

AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIDAS DE FORÇA DE LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Paulo Vinícius Alves Ferreira

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.
(Orientador)

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.
(Co-orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2008

Resumo

Este trabalho tem seu foco na automatização de um sistema de medida de força. Este sistema de medidas pode ser utilizado para a caracterização de mancais magnéticos supercondutores. Este sistema de medidas previamente funcionava manualmente e as medidas se tornavam muito demoradas, além disso, as medidas apresentavam erros devido a algumas imperfeições mecânicas do sistema. A motivação para automatizar este sistema de medidas foi diminuir o tempo de realização de medidas e obter a curva força vs. distância do mancal magnético supercondutor.

Para a construção deste sistema de medidas foi necessário um acionador linear, um motor de passo, uma célula de carga e um PC para controlar o motor de passo e adquirir os dados de força provenientes da célula de carga.

Durante a realização deste trabalho foram construídos dois sistemas de medidas. O primeiro sistema de medidas apresentava algumas imperfeições que comprometiam alguns resultados de medidas com os mancais magnéticos.

As medidas realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho com os dois sistemas de medidas mostram que o antigo sistema apresenta o caráter histerético de mancais magnéticos supercondutores. Porém apresenta erros de medida causados por deformações mecânicas em sua guia linear para forças superiores a 200 N. Além da comparação entre os sistemas de medidas, este trabalho compara duas topologias de mancais magnéticos supercondutores com o novo sistema. As medidas mostram que esses mancais sofrem forças de repulsão diferentes para espaçamentos entre rotor e estator do mancal inferiores a 10 mm.

Índice

1. Introdução	1
2. Supercondutividade e Mancais Magnéticos Supercondutores.....	4
2.1. Supercondutividade	4
2.2. Mancais Magnéticos Supercondutores	9
3. Sistema de medidas de força de levitação magnética	12
3.1. Motor de passo	15
3.2. Controle do motor de passo e aquisição de dados.....	21
3.2.1. Micro-controladores.	21
3.2.2. Utilização de placa de aquisição de dados para implementação do sistema de medidas usando o Simulink (MATLAB®).	24
3.2.3. Acionamento do motor de passo	25
3.2.3.1. Motor de passo unipolar	26
3.2.3.2. Motor de passo bipolar	29
3.2.4. <i>Driver</i> de Potência	30
3.2.5. Células de carga.....	31
3.2.5.1. Princípios de Funcionamento	32
3.2.5.2. Calibração da Célula de Carga	35
4. Resultados	41
4.1. Visualização do caráter histerético do supercondutor.	41
4.2. Comparação das curvas força vs. distância entre os sistemas de medidas construídos.	43
4.3. Comparação de forças entre as topologias de mancais magnéticos supercondutores ..	44
5. Conclusões	46
6. Trabalhos Futuros	48
7. Referências	49

Figuras

Figura 1 - Heike Kamerlingh Onnes	4
Figura 2 - Curva de Resistência x Temperatura do Hg	5
Figura 3 - Cronologia da descoberta de supercondutores com altas temperaturas críticas ...	6
Figura 4 - Comparação da penetração de campo em um condutor normal e um supercondutor	7
Figura 5 - Magnetização x Indução magnética de supercondutores - (a) Tipo I. (b) Tipo II	8
Figura 6 - C.W. Chu	8
Figura 7 - Rotores de Imã permanente (a) Configuração CF. (b) Configuração AMA.	10
Figura 8 - Distