RFlevel e observando o sinal. Isto vai esquentando lentamente o SQUID mudando assim as características elétricas da junção.
- Se, durante este procedimento, os triângulos aparecerem então a corrente crítica da junção está muito alta. E a correção seria refazer a junção para um decréscimo menor da tensão.
- Se os triângulos não aparecerem durante este processo é possível que a junção esteja com a corrente crítica baixa e deva ser aumentado o decréscimo da tensão durante o ajuste.
- A ponteira então é retirada e a junção é reajustada.

Um cuidado especial deve ser tomado cada vez que for necessário retirar a ponteira do container. Enquanto o SQUID está no container, ele está envolvido com hélio líquido ou gás. Se ele for retirado para a atmosfera ainda muito frio, o vapor de água presente no ar se condensará e pode molhar a junção mudando suas propriedades. Isto pode invalidar todo procedimento apresentado acima para o ajuste da junção. A solução para isto é levantar a ponteira até o máximo e deixar nesta posição por várias horas (tipicamente 3 h). Uma forma de diminuir este tempo é aquecer a parte externa da ponteira para levar calor para a região do SQUID enquanto ela ainda está em atmosfera de hélio gás. Neste momento é desejável que o container não esteja muito cheio para garantir um gradiente mais suave de temperatura até a parte superior do pescoço.

Existe ainda uma pequena probabilidade de a junção estar tão forte que o aumento de temperatura durante a retirada da ponteira não seja o suficiente para o aparecimento dos triângulos, pois, neste caso, a temperatura crítica do nióbio (~ 9 K) seria alcançada antes da pressão da junção chegar ao valor ideal. Isto pode confundir com o caso de junção fraca, mas é uma situação pouco provável.

Quando não existe nenhuma experiência anterior com um novo SQUID de geometria diferente das anteriores, é necessário fazer um procedimento mais demorado que consiste em começar com uma junção muito fraca (apenas encostando os fios). Procurando os triângulos nesta situação e depois ir aumentando aos poucos a pressão entre os fios (o decréscimo da tensão) até que os triângulos apareçam. Isto significa várias colocações e retiradas da ponteira no container.

Todos estes longos procedimentos poderiam ser eliminados se fosse possível fazer o ajuste da corrente crítica da junção enquanto o SQUID estivesse mergulhado em hélio líquido. Um dispositivo para este fim está sendo estudado para implementação futura.

7.6. Circuito tanque

O circuito tanque usado durante as experiências em hélio líquido tem uma característica diferente do circuito tanque convencional: A parte indutiva é dividida em duas. Uma parte é a bobina de RF que fica dentro do furo do SQUID e outra parte é uma bobina fica em série e serve para completar a indutância do circuito tanque. Este arranjo permite melhor flexibilidade já que, por razões que serão explicadas abaixo, é desejado que o acoplamento entre a bobina de RF e o SQUID seja fraco. E um valor maior da indutância no circuito ressonante aumenta o fator de qualidade.

Como, no nosso caso, $\omega_0/2\pi$ é fixo em 19 MHz, o fator Q depende de L_T e R_{LT} do SQUID acoplado. Ver equação (20).

Ou seja, para aumentar o fator Q é desejável um valor alto do braço indutor do circuito tanque, mas por outro lado a bobina de RF que fica dentro do furo do SQUID precisa ter uma indutância pequena para um menor acoplamento com o SQUID. Este fraco acoplamento determina uma maior variação de corrente da bobina em resposta a uma pequena mudança no fluxo do SQUID.

A Figura 23 mostra o esquema desta configuração.

7.6.1.

