

2 Experimental

O trabalho experimental necessário à conclusão desta tese foi extremamente árduo devido às condições extremas necessárias à realização das medidas.

A fim de caracterizar as minúsculas amostras obtidas, pressões de muitos milhares de atmosferas e temperaturas de poucos mili-Kelvin tiveram de ser alcançadas. Não bastassem tais condições, vários problemas aconteceram com os equipamentos de medida e com as células de pressão, levando à grandes perdas de tempo e de amostras.

As seções seguintes foram escritas com o objetivo de mostrar o caminho trilhado e reduzir o número de obstáculos que os próximos pesquisadores terão de ultrapassar. Espera-se que, com este argumento, se justifique o nível de detalhamento que será encontrado a seguir. Apesar do esforço neste sentido, porém, não foi possível detalhar todos os procedimentos e o autor se coloca à disposição do leitor para quaisquer esclarecimentos que sejam necessários.

2.1 Procedimentos

As amostras monocristalinas do composto $Ce_2Rh_{1-x}Ir_xIn_8$ utilizadas neste trabalho foram crescidas pelo Professor Pascoal Pagliuso e pelo Dr. Nelson Moreno no Laboratório Nacional de Los Alamos utilizando o método de crescimento de monocristais por fluxo metálico descrito em detalhes em (20).

Em resumo, os reagentes cério, ródio, irídio e índio foram colocados em um cadinho de alumina, inerte ao estado fundido, na proporção atômica 2:(1-x):x:20 e selados em uma ampola de quartzo com atmosfera de argônio.

A ampola foi aquecida até 1150 graus centígrados, resfriada lentamente até 750 graus centígrados e, depois, centrifugada afim de remover o excesso de índio.

Os cristais obtidos foram verificados por medidas de raios-x e somente foram observadas a fase Ho_2CoGa_8 e o índio puro, dentro do limite de resolução do equipamento (1-2%).

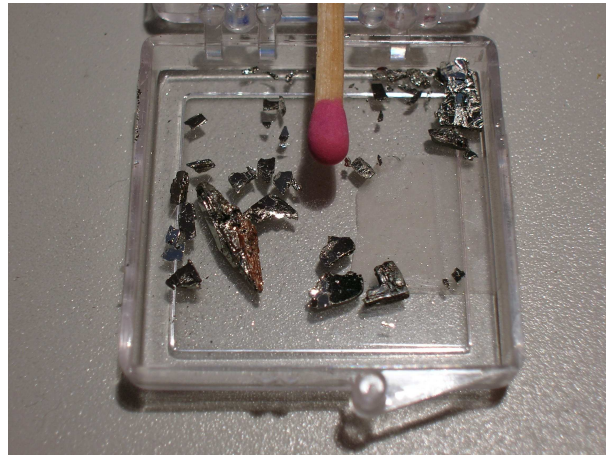


Figura 2.1: Fotografia de um conjunto de amostras com $x=0,5$.

As amostras foram codificadas da seguinte maneira em relação a concentração de irídio:

| Código original | %Irídio |
|-----------------|---------|
| NM254 | 05 |
| NM255 | 10 |
| NM256 | 15 |
| PG370 | 25 |
| NM306 | 40 |
| PG378 | 50 |
| NM305 | 60 |
| NM304 | 70 |
| PG372 | 75 |
| NM303 | 80 |
| NM302 | 85 |
| NM288 | 95 |
| NM287 | 98 |

Tabela 2.1: Códigos e concentrações das amostras recebidas. As amostras cujo código inicia com PG foram crescidas pelo professor Pascoal Pagliuso, co-orientador deste trabalho. As que começam com NM foram crescidas pelo Dr. Nelson Moreno.

As principais etapas de caracterização destas amostras por resistividade elétrica sob pressão estão listadas abaixo e detalhadas nas seções seguintes.

1. Corte dos cristais e preparação das amostras
2. Seleção das amostras por magnetismo
3. Instalação das amostras no porta amostras da célula
4. Instalação de contatos

5. Instalação do porta amostras na célula
6. Instalação da célula nos sistemas de medidas

2.2

Corte dos cristais e preparação das amostras

Os cristais foram clivados sob o microscópio usando uma lâmina grossa e pinças até que se conseguissem dez amostras com superfície regular e isenta de núcleos de índio visíveis.

Cada uma das amostras foi, então, lixada em papel de lixa 600 a 1200 e limpa com acetona em banho de ultrassom por 5 minutos para remoção de gordura e metais contaminantes. Os papéis de lixa não foram reutilizados em amostras ou concentrações sucessivas.

Nos casos raros em que as amostras estavam grandes demais ($> 2mm$), elas foram divididas em pedaços menores, diminuindo assim a possibilidade de conterem contaminação por índio em seu interior.

As amostras foram, então, pesadas, numeradas e armazenadas separadamente em tubos tipo Eppendorf. Um total de 120 amostras foi obtido no final desta etapa.

2.3

Seleção das amostras por medidas de magnetização no MPMS

Medidas de magnetização foram realizadas entre 3K e 4K em cada uma das amostras, até que duas representantes de cada concentração pudessem ser obtidas sem o sinal da transição supercondutora do índio puro. O equipamento utilizado foi um MPMS da Quantum Design pertencente ao IFGW na Unicamp. Após esta primeira seleção foram obtidas somente dezoito amostras sem sinal de índio.

A fim de ter certeza sobre a ausência de índio puro nestas amostras, uma segunda seleção foi efetuada, desta vez por resistividade elétrica. Para isto, quatro contatos tiveram que ser instalados em cada amostra.

2.4

Instalação de contatos

Para efetuar a instalação dos contatos, pequenos terminais de platina foram recozidos na chama de um isqueiro e cortados em pedaços de aproximadamente 3mm.

Uma quantidade mínima de epoxi de prata (EPOTECH H20S) foi preparada misturando-se partes iguais de seus componentes.

Com o auxílio de um microscópio e uma pinça de boa qualidade, cada um dos terminais de platina teve uma de suas pontas mergulhada na gota de epoxi de prata e posicionada sobre a amostra.

Com cuidado, a ponta do terminal foi aproximada da superfície da amostra até tocá-la, quando a pinça é aberta e o fio de platina cai sobre a amostra, girando em torno do ponto de contato. Enquanto a epoxi de prata não foi curada, os terminais assim colocados sobre a amostra não foram mais tocados.

O procedimento requer um pouco de prática, principalmente na hora de posicionar o último dos quatro contatos pois as amostras são muito pequenas ($<1/4$ mm).

Os melhores resultados foram obtidos com amostras fixadas a substratos de safira com verniz GE, e estes temporariamente fixados a uma lâmina de microscópio durante o procedimento de colocação de contatos. Isto evitou que movimentos falhos movessem a amostra durante o posicionamento e estragassem todo o trabalho.



Figura 2.2: Fotografia de uma amostra sobre subtrato de safira com contatos instalados.

Para a cura da epoxi de prata a lâmina de microscópio foi colocada em uma estufa a 120 C por uma hora. A verificação da secagem foi feita tocando os contatos com uma agulha de ponta fina. A resistência de contato, medida entre os terminais, ficou abaixo de 10 ohm. O resultado após a cura da epoxi pode ser visto na figura 2.4.

2.5

Seleção das amostras por resistividade

Todas as amostras acima sofreram uma segunda seleção, desta vez por medidas de resistividade elétrica, afim de procurar indícios da transição supercondutora do índio.

Devido à alta demanda dos equipamentos do laboratório do CBPF as dezoito amostras obtidas nos procedimentos anteriores foram medidas ao mesmo tempo.

As amostras foram instaladas numa haste modificada para permitir a medida simultânea das dezoito amostras. A haste foi instalada num criostato Janis com temperatura monitorada por um termômetro cernox conectado a um controlador Lake Shore 340.

As medidas foram realizadas através de uma caixa seletora manual, acoplada a uma ponte AC Linear Research LR700. Os dados foram coletados manualmente.

O controle da temperatura foi feito, também manualmente, através de uma válvula que acoplava o espaço de amostras do criostato a uma bomba de vácuo, e de outra válvula capilar que controlava a entrada de hélio líquido no espaço de amostras. A temperatura podia ser estabilizada a qualquer momento com erro de $\pm 1\text{mK}$.

Todo o procedimento, desde a modificação da haste até o final das medidas levou cinco dias. O tempo de medida foi aproximadamente cinco horas.

Após as medidas as amostras que não apresentaram sinal algum da transição do índio puro foram retiradas do porta amostras e armazenadas com contatos, sobre seus substratos, em recipiente apropriado.

Para efetuar as medidas de resistividade sob pressão grupos de até quatro amostras foram instalados simultaneamente na célula de pressão. Devido à grande complexidade deste tipo de instalação, o procedimento a ser seguido para fazê-la com sucesso está descrito abaixo.

2.6

Célula de Pressão Hidrostática

Uma das células de pressão utilizadas foi construída na PUC durante o trabalho de doutorado e pode ser vista na figura 2.6.A outra foi desenvolvida no CBPF e um esquema de suas peças pode ser visto na figura 2.6.

Somente a célula desenvolvida na PUC será descrita nesta seção. Seu corpo principal é feito em berílio-cobre por ser um material de alta resistência e ótima condutividade térmica.

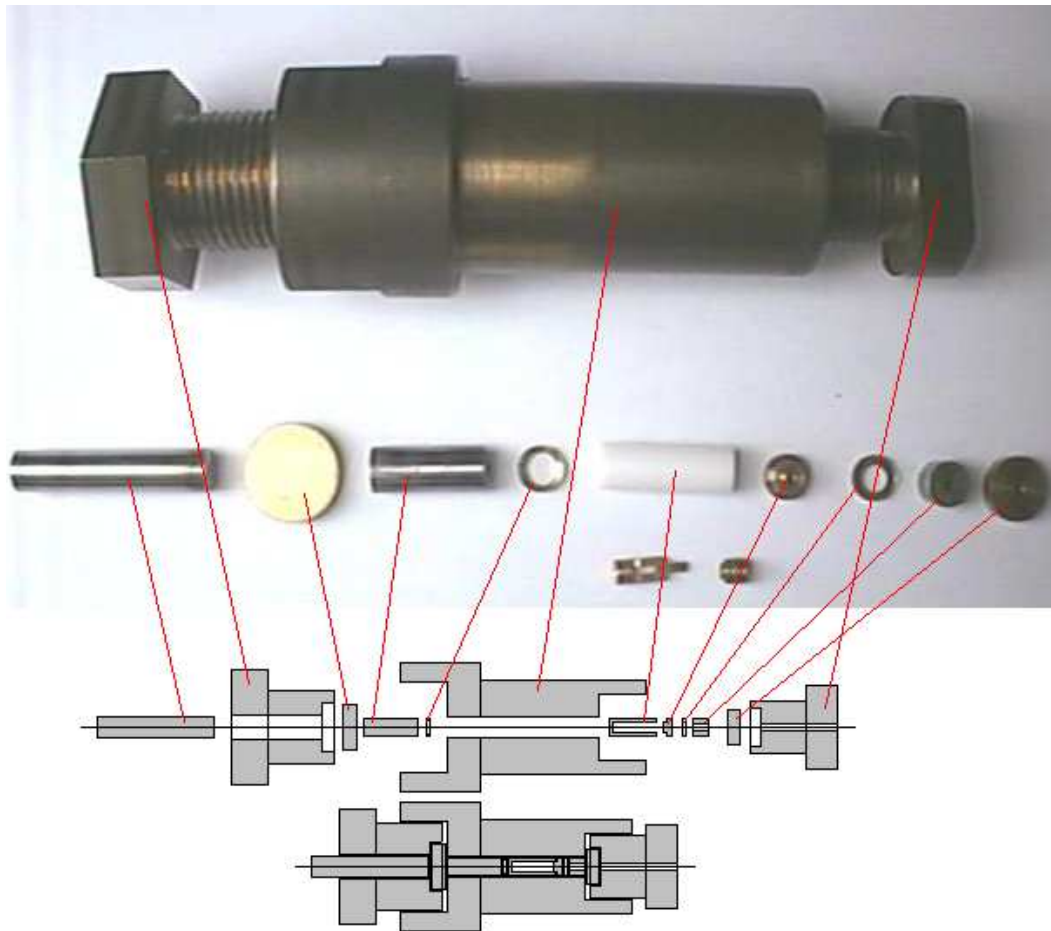


Figura 2.3: Componentes e diagrama da célula de pressão desenvolvida na PUC.

A fiação elétrica entra por um dos lados da célula, passa através da rolha e de êmbolos perfurados e chega ao espaço de amostras.

Pelo outro lado da célula é aplicada a pressão através de um pino que atravessa a outra rolha. Êmbolos em sequência desacoplam o pino da rolha, que pode girar livremente e travar a célula pressurizada.

Nas figuras abaixo podem ser vistos diagramas de montagem e peças de uma das células de pressão utilizadas.

2.7

Preparação da rolha da célula

A fixação do porta amostras na célula de pressão exige que os fios de cobre já estejam instalados na sua rolha. O número de fios utilizados depende do número de amostras e sensores que serão instalados na célula. Neste caso o número máximo de amostras instalado foi quatro, mais dois sensores de

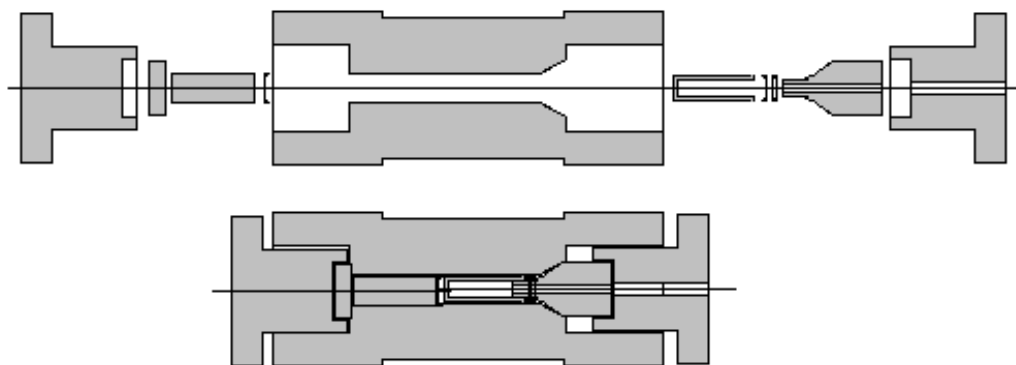


Figura 2.4: Diagrama da célula de 25kbar desenvolvida pelo CBPF.

pressão, todos com quatro terminais, e dois fios reserva, totalizando vinte e seis fios.

Foram montadas células com fios AWG 38 e AWG45. Os últimos exigem mais cuidado e terminais especiais do lado de fora da célula, pois são muito frágeis. Esta questão, puramente tecnológica, pode ser resolvida, possibilitando aumentar ainda mais o número de amostras instaladas.

No caso mais simples, os fios AWG38 foram cortados, limpos com álcool, inseridos na rolha e posicionados de modo que um pedaço maior que um palmo ficasse para fora da célula. Neste momento cabe proteger o conjunto de fios com um tubo fino de borracha ou teflon, evitando problemas mecânicos.

Um pouco de resina Stycast foi preparada e mexida exaustivamente para evitar falta de homogeneidade e bolhas de ar, seguindo a receita da próxima seção.

A resina foi colocada na rolha de modo a preencher total e somente o espaço de passagem dos fios.

O conjunto foi colocado para secar em estufa a 120 C por duas horas. Um exemplo do resultado final pode ser visto na figura 2.7.

2.8 Stycast

A preparação do stycast para a vedação da rolha do copo foi feita misturando-se exaustivamente seus dois componentes na proporção três e meio para cem. Em geral, cem miligramas são quantidade suficiente e conveniente para fechar a rolha da célula.



Figura 2.5: Componentes da célula de pressão

Para fazer a pesagem, utilizou-se uma balança com resolução de 4 ou mais casas decimais sobre a qual uma lâmina de microscópio previamente limpa foi colocada e a balança zerada.

Antes de retirar a resina negra de seu recipiente ela foi misturada exaustivamente para homogeneizá-la. Mesmo sendo pouco viscosa, ocorre decantação no recipiente.

Cada componente da resina foi, então, colocado sobre a lâmina até que a proporção de 3,5 partes de endurecedor para 100 partes de resina fosse atingida. As ferramentas utilizadas foram limpas várias vezes com álcool e papel para evitar a contaminação dos componentes. Os dois componentes não devem entrar em contato durante a pesagem, mas estar o mais próximo possível para facilitar a mistura.

Após a mistura, a resina se mantém utilizável por aproximadamente trinta minutos, quando começa a endurecer lentamente.

A cura da resina foi feita em estufa a cento e vinte graus centígrados por duas horas.

2.9

Preparação do porta amostras

Vários tipos de porta amostras foram testados. Os melhores resultados foram obtidos com um porta amostras no formato da figura 2.6(a), pois a fiação teria bastante espaço para passar e ser arrumada.

Depois de posicionado e fixado na rolha com verniz GE, o conjunto era colocado em estufa para que o verniz secasse a 80 C por uma hora.

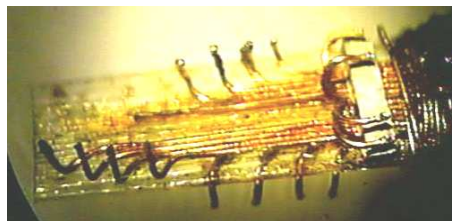
Desde porta-amostras de PVC, de difícil confecção, até chapas finas de cobre ou filmes de transparência foram testados em dois modelos diferentes de célula de pressão.

A experiência mostrou que, quando se trata de montar apenas uma amostra dentro da célula, soluções simples costumam funcionar. Já quando se trata de montar várias amostras, além dos sensores de manganina e de chumbo (explicados abaixo), alguma estrutura se faz necessária para impedir que fios se toquem e contatos se soltem com a aplicação de pressão.

Algumas fotos de porta amostras e outros detalhes podem ser vistas na figura 2.6.



2.6(a): PVC.



2.6(b): Filme de transparência.



2.6(c): Placa fina de cobre.



2.6(d): Cobre.

Figura 2.6: Fotografias de alguns porta-amostras utilizados. Várias formas de distribuir a fiação para as quatro amostras foram testadas e podem ser vistas nestas figuras. O material utilizado nos porta amostras também foi variado afim de se reduzir o tempo e a complexidade da montagem.

Após a fixação do porta amostras na rolha, os fios são distribuídos por sua superfície e fixados, temporariamente, com minúsculas gotas de superbonder. Uma camada fina de verniz GE é, então, aplicada sobre todo o conjunto e seca em estufa para estabilizar a montagem e preparar os fios para serem desencapados.

A remoção do verniz da ponta dos terminais no porta amostras é feita usando um ferro de soldar com uma chapa fina de cobre presa em sua ponta. A chapa de cobre é cortada em forma de flecha e possui uma ponta muito fina, mesmo quando observada no microscópio.

Com o auxílio de uma agulha, espalha-se fluxo de solda de boa qualidade nas pontas dos fios de cobre a serem desencapados e toca-se cada uma destas pontas com uma minúscula gota de solda fundida, presente na ponta de cobre

acoplada ao ferro de soldar. Este procedimento funciona melhor com o ferro a 400 graus centígrados.

A gota de fluxo colocada sobre a ponta do fio de cobre deve ter, idealmente, o mesmo diâmetro do fio. O contato com a solda fundida faz com que o fluxo ferva imediatamente, levando uma grande quantidade de calor ao verniz e queimando-o antes que o fio de cobre difunda o calor aplicado.

Não é necessário que um comprimento maior que o equivalente ao diâmetro do fio seja descascado. Montagens foram feitas onde somente foi colocada solda na seção reta da ponta dos fios, sem nem mesmo descascá-los.

A etapa mais tediosa vem a seguir, quando cada um dos terminais do porta amostras deve ser relacionado com os terminais externos. Utiliza-se para isto um fio fino de cobre ligado a um ôhmímetro capaz de emitir um sinal audível quando a resistência cai ao mínimo. Este fio é soldado a um dos terminais do porta-amostras e, com o outro terminal do ôhmímetro, testa-se cada um dos terminais externos da rolha. Encontrado o terminal correto ele é claramente marcado e o procedimento se repete até que todos os terminais do porta-amostras estejam identificados.

O melhor marcador encontrado para os terminais externos foram pedaços pequenos de cabos chatos de discos rígidos SCSI. Uma fatia transversal do cabo com largura de 3mm é cortada e, depois, grupos de 4 fios são separados. Sob um microscópio, utilizando uma boa pinça, os terminais metálicos são separados da parte isolante do cabo e descartados. Sobram, após isto, vários pedaços de borracha isolante, cada um convenientemente formado por quatro cilindros ocios de borracha.

Cada fio identificado na rolha passa por um destes cilindros de borracha, seguindo a seqüência I+, V+, V-, I-. Cada peça de borracha passa a representar o conjunto de quatro terminais equivalente no porta-amostras e deve ser claramente identificada com o número da amostra usando tinta de retroprojektor.

Este procedimento foi utilizado inúmeras vezes e resistiu a todas as variações de temperatura e instalações da célula, tanto em vácuo quanto em atmosfera úmida.

O próximo passo na montagem do porta-amostras é a instalação das amostras. Dependendo da origem e da história delas, as amostras podem chegar neste ponto já sobre um substrato suporte e com contatos. Se este for o caso, os suportes são fixados ao porta-amostras com pequenas quantidades de verniz GE e os fios de platina de cada um dos quatros terminais são, então, soldados aos fios de cobre do porta amostras.

Caso cheguem nesta etapa sem os contatos instalados, as amostras podem

ser montadas sobre suportes de papel e nelas fixadas com verniz GE. A fixação com verniz deve sempre ser feita de maneira a restringir a menos que 1/4 a área entre a amostra e o suporte. Este cuidado permite que, em caso de problemas, a amostra possa ser separada do suporte minimizando o risco de quebra. O completo preenchimento da área de contato com verniz pode, até mesmo, impossibilitar a remoção da amostra do suporte.

Após a secagem do verniz em estufa os contatos devem ser instalados na amostra seguindo o procedimento descrito em etapas anteriores e os terminais soldados no porta amostras. A figura 2.7a mostra o resultado final da montagem e a figura 2.7b mostra o porta amostras instalado na rolha de uma célula de 25kbar.



2.7(a): 01



2.7(b): 02

Figura 2.7: Fotografias: a) de um porta-amostras finalizado e b) uma rolha de célula de 25kbar com o porta amostras instalado.

Todas as etapas descritas até aqui exigem o uso de um microscópio. Tanto no caso de trabalhos simples, quanto no caso de realização de micro soldas, é importante que a área de trabalho esteja limpa e organizada, facilitando a solução de problemas em caso de pequenos acidentes.

O microscópio deve estar posicionado corretamente e a cadeira deve ser firme e estável. O operador deve ter ambos os pés apoiados e, se possível, os cotovelos também. Estas precauções minimizam as oscilações mecânicas que os grandes grupamentos musculares do corpo geram e permitem que uma grande precisão de movimento seja alcançada, principalmente na hora de fazer as pequenas soldas.

No momento de soldar os terminais de platina das amostras com os fios de cobre, especial cuidado deve ser tomado para não aquecer a amostra. A massa de solda utilizada deve ser mínima e o ferro de soldar deve estar longe o bastante para que sua radiação não destrua a montagem. Sugere-se praticar

todos os procedimentos até que se tenha segurança para arriscar as amostras neste tipo de montagem.

Bobina de manganina (sensor de pressão)

Afim de medir a pressão dentro da célula, em temperatura ambiente, durante as trocas de pressão, utiliza-se a resistência de um fio de manganina como parâmetro de controle. Sua variação com a pressão segue relação matemática abaixo, específica para o fio utilizado:

$$R = (P * 2,5 * 10^{-3} + 1) * R_{mangCNTP}$$

Onde $R_{mangCNTP}$ é a resistência do sensor medida à pressão e temperatura ambiente e P é a pressão medida em kbar.

A manganina utilizada nos sensores tem resistividade de 0.7 ohm.cm. Tipicamente, os sensores foram enrolados com comprimentos de fio variando de 20cm a 40cm, correspondendo a resistências de 15ohm a 30ohm nas CNTP.

O método de medida de resistência utilizado foi o de quatro pontos e as medidas foram feitas sempre no mesmo multímetro, modelo HP34401.

Tanto a confiabilidade quanto a reprodutibilidade dos resultados são maiores quando o fio utilizado sofre alguns ciclos de variação de temperatura (4K a 300K, quatro vezes) e de pressão (1bar a 20kbar, quatro vezes). Caso não seja possível ou conveniente, no entanto, fios não ciclados podem ser utilizados, desde que não se relaxe a célula ao longo das medidas, i.e., desde que a pressão dentro da célula só seja aumentada até a pressão máxima e nunca diminuída.

Foram testados carretéis de cobre, PVC ou aço inox. Alguns deles faziam parte do porta amostras, outros eram independentes, de maneira que pudessem ser reutilizados. A experiência mostrou que cada um tem suas vantagens e desvantagens mas, acima de tudo, é possível uma grande flexibilidade de materiais e formatos e que a escolha dos mesmos não é crítica.

2.9.1

Sensor de pressão de chumbo

Outra maneira de medir a pressão dentro da célula é através da temperatura de transição supercondutora do chumbo. A variação desta temperatura com a pressão já é bem conhecida e possibilita a medida de pressão dentro da célula com bastante precisão. Entre os métodos mais utilizados estão a medida de susceptibilidade e a de resistividade por quatro pontos.

No primeiro deles uma bobina externa à célula (primária) gera um campo magnético variável no tempo que é captado por uma pequena bobina dentro

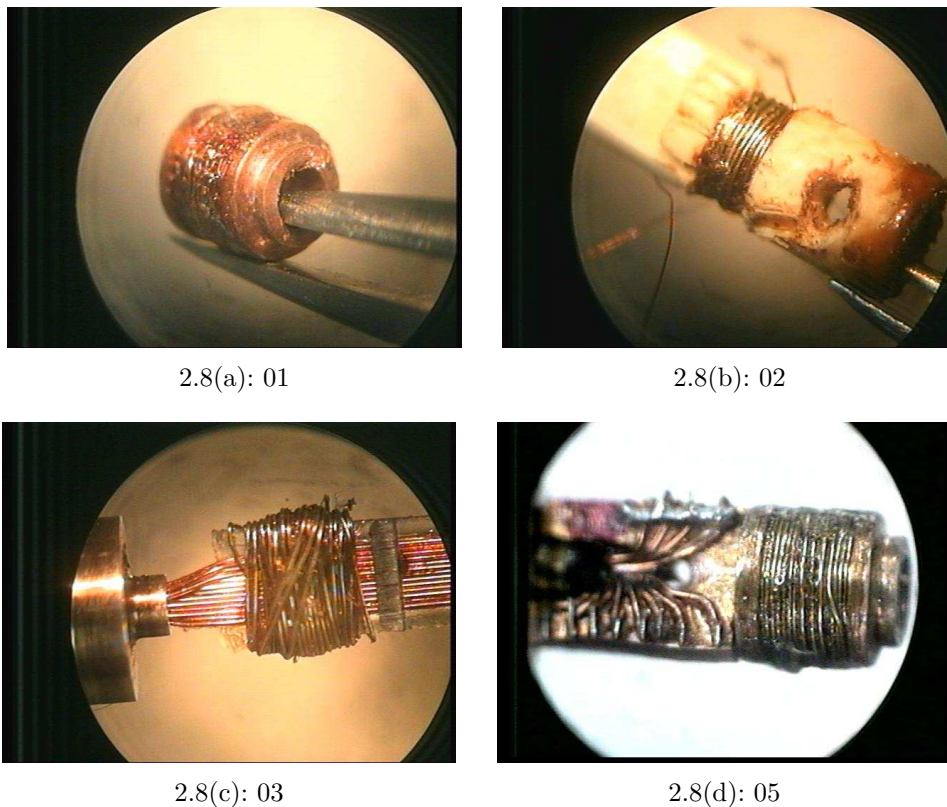


Figura 2.8: Sensores de pressão de manganina.

da célula, em cujo núcleo é inserido o sensor de pressão. A voltagem induzida na pequena bobina, chamada secundária, é monitorada por um amplificador lock-in com sua referência no sinal de excitação da bobina primária. Ao passar pela transição supercondutora o efeito Meissner trata de expulsar o campo magnético de dentro do metal, gerando um sinal claro na voltagem induzida na bobina secundária.

O segundo método detecta a temperatura de transição a partir da medida de resistividade do metal sensor. A medida é feita pelo método de quatro pontos, utilizando-se uma ponte AC ou uma fonte de corrente e um multímetro. A temperatura foi determinada a partir da seguinte relação:

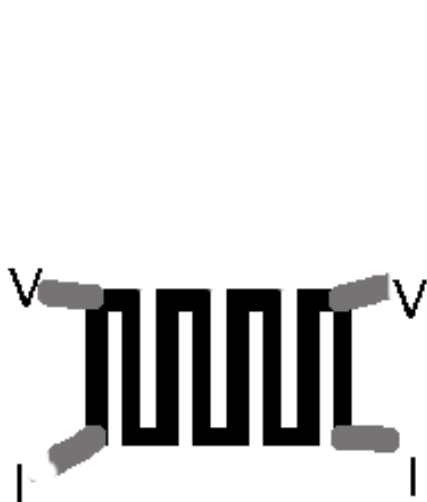
$$T_c(P) = 7,2 - 0,03472 * P + 0,00005 * P^2$$

Neste trabalho foram feitas medidas de pressão em baixas temperaturas utilizando sempre o segundo método, que se integrou facilmente com o sistema de medida de resistividade das amostras.

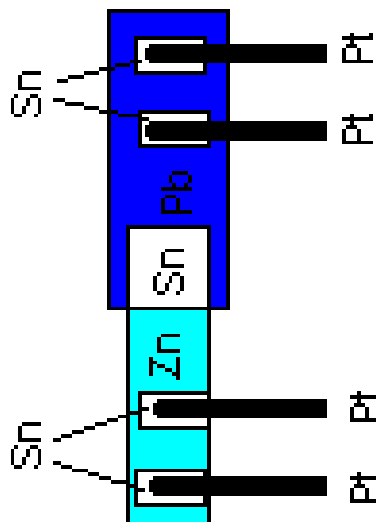
Foram utilizados dois tipos de sensores. O primeiro, de chumbo ultra puro, e o segundo, de chumbo em série com zinco para medidas de pressão a 7K e a 0.7K.

No caso de resistividade, o sensor deve ser o mais fino e longo possível, aumentando ao máximo o fator geométrico e garantindo um valor legível acima da resolução mínima da ponte AC em temperaturas muito baixas.

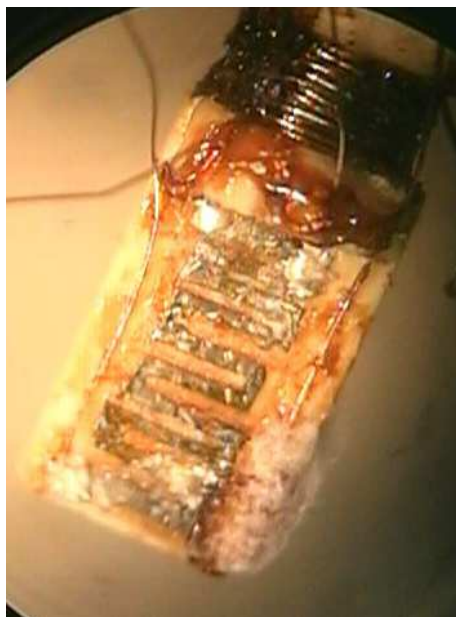
A forma mais comum utilizada foi uma fatia de chumbo plana, muito fina, cortada de modo a maximizar a distância percorrida pela corrente entre os terminais de medida.



2.9(a): 01



2.9(b): 02



2.9(c): 03



2.9(d): 04

Figura 2.9: Sensores de pressão de chumbo e chumbo-zinco.

Apesar de ter sido testado e utilizado somente uma vez, o manômetro de Pb-Zn parece trazer a vantagem de possibilitar a medida da pressão em duas faixas de temperatura diferentes, permitindo a confirmação do valor encontrado.

Em sistemas onde parte da medida deve ser feita usando um refrigerador de diluição e parte usando criostatos convencionais, esta vantagem fica ainda mais evidente por minimizar os erros de calibração dos sensores de temperatura.

2.9.2 Meios Hidrostáticos

Há algumas opções de meios hidrostáticos que podem ser utilizados nas células de pressão. Em geral, a escolha varia com a pressão máxima a ser atingida, a disponibilidade de recursos financeiros do pesquisador e a facilidade com que são encontrados.

Uma pequena lista dos mais utilizados segue abaixo:

- FluorInert FC75
- FluorInert FC77
- Fluorinert FC75+FC77 (50%/50%)
- Óleo Mineral e álcool

Os fluorinerts são bastante caros, altamente voláteis e razoavelmente difíceis de serem encontrados, mas são, também, isotrópicos, inertes e hidrostáticos em largas faixas de pressão.

2.9.3 Execução

Devido às altas pressões atingidas no interior da célula, todas as dimensões devem ser reproduzidas com a maior fidelidade possível, e dentro da menor tolerância que as máquinas permitirem.

Após executadas na oficina, todas as peças foram verificadas e a célula montada e testada sem amostras. As peças devem se encaixar sem folgas, mas sem muito atrito também.

Uma boa forma para se avaliar isto é tampar um dos lados da célula com a mão e deixar que o pistão maior deslize por dentro dela, inserindo-o pelo lado não tampado. Ele deve ser capaz de descer sozinho, porém lentamente, devido ao deslocamento de ar restrito pela folga entre o mesmo e a parede da célula.

2.9.4

Embolo Menor Perfurado

Neste trabalho, o embolo menor foi feito de aço D6. Bastante conveniente, este aço é facilmente usinado e perfurado enquanto não sofre têmpera. Após a mesma, sua usinagem fica muito mais difícil e sua perfuração também.

O processo de têmpera é feito colocando-se a peça em uma ampola de quartzo selada com argônio. O conjunto é, então, colocado em um forno previamente aquecido a novecentos graus centígrados e lá mantido por duas horas. A ampola é, então, retirada com um alicate apropriado e imediatamente imersa em um recipiente com óleo, onde é quebrada. Este processo impede o contato do aço aquecido com o oxigênio do ar, evitando sua imediata oxidação.

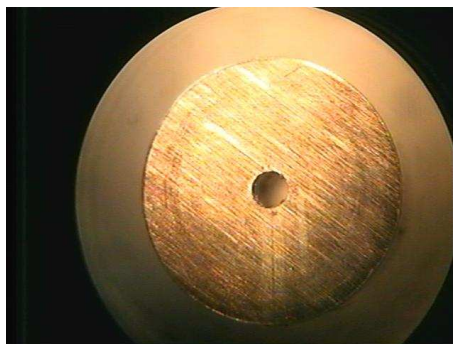


Figura 2.10: Êmbolo perfurado.

Copo de Teflon

Alguns problemas envolvendo o cisalhamento dos copos de Teflon ocorreram durante a aplicação de pressão na célula. Tais problemas parecem estar relacionados à qualidade do material utilizado para a confecção dos copos.

Levando-se em conta o tempo de trabalho e o esforço envolvidos na seleção das amostras e em sua montagem no porta-amostras, sugere-se que se verifique previamente a qualidade do teflon utilizado e, se possível, que sejam realizados testes de pressão com a célula vazia sempre que fornecedor do material for trocado.

2.9.5

Aplicação de Pressão

Terminadas todas as etapas anteriores, a célula está pronta para ser cuidadosamente montada e fechada. Todas as ligações elétricas devem ser testadas e as resistências medidas à pressão e temperatura ambientes.

A célula é, então, colocada em um suporte de inox temperado e o conjunto colocado num sistema de aplicação de pressão que pode ser uma prensa hidráulica manual. Sugere-se que, qualquer que seja o sistema, o mesmo seja capaz de atingir 20 toneladas força.

O conjunto deve ser posicionado e alinhado com o atuador da prensa, sobre uma base firme e nivelada. Com a prensa relaxada, a distância entre o atuador e o pino de aplicação de pressão deve ser a menor possível. Deve-se lembrar que as prensas hidráulicas, em geral, trabalham melhor no início de seu curso.

A prensa deve, então, ser pressurizada até que o atuador desça e toque o pino de pressão da célula. A partir de então, checando-se todo o conjunto novamente e monitorando-se a pressão através da resistividade da bobina de manganina, começa-se a aplicar pressão lentamente na célula.

A cada nova aplicação, o torque necessário para girar a tampa maior deve ser checado. Sempre que for possível girar mais um pouco a tampa, deve-se fazê-lo. Lembre-se que isto deve ser feito com duas chaves de boca sempre. Uma delas segurando a célula e a outra girando a tampa. Uma atuando contra a outra.

ATENÇÃO: As mãos devem estar fora do alcance do atuador da prensa, sempre!

Ao apertar a tampa da célula, procure não aplicar nenhum torque que possa mover a célula de sua posição. Conforme a pressão aplicada, tal movimento poderia causar um grave acidente.

Ao atingir a pressão desejada, certifique-se que a tampa esteja apertada antes de começar a relaxar a prensa. A medida da pressão na manganina irá diminuir durante e após o relaxamento da prensa. Se a prensa for confiável e estiver com todos os retentores bons e a célula tiver sido bem apertada, o relaxamento da pressão da célula durante o relaxamento da prensa será mínimo (segunda casa decimal).

Problemas

Após o desacoplamento da prensa com a célula, a última deverá relaxar por algumas horas até atingir um valor estável na leitura da manganina. Caso o valor não estabilize, um vazamento pode estar ocorrendo. Caso a célula relaxe totalmente, sua abertura será inevitável para eliminar o vazamento.

Durante a aplicação de pressão uma ruptura no stycast da rolha poderá causar a implosão da célula e o esmagamento total de seu conteúdo. Para evitá-lo o correto dimensionamento do pino de aplicação de pressão é necessário. Expondo apenas 2mm do mesmo para fora da célula limita-se a compressão de

seu conteúdo a estes mesmos 2mm. Caso contrário, todo o conteúdo do copo de teflon será pulverizado junto com o mesmo para fora da célula pelo orifício de passagem dos fios.

2.9.6 Relaxamento

Para relaxar a célula de pressão a mesma deve ser colocada dentro do copo de aço inox e o conjunto deve ser posicionado sob o atuador da prensa.

Deve-se, então, aplicar pressão sobre o pino de aplicação de pressão até que, com as duas chaves de boca, seja possível destravar a tampa maior da célula sem fazer muita força.

A partir de então, o relaxamento da prensa deve ser sincronizado com o desrosqueamento da tampa, evitando ao máximo que a distância entre o disco maior e a tampa maior cresça além de 1mm.

É importante lembrar que qualquer torque sobre a tampa será transmitido para o disco maior que, por sua vez, o transmitirá ao êmbolo maior. Este último tem resistência muito baixa à torção, principalmente se estiver sob pressão, e pode se fraturar em vários pedaços. Ainda no caso de a célula estar sob pressão quando isto acontecer, tais pedaços podem acabar por arranhar a parede interna da célula, inutilizando-a.

2.9.7 Tabelas de Controle

Para facilitar o controle dos parâmetros da célula, sugere-se o uso de tabelas que registrem os parâmetros listados abaixo:

- Nome do usuário
- Data/Hora da mudança de pressão
- $R_{mang_inicial}$ - Resistência inicial do sensor de manganina
- R_{mang_alvo} - Resistência alvo do sensor de manganina
- R_{mang_max} - Resistência máxima atingida pelo sensor. Útil para diagnosticar a
- condição dos retentores da prensa hidráulica e dos anéis de retenção da célula de pressão.
- R_{mang_final} - Resistência final atingida pelo sensor de manganina com a prensa desacoplada da célula.
- $R_{mang_relaxada}$ - Resistência medida no sensor de manganina após n horas de aplicação de pressão na célula.

- P_{cel_alvo} - Pressão alvo dentro da célula, traduzida pelo sensor de man-ganina
- $P_{cel_relaxada}$ - Pressão interna da célula após o relaxamento.
- P_{prensa_max} - Pressão máxima atingida na prensa
- P_{prensa_final} - Pressão final atingida na prensa
- Obs - Observações pertinentes.

2.10

Baixas temperaturas

Para atingir as baixas temperaturas necessárias à realização deste trabalho, foi utilizado um refrigerador de diluição modelo deep stick, fabricado em Grenoble, na França e mais conhecido como Diluete.

Seu princípio de funcionamento é baseado em vários processos de resfriamento que permitem ao sistema atingir até 10mK.

O sistema é dividido em três partes:

1. Sistema de circulação;
2. Refrigerador de diluição;
3. Sistema de controle e aquisição;

2.10.1

Sistema de circulação

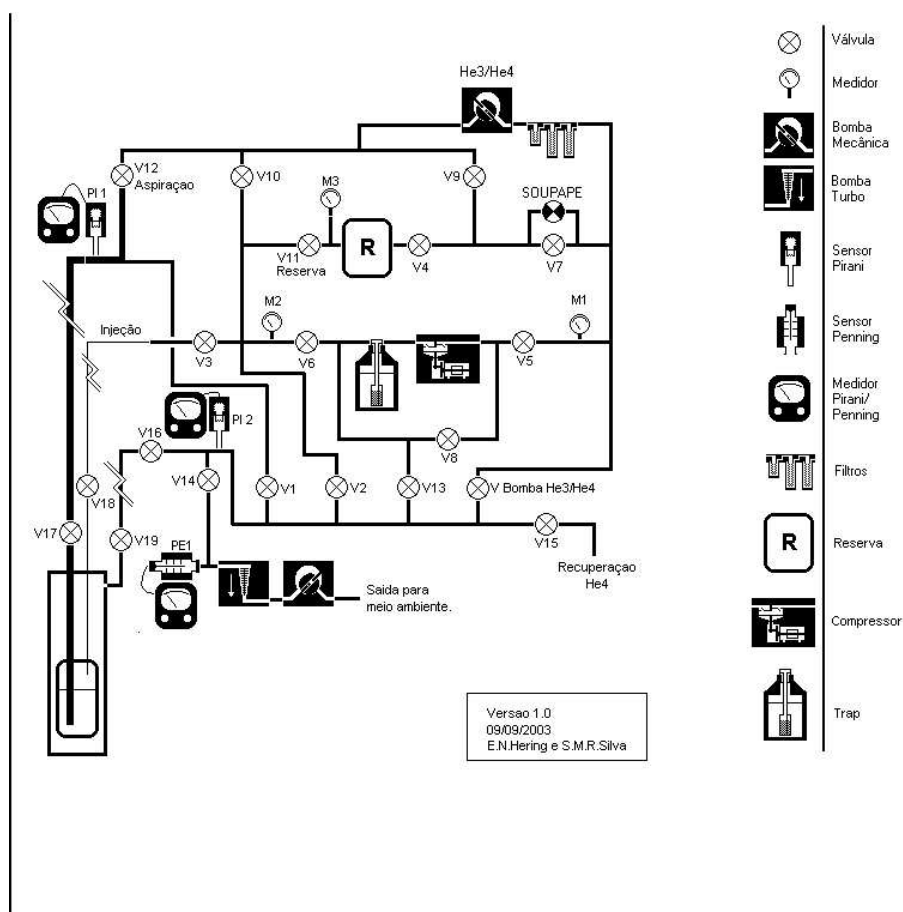


Figura 2.11: Diagrama do sistema de circulação.

O sistema de circulação é composto por:

- Compressor;
- Bomba de vácuo de $30m^3$ por hora;
- Filtros para retenção de óleo;
- Armadilha fria para contenção de gases contaminantes;
- Tanque para armazenamento da mistura;
- Válvulas agulha;
- Tubulação de aço inox;
- Manômetros e sensores diversos de pressão;
- Bombas de vácuo (mecânica e uma turbomolecular).

Cinco são as tarefas desempenhadas por este sistema, sendo a primeira delas a de armazenar a mistura de He^3/He^4 a uma pressão abaixo da atmosférica, mantendo-a protegida de possíveis fugas e contaminações.

A segunda tarefa é retirar a mistura do tanque e comprimí-la até 3 bar, preparando-a para o processo de injeção no refrigerador. Toda a mistura que é comprimida passa, antes, pela armadilha fria, garantindo que gases contaminantes como oxigênio, nitrogênio ou hidrocarbonetos fiquem retidos na mesma, liquefeitos ou solidificados.

Algum tempo após a injeção a pressão cai devido à liquefação de parte da mistura no refrigerador. A tarefa de circular a mistura pelo sistema é realizada pela bomba de vácuo selada, que recolhe o gás pela aspiração do refrigerador, e pelo compressor, que a reinjeta no sistema após passar pela armadilha. Este processo durará enquanto o refrigerador estiver operando, podendo ser mantido por tanto tempo quanto os equipamentos puderem permanecer operando.

Realizadas as medidas necessárias, a mistura deve ser recolhida de volta aos tanques. A temperatura do sistema é levada a 4,2 K e todo o gás liquefeito dentro do refrigerador se vaporiza novamente, sendo recolhido pela bomba de circulação tanto das linhas de aspiração quanto das linhas de injeção. Algumas válvulas no painel do sistema interligam circuitos alternativos para a mistura, possibilitando o recolhimento de quase todo o gás do sistema de volta ao tanque.

A quinta tarefa consiste na limpeza do refrigerador de diluição pelo bombeamento dos capilares e impedâncias com a bomba turbomolecular, jogando para fora do sistema todas as impurezas até que a pressão seja menor que 9×10^{-6} mbar. Esta etapa elimina a maior parte dos resíduos que poderiam vir a se solidificar nos capilares em resfriamentos posteriores.

A última tarefa é realizada em paralelo com as etapas anteriores e consiste em manter o vácuo de isolamento no copo que separa o banho de 4He do

refrigerador de diluição. A pressão nesta parte do sistema é monitorada durante todo o funcionamento do sistema, devendo se manter por volta de 9×10^{-6} mbar. Valores maiores que este podem caracterizar fugas, tanto da mistura quanto do banho de hélio para o vácuo de isolamento. Os dois casos são graves e podem gerar acidentes.

Devido ao alto custo do gás 3He , todo o sistema é projetado para trabalhar em circuito fechado e, na maior parte do tempo, em pressões abaixo da atmosférica.

2.10.2

Refrigerador de diluição

O refrigerador de diluição é composto pelos seguintes componentes:

- Trocador de calor de injeção
- Destilador (Still)
- Trocador de calor da diluição (Heat Exchanger)
- Câmara de mistura (Mixing chamber)
- Suporte do porta amostras
- Contatos para fixação das amostras e dos termômetros.
- Termômetros
- Copo de isolamento

Ao invés de descrever a função de cada parte do refrigerador separadamente, seu funcionamento desde a injeção até a temperatura mínima será dividido em nove etapas, facilitando a compreensão do papel de cada parte no sistema como um todo.

Etapas 1, 2 e 3

Devido à limpeza dos capilares realizada nas operações anteriores, todos os componentes do refrigerador estão em vácuo (etapa 1). Inicia-se, então, o processo de injeção de mistura no sistema de circulação, fazendo-se com que a pressão de injeção atinja 3bar e abrindo-se a válvula de injeção.

O gás injetado atinge o primeiro trocador de calor que está na temperatura do hélio líquido. Chega, então, à primeira impedância, causando um aumento de pressão antes da mesma e uma expansão após atravessá-la. Tal expansão resfria o gás comprimido, sendo o primeiro dos processos de refrigeração do sistema.

A mistura segue, então, por um trocador de calor que atravessa a câmara de destilação e encontra uma segunda impedância logo após a mesma. Esta

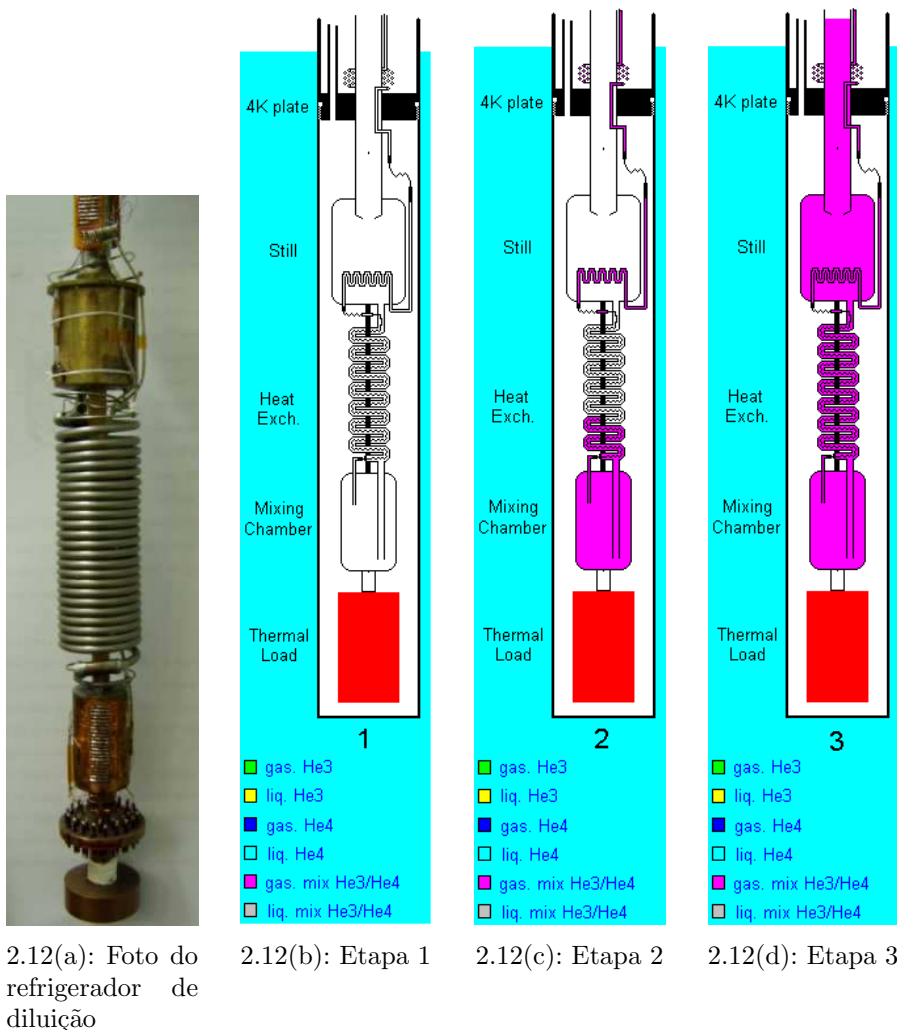


Figura 2.12: Foto e etapas do sistema de diluição.

segunda impedância garante que a pressão no trocador de calor será alta o suficiente para que a eficiência do mesmo seja apreciável.

Após passar pela segunda impedância a mistura segue, ainda na fase gasosa, pelos trocadores de calor da diluição e atinge a câmara de mistura, subindo novamente pelos trocadores após a mesma e atingindo a câmara de destilação, por onde deixa o refrigerador e volta para o sistema de circulação.

Desde a abertura da válvula de injeção até o momento em que o primeiro indício de retorno do gás é detectado na aspiração passam-se, aproximadamente, trinta segundos. Este tempo é cronometrado à cada injeção e serve como base para o diagnóstico do sistema. Valores muito maiores que este devem ser interpretados como entupimentos nos capilares e exigem medidas corretivas.

Etapas 4, 5 e 6

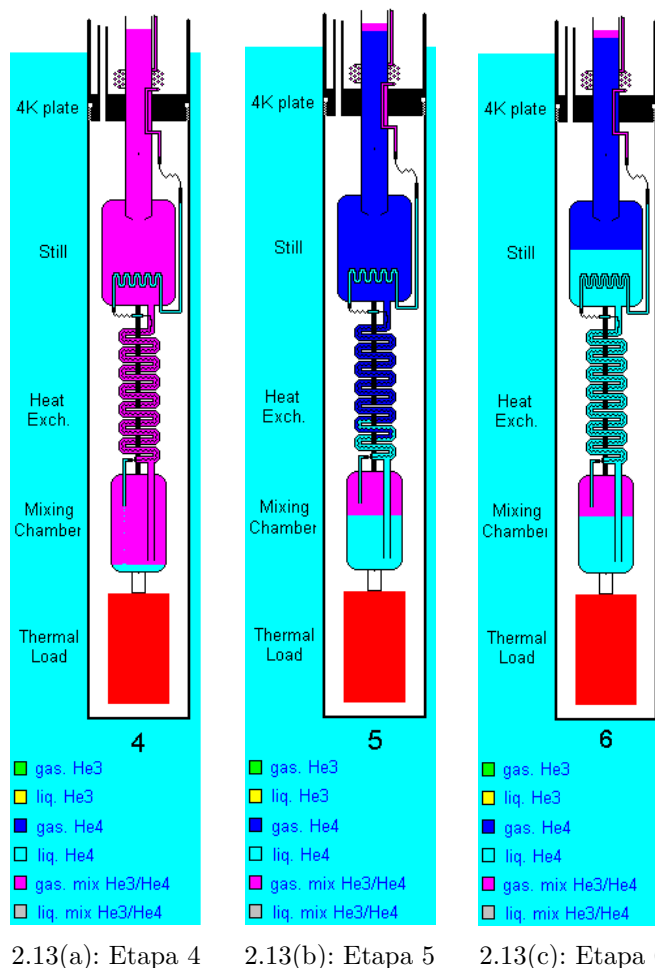


Figura 2.13: Etapas 4, 5 e 6 do funcionamento do refrigerador de diluição

Todo o sistema preenchido com a fase gasosa da mistura. Na região comprimida antes da primeira impedância, porém, a expansão após a passagem pela impedância faz com que o gás comprimido perca calor. Devido à passagem pelo primeiro trocador de calor, tal região já se encontra a 4,2 K e o resfriamento por expansão inicia o processo de liquefação da mistura.

As primeiras gotículas de mistura liquefeita passam a resfriar o sistema abaixo, permitindo que a coluna de líquido atinga regiões cada vez mais distantes do local de liquefação, depositando-se, finalmente, na câmara de mistura.

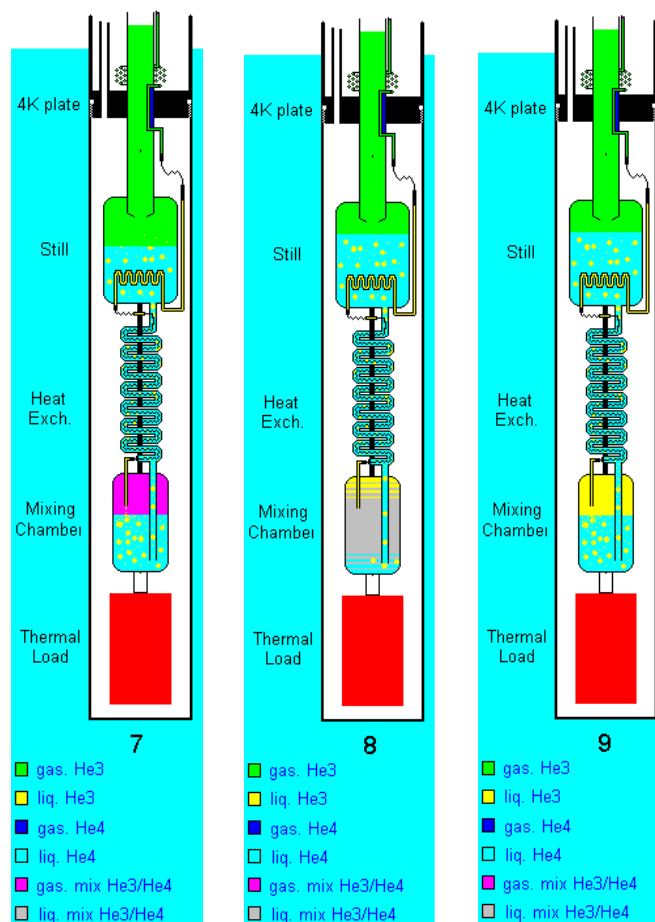
O bombeamento realizado pelo sistema de circulação sobre a fase líquida da mistura faz com que a temperatura da câmara de mistura caia a aproximadamente 1 K após 15 minutos. A esta temperatura, a maior parte do vapor é composto de átomos de 4He . Grande parte do 3He , provavelmente, não entrou no processo de liquefação ainda, permanecendo na fase gasosa.