Confecção da bobina de RF

No caso do SQUID1 foram feitas várias bobinas com diâmetro e comprimento diferente. Todas as bobinas foram enroladas de tal forma que, quando uma corrente vem pelo tubo central da ponteira, o campo magnético que a bobina gera é para cima (ver Figura 20). O fio que vai ser soldado no tubo central é marcado com um nó. O objetivo era estudar o comportamento de cada parâmetro da geometria destas bobinas para escolher aquela que oferecesse melhor relação sensibilidade/ruído. Foram testadas:

- Bobina de 5 voltas, diâmetro interno 1,1 mm e 1,5 mm;
- Bobina de 6 voltas, diâmetro interno 0,9 mm e 1,5 mm;
- Bobina de 7 voltas, diâmetro interno 0,9 mm e 1,5 mm;
- Bobina de 8 voltas, diâmetro interno 0,9 mm e 1,5 mm;

Estas bobinas de rf foram feitas com o equipamento construído para isto que é mostrado na Figura 11.

Durante os testes somente a bobina de 7 voltas com diâmetro de 1,5 mm se apresentou satisfatória.

Durante as tentativas para sintonizar e fazer funcionar cada SQUID foi necessário mudar várias vezes a segunda bobina do circuito tanque, pois ela precisa estar apropriada para cada bobina de rf a fim de completar a indutância necessária para ser possível sintonizar o circuito tanque.

7.7.

Conversão Volts em Φ_0 (Calibração)

Nesta parte da tese será descrito o procedimento de conversão de volts em Φ_0 . Para ser possível converter os dados de tensão em momento magnético é necessário antes converter em quantidades de quantum de fluxo magnético (Φ_0). Para isto, antes da medição de cada amostra, é levantada a relação $\Delta V/\Phi_0$, pois este valor muda um pouco cada vez que a ponteira é retirada e depois recolocada em He líquido. Para isto foi usada a seguinte técnica. Colocar o controlador do SQUID no modo

“SET1” enquanto um osciloscópio monitora a saída “DETECT” ajustando os controles “TUNE” e “RF-LEVEL” para obter na tela os primeiros triângulos. Isto significa estar na primeira metade da reta entre os pontos B e D do gráfico da Figura 6. Depois disto, colocar o ajuste de “OFFSET” no mínimo, marcar da tela do osciloscópio a posição de um vértice superior e ajustar o “OFFSET” até o próximo vértice inferior chegar na marcação (isto corresponde a meio Φ_0). Depois, colocar o controle de SQUID no modo “MED” e monitorar a saída “OUTPUT” com um voltímetro, registrar o valor de tensão. Voltar o “OFFSET” para o mínimo e registrar a diferença de tensão entre esta situação e a anterior. Esta diferença corresponde a $\Phi_0/2$. Com este procedimento é obtida a relação $\Delta V/\Phi_0$. Com este valor, os dados experimentais podem ser expressos em termos de Φ_0 . A tradução destes dados em Φ_0 para momento magnético é feita através de um modelo [8, 43].

7.8. Sensibilidade do SQUID1

No controlador do SQUID o controle de “OFFSET” é feito por um potenciômetro de precisão de 10 voltas. Seu curso completo significa colocar 2 μA na bobina de RF, logo, como cada traço de sua marcação é uma indicação de “002” e as 10 voltas completas são “1000” que representam 2 μA , temos que cada traço representa 4 nA de corrente na bobina de RF. A leitura dos números indicados no potenciômetro é feita da seguinte forma. As dezenas e unidades estão escritas na roda do potenciômetro (uma volta indica “100”) e as centenas ficam registradas na parte de cima numa pequena janela e é incrementada de um a cada volta (ver Figura 22). Então uma indicação de, por exemplo, “348” significa indicação 48 da terceira volta do botão. Os dados experimentais para medição de sensibilidade do SQUID1 são obtidos com o seguinte procedimento:

- Depois do ajuste inicial dentro de He líquido e da determinação da razão V/Φ_0 , coloca-se o controlador em “MED” (realimentação fechada).

- Coloca-se o “OFFSET” em “000” e mede-se a tensão na saída do controle. Considerar o valor medido como zero (ou zerar o voltímetro neste momento).
- Aumentar o botão “OFFSET” com passo de uma marcação que corresponde a: “000”, “002”, “004”, “006”, “008” etc. Isto corresponde a acréscimos de: 4 nA a cada passo. Registrar os valores de corrente aplicada e tensão na saída.
- Depois refazer o procedimento anterior, mas aumentar o passo para 8 nA.
- Fazer o mesmo pra intervalos 12 nA, 16 nA, 20 nA.
- Fazer a média das variações de tensão de saída para cada intervalo e traçar o gráfico.
- Converter os valores de tensão em Φ_0 usando para isto a razão V/Φ_0 já obtida anteriormente.

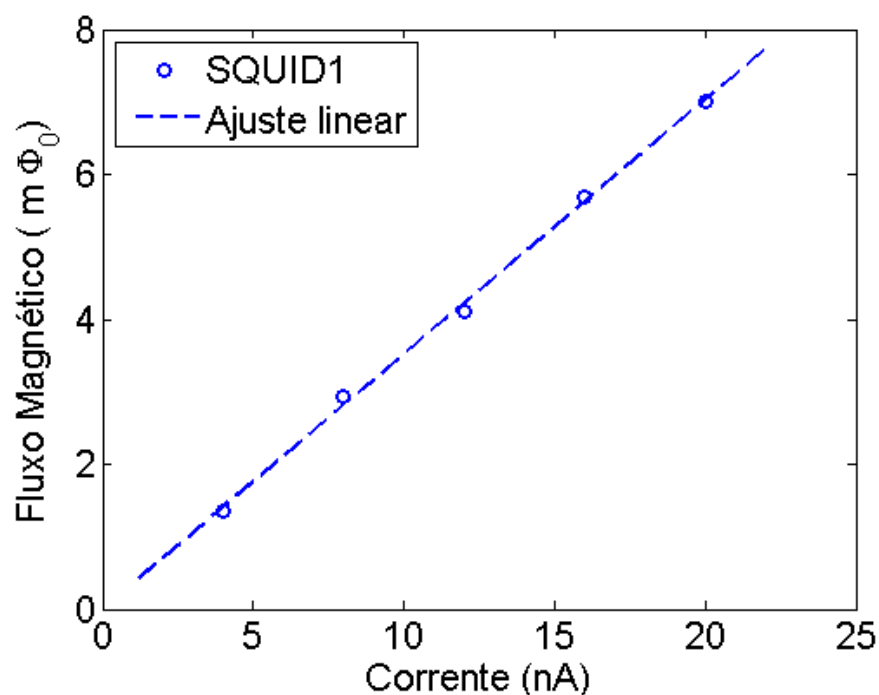


Figura 29: Dados experimentais da sensibilidade do SQUID1. Fluxo em função da corrente aplicada pelo controle “OFFSET”.

Os pontos experimentais do gráfico na Figura 29 são então as variações médias para cada passo na corrente. Fazendo então um ajuste linear dos pontos experimentais chegamos ao valor de $0,35 \text{ m}\Phi_0/\text{nA}$.

Este valor não depende apenas da geometria do SQUID, mas também da geometria da bobina de rf. Ou seja, um mesmo valor de corrente se aplicado em uma bobina que esteja mais acoplada ao SQUID aplicará um fluxo maior nele. O momento equivalente para a bobina de rf usada durante as experiências com o SQUID1 para a corrente de 4 nA fica:

$$\begin{aligned}\mu &= NI\pi a^2 \\ \mu &= 7 \times 4 \times 10^{-9} \times \pi \times (0,785 \times 10^{-3})^2 \\ \mu &= 5,4 \times 10^{-14} \text{ Am}^2\end{aligned}\tag{50}$$

Na tabela abaixo estão os dados experimentais e dos modelos:

Corrente	4 nA	Equações usadas
Momento equivalente	$5,4 \times 10^{-14} \text{ Am}^2$	
Experimental	$1,4 \text{ m}\Phi_0$	
Modelo dipolo pontual	$1,48 \text{ m}\Phi_0$	(44)
Modelo analítico	$1,48 \text{ m}\Phi_0$	(46) a (49)

Tabela 1: Comparação dos resultados experimentais do SQUID1 com os valores dos modelos. Onde o momento equivalente é calculado da corrente e da geometria da bobina de rf (50).