O vapor de 4He sobe pelos trocadores de calor, diminuindo ainda mais a temperatura da mistura que desce, vinda das impedâncias e aumentando a eficiência do processo de liquefação.

Com a maior parte do 4He liquefeito, logo o nível de líquido sobe pelos trocadores de calor e atinge o destilador, levando sua temperatura a cair a, aproximadamente, 2K enquanto o trocador de calor da injeção não é completamente submerso. Após a completa submersão, sua temperatura cai para aproximadamente 1K.

A eficiência do trocador de calor dentro do destilador aumenta muito após o mesmo ser submerso, permitindo que a mistura atinja temperaturas abaixo de 2,2K e entre no estado superfluido antes de passar pela segunda impedância. Neste estado o 3He consegue se diluir na fase líquida (predominante 4He) com facilidade e começa a circular pelo sistema.

Etapas 7, 8 e 9.



2.14(a): Etapa 7 2.14(b): Etapa 8 2.14(c): Etapa 9

Figura 2.14: Etapas 7, 8 e 9 do funcionamento do refrigerador de diluição.

Caso os átomos de 3He não estivessem presentes na mistura, o bombeamento sobre a superfície do líquido na câmara de destilação levaria a temperatura da mesma até pouco abaixo de 1K, quando a pressão de vapor do 4He cairia praticamente a zero e, com ela, a potência de resfriamento por evaporação.

Com a diluição do 3He vindo da injeção na mistura superfluida, uma nova espécie atômica passa a atravessar toda a coluna líquida do sistema e fica disponível para evaporação no destilador. Este processo leva o sistema lentamente até por volta de 500mK, quando um último processo passa a dominar e resfria o sistema até sua temperatura mínima.

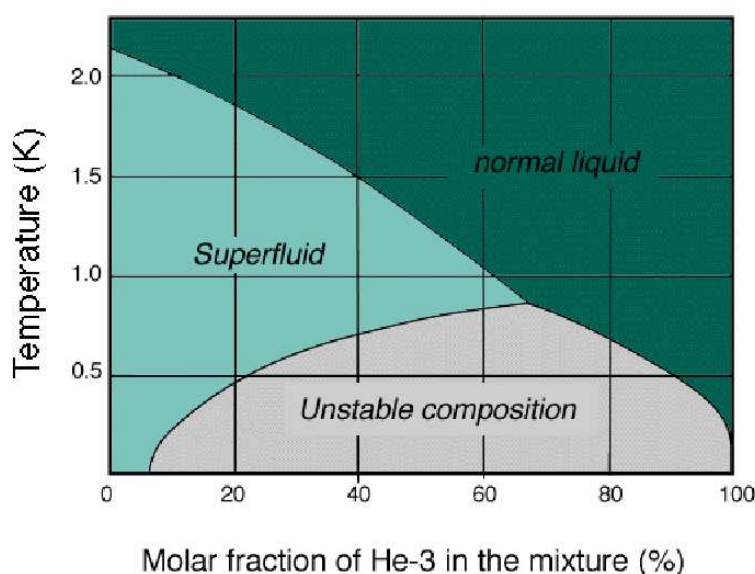


Figura 2.15: Diagrama de fases da mistura $^3He/^4He$.

A temperatura de separação de fases acontece por volta de 400mK para uma mistura de 25 por cento de 3He por setenta e cinco por cento de 4He . A partir deste ponto, formam-se duas fases na câmara de mistura, uma delas rica em 3He e outra rica em 4He , seguindo o diagrama acima.

Com a continuidade do bombeamento sobre o destilador, átomos de 3He são bombeados para fora da fase líquida, rica em 4He , desbalanceando o equilíbrio e fazendo com que novos átomos da fase rica em 3He tenham que se diluir na outra fase para reestabelecer o equilíbrio.

O processo de diluição exige um aporte de energia. Tal energia é retirada das paredes da câmara de mistura, que está em contato com o porta amostras. Enquanto a circulação de 3He for mantida a diluição continua, e o resfriamento também.

Mesmo a temperaturas muito baixas este sistema permanece eficiente pois o menor percentual de 3He diluído em 4He é de seis por cento, graças a algumas propriedades da mistura a nível quântico.

Este conjunto de processos e características permite manter o refrigerador em funcionamento contínuo com uma potência de resfriamento bastante respeitável (ordem de mW), possibilitando a realização de experimentos tão longos quanto os equipamentos possam ser mantidos ligados.

2.10.3

Controle de temperatura e aquisição de dados.

Após as primeiras cinco horas de operação, em geral, o refrigerador atinge sua temperatura mínima de operação, permitindo o início do experimento.

O controle de temperatura passa a ser feito por uma ponte AC capaz de ler os termômetros de monitoramento com correntes muito baixas, minimizando o aquecimento do sistema durante a leitura.

Um fio resistivo, enrolado no porta amostras, age como aquecedor. A ponte AC também controla a corrente neste fio, permitindo que potências tão pequenas quanto $1\mu W$ sejam aplicadas no sistema.

As resoluções da leitura dos termômetros, de medida do tempo e da corrente no aquecedor devem ser altas o suficiente para permitir o controle da temperatura em passos de décimos de mK, possibilitando grande estabilidade durante as medidas.

A faixa de maior estabilidade do sistema está entre sua temperatura mínima e 900mK. A partir de então as fases da mistura deixam de ser definidas e a injeção de calor pelo aquecedor desestabiliza o sistema, gerando fortes oscilações na temperatura. Artíficos como o fechamento da linha de injeção por volta de 1K, entre outros, permitem que a medida continue até 1,5K. A partir de então, vários fatores desconhecidos e não controláveis interferem na estabilidade, forçando o sistema a operar como um dedo frio caso se deseje seguir adiante.

Durante todo o experimento as medidas de resistividade são realizadas por uma ponte AC, modelo LR700, fabricada pela não mais operante Linear Research. Tal ponte pode ser ajustada para produzir correntes da ordem de $300\mu A$ que atravessam as amostras enquanto pares de terminais medem a queda de voltagem ao longo da amostra. Tal método, denominado quatro pontos, é largamente utilizado nesse tipo de caracterização.

Um computador notebook controla tanto a ponte de temperaturas quanto a de resistências e permite a automatização parcial do processo de medidas.

Problemas na operação

Vários fatores influenciam fortemente a operação deste tipo de refrigerador. A regra geral utilizada compara alguns parâmetros relevantes da operação anterior com a atual e permite diagnosticar superficialmente o estado do sistema.

Fatores como tempo de injeção, ruído, tempo da queda da temperatura de 4.2K para 1K e fluxo de mistura mostram claramente quando o sistema está deixando seu ponto ideal de operação.

As causas da degradação são as mais variadas mas as consequências costumam ser sempre as mesmas: entupimento dos capilares devido ao acúmulo de gases contaminantes, hidrocarbonetos, água, etc.

A armadilha fria, quando não evacuada periodicamente a quente, acaba por se saturar e permitir a passagem de outros gases e substâncias que, invariavelmente, atingem os capilares e impedâncias, obstruindo-os.

Alguns problemas de origem térmica ou elétrica também podem acontecer. A diferença de temperatura entre o destilador e a câmara de mistura pode chegar a 700mK durante a operação. Apesar disto, a fiação elétrica deve colocar os dois em contato térmico para permitir a leitura das amostras. O material utilizado para o contato elétrico deve ter sua condutividade térmica minimizada nesta faixa de temperaturas. Fios de manganina ou supercondutores são os eleitos para a função. A escolha de materiais inadequados impossibilita a operação do refrigerador e pode virar uma enorme dor de cabeça para o responsável por sua manutenção.

Contatos térmicos entre a fiação e a chaminé do destilador também devem ser evitados ao máximo pois podem elevar a temperatura da câmara a valores que incompatíveis com a manutenção da operação.

2.11

Sistema de aquisição

O sistema de aquisição de dados descrito neste capítulo foi concebido com vários objetivos em mente, entre eles:

- Se tornar uma solução flexível;
- Ter custo zero;
- Ser capaz de operar remotamente (via internet);
- Tornar transparente a comunicação via GPIB e via internet;
- Utilizar uma linguagem capaz de tratar dados com facilidade máxima;
- Manter o código fonte aberto e em domínio público, permitindo que outros desenvolvedores possam contribuir com novas e criativas soluções;
- Permitir que mais de um experimento seja controlado simultaneamente e pela mesma interface GPIB;

2.11.1

Sistema operacional

Para satisfazer tais objetivos, o sistema operacional escolhido foi o Linux, distribuição Fedora Core, e a linguagem de programação utilizada foi PERL. Ambos gratuitos e, também, com seus códigos fonte em domínio público.

Entre as maiores vantagens do Linux estão seu preço (nulo) e sua robustez e flexibilidade. Os elementos de seu sistema são facilmente integráveis, possibilitando o desenvolvimento de soluções rápidas e confiáveis.

2.11.2

Linguagem de programação

A linguagem PERL oferece inúmeras facilidades de tratamento de dados e texto. Entre elas opções de manipulação de listas e estruturas de dados não presentes em modo nativo em outras linguagens. Indo mais além, por ser uma linguagem interpretada, os programas não precisam ser compilados antes de serem executados, ganhando-se tempo de desenvolvimento.