A figura a seguir mostra em escala as dimensões do furo e da bobina de rf usada nos testes de sensibilidade para cada SQUID.

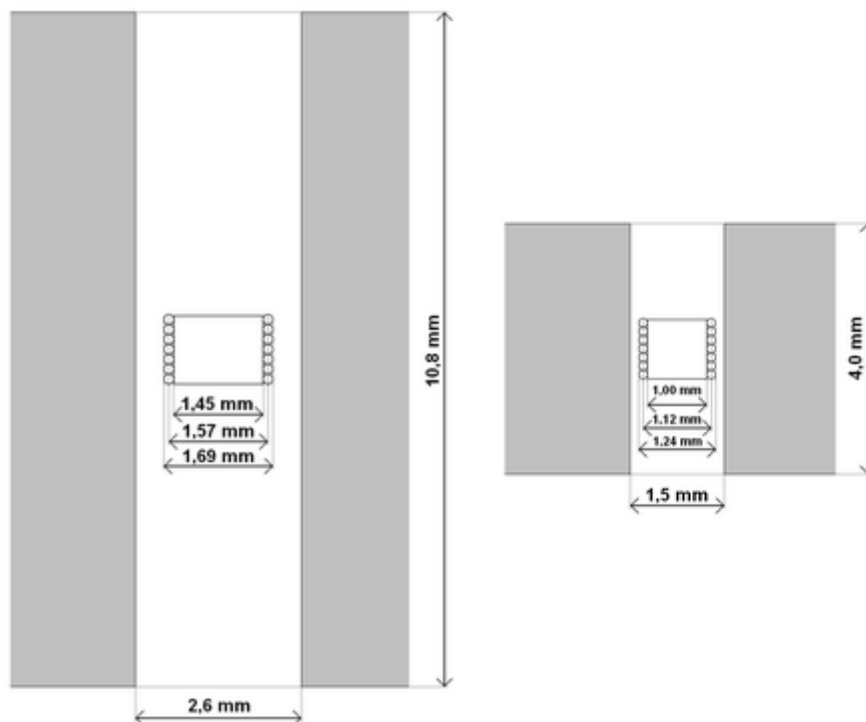


Figura 30: Dimensões da bobina de rf e do furo do SQUID1 (esquerda) e do SQUIDi (direita) na mesma escala para comparação.

7.9. Sensibilidade do SQUIDi

Os dados experimentais para medição de sensibilidade do SQUIDi foram obtidos com um procedimento similar ao anterior.

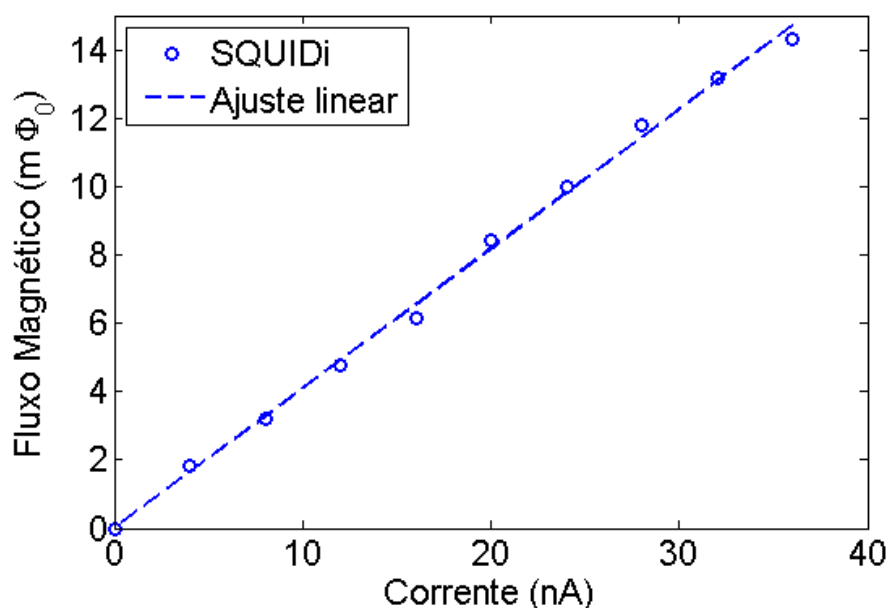


Figura 31: Dados experimentais da sensibilidade do SQUIDi. Fluxo em função da corrente da bobina de rf com as dimensões descritas na Figura 30.

Fazendo o ajuste linear nos pontos experimentais do gráfico na Figura 31 chegamos ao valor de $0,41 \text{ m}\Phi_0/\text{nA}$. Logo, a resposta do SQUIDi em fluxo magnético por corrente aplicada na bobina de rf é maior que a do SQUID1.

No gráfico do SQUIDi, verificamos também que, para o menor valor de corrente que foi aplicado, o fluxo medido no SQUIDi é igual a $1,8 \text{ m}\Phi_0$. Esta menor corrente aplicada é igual a 4 nA e corresponde à resolução do controle de “offset” da eletrônica do SQUID. Assim podemos afirmar com segurança que este sistema pode medir fluxos a partir de $1,8 \text{ m}\Phi_0$.

Corrente	4 nA	Equações usadas
Momento equivalente	$2,8 \times 10^{-14} \text{ Am}^2$	
Experimental	$1,8 \text{ m}\Phi_0$	
Modelo dipolo pontual	$1,96 \text{ m}\Phi_0$	(44)
Modelo analítico	$1,96 \text{ m}\Phi_0$	(46) a (49)
Modelo de elementos finitos	$1,95 \text{ m}\Phi_0$	-

Tabela 2: Comparação dos resultados experimentais do SQUIDi com os valores dos modelos. Para uma corrente de 4 nA na bobina de rf deste SQUID.

7.10. Análise do Ruído

A análise do ruído do nosso sistema foi feita com um analisador de espectro da SRS®, modelo: SR760. Na Figura 32 é mostrado espectro de ruído quando é usado o SQUID1 e o SQUIDi.

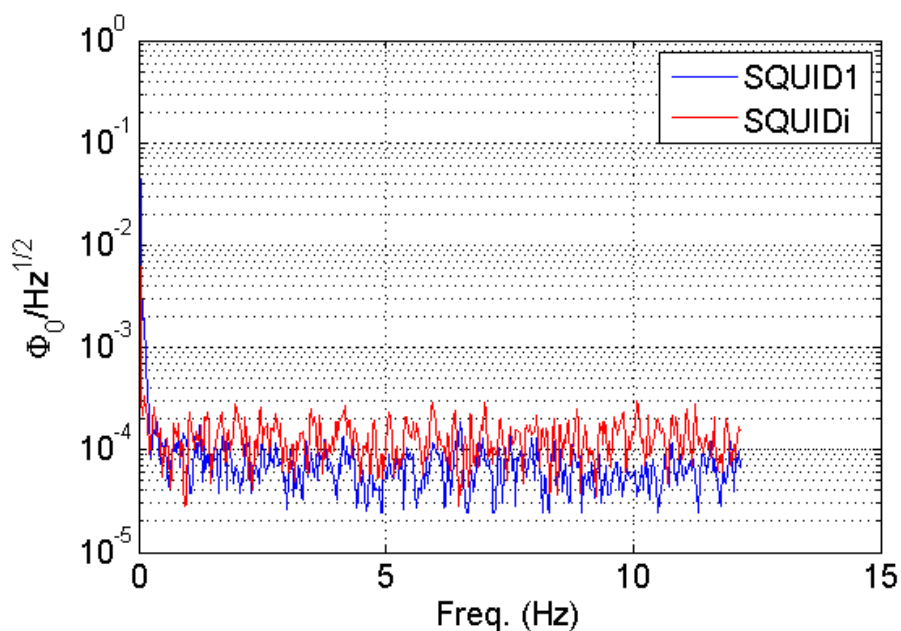


Figura 32: Espectros semilog de ruído do sistema com o SQUID1 e com o SQUIDi.