2.11.3 Arquitetura do sistema

O controle dos instrumentos conectados via GPIB deve ser simples. Ao cientista que vai automatizar um experimento não interessa detalhes de comunicação com instrumentos, controles de erro ou interações com o sistema operacional.

O sistema aqui descrito foi projetado para simplificar ao máximo o problema do pesquisador, permitindo que ele focalize seus esforços na solução dos problemas científicos e que ele suponha com confiança que os problemas técnicos estão resolvidos.

O altíssimo custo relativo das interfaces GPIB também foi levado em conta, assim como o alto custo de manter um computador dedicado a cada experimento distinto, como na figura 2.16.

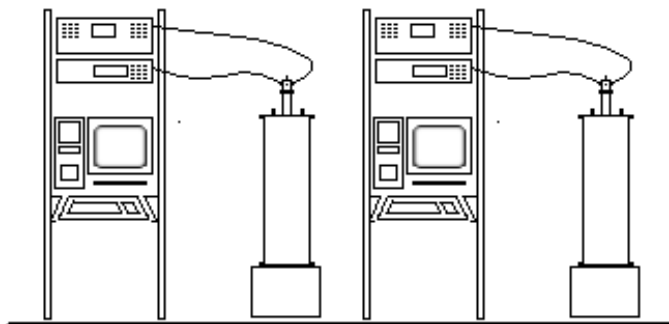


Figura 2.16: Sistema de aquisição tradicional: cada experimento é controlado por um computador com uma interface GPIB. O controle só pode ser feito localmente.

A solução encontrada foi o compartilhamento de um número mínimo de interfaces GPIB entre vários instrumentos, mesmo que pertencentes a experimentos distintos. Levou-se em conta a capacidade máxima de interligação de instrumentos por interface.

Para evitar conflitos entre programas distintos de controle, um único programa foi criado com a função de ficar responsável pelo serviço de organização da comunicação com os instrumentos ligados às interfaces GPIB. Tal programa, por prestar um serviço a outros programas, é chamado de servidor. Toda a complexidade da comunicação via GPIB é gerenciada por este servidor e pode ser ignorada pelo usuário do sistema.

A comunicação com o servidor é feita através de um protocolo e a transmissão de dados ocorre via TCP/IP, o protocolo por trás de toda a internet.

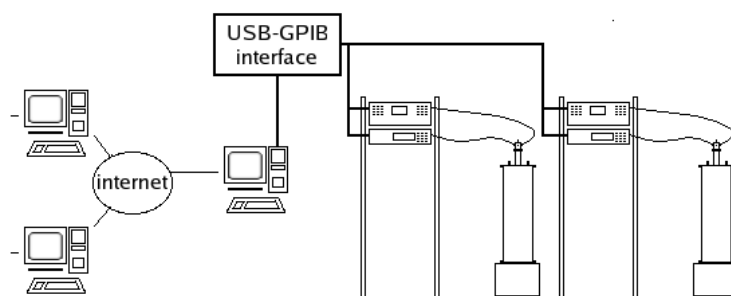


Figura 2.17: Sistema de aquisição proposto: vários experimentos são controlados por um computador com uma interface GPIB. Este computador está ligado à internet e os dados adquiridos via interface GPIB podem ser enviados a computadores remotos.

Para facilitar a programação um conjunto de funções foi criado e organizado num arquivo, normalmente chamado biblioteca. Tais funções lidam com todo o processo de comunicação com o servidor e, graças ao protocolo escolhido, podem ser executadas em outro computador, permitindo o acesso e o controle remotos dos instrumentos.

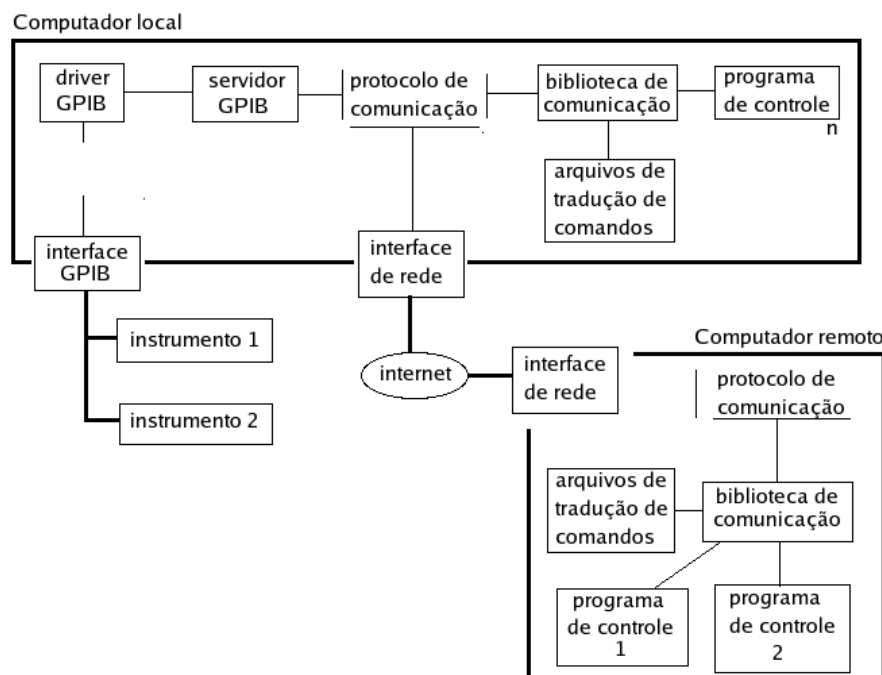


Figura 2.18: Diagrama de funcionamento do sistema de aquisição.

Como cada instrumento tem um conjunto de comandos próprio para controle via GPIB, um arquivo texto simples de ser gerado pelo usuário lista e organiza tais comandos, traduzindo-os para nomes mais confortáveis e significativos.

Aém de traduzí-los, a cada comando é associado um conjunto de funções que torna transparente todo o processo de comunicação entre o programa de controle e o instrumento a ser controlado, independentemente de quantos instrumentos estão sob controle e localização onde o programa está sendo executado. Um exemplo de tais arquivos pode ser visto na listagem 1

```
[HEAD]
  MANUFACTURER LakeShore
  TYPE Temperature Controller
  MODEL 340
[/HEAD]

[GPIB_COMMANDS] # Lista de comandos que n~{a}o retornam valores
# NOME_DADO_AO_COMANDO          COMANDO_GPIB_DO_INSTRUMENTO
  SET_PID          PID
  SET_SETPOINT     SETP
  SET_HEATER_RANGE RANGE
  SET_CONTROL_LOOP CSET
[/GPIB_COMMANDS]

[GPIB_QUERIES] # Lista de comandos que retornam valores
  QUERY_PID          PID?
  QUERY_SETPOINT     SETP?
  QUERY_HEATER_RANGE RANGE?
  QUERY_HEATER_OUTPUT HTR?
  QUERY_HEATER_STATUS HTRST?
  QUERY_CONTROL_LOOP CSET?
  QUERY_ID           *IDN?
  QUERY_KELVIN       KRDG?
[/GPIB_QUERIES]
```

Listagem 1: Conteúdo do arquivo de tradução de códigos de dispositivo GPIB do instrumento responsável pelo controle de temperatura. Outros instrumentos possuem arquivos similares.

A biblioteca de funções mencionada acima transforma estes nomes em comandos e os integra com as rotinas de comunicação com o servidor, deixando para o pesquisador apenas a função de utilizar tais comandos como quiser em seu programa, como se estivesse lidando diretamente com os instrumentos e sem se preocupar com os detalhes da comunicação de dados via GPIB ou internet. O exemplo da listagem 2 tenta tornar um pouco mais clara esta solução.

Tanto a biblioteca de comunicação quanto o servidor GPIB podem ser baixados do repositório CVS do website da sourceforge.net. A página do


```
#!/usr/bin/perl
use strict;
use lib "libs/";
use Instrument; # Carrega a biblioteca de comunicacao

# Cria um canal de comunicacao para o instrumento
# ligado ao endereco 19 do barramento GPIB e relaciona
# o arquivo de traducao de comandos LS340.dev a ele:

my $controlador_temp = Instrument->new (
    InterfaceType => 'GPIB',
    ConfigFile => 'devices/LS340.dev',
    PAD => 19, # endere\c{c}o GPIB primario
    SAD => 0,
    MINOR => 0,
    TIMEOUT => 11,
    SEND_EOI => 1,
    EOS_MODE => 0,
    Host => '152.84.252.152', # endere\c{c}o IP do servidor GPIB
    Port => 2343 );

# Usa o comando QUERY_KELVIN registrado no arquivo
# de traducao de comandos deste instrumento para ler
# a temperatura:

$temporatura = &{$controlador_temp->{QUERY_KELVIN}};
print "A temperatura no criostato eh $temporatura.";
```

Listagem 2: Exemplo de programa para ler a temperatura de um criostato através de um controlador LakeShore 340 ligado a um computador onde o servidor GPIB está funcionando. O programa deste exemplo poderia estar sendo executado em outro computador remoto sem sofrer alterações.

projeto é:

<http://sourceforge.net/projects/perl-lab>

Este sistema foi depositado lá sob o nome perl-lab e tem seu código fonte divulgado sob a licença artística, a mesma que controla a linguagem PERL. Contribuições ao código que objetivem sua otimização são altamente bem vindas e devem ser compartilhadas com toda a comunidade.