A parte plana do espectro do SQUID1 tem um nível médio de $50 \mu\Phi_0 / \text{Hz}^{1/2}$ [8]. Para o SQUIDi o nível médio é de $127 \mu\Phi_0 / \text{Hz}^{1/2}$.

A seguir são apresentados os gráficos “LOGLOG” destes mesmos espectros onde uma linha tracejada marca o nível médio.

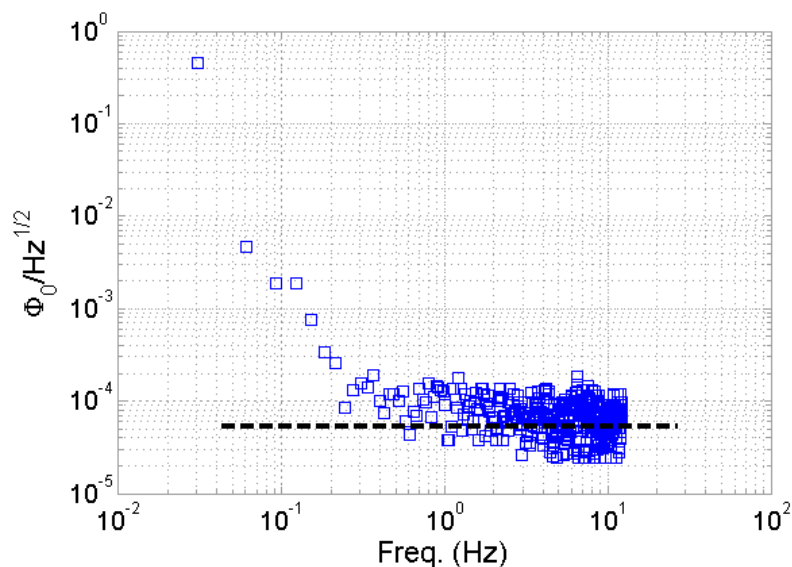


Figura 33: Espectros loglog de ruído SQUID1.

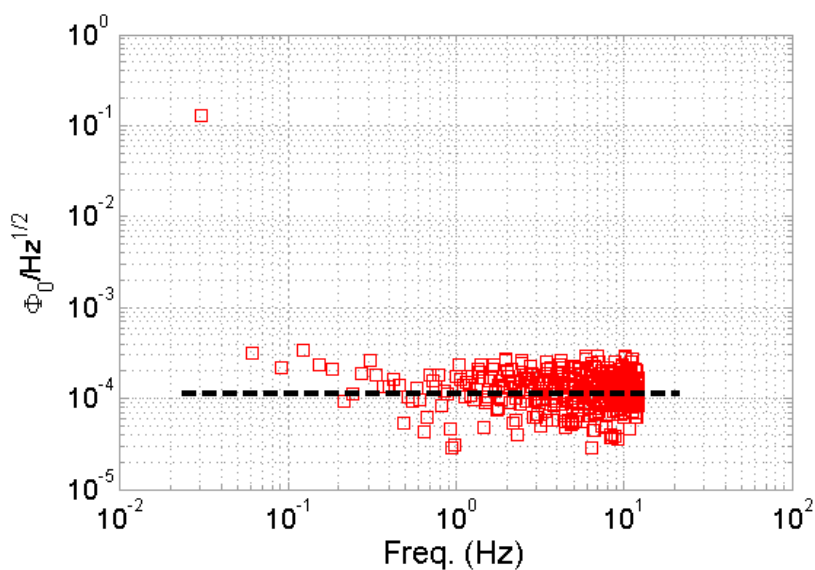


Figura 34: Espectros loglog de ruído do SQUIDi.

Estes gráficos foram obtidos depois de todos os procedimentos iniciais do sistema estarem completos e com os equipamentos nas seguintes configurações: SQUID em hélio líquido, ajuste do ponto de operação, sensibilidade x100 (o programa que gera o gráfico já divide os dados por 100 para obter o valor correto), filtro em 100Hz e rejeição de 60Hz , e velocidade de realimentação em média (ver item 7.4). E as configurações do analisador eram: frequência de 0 a 12,2 Hz, média de 200, unidade era Vrms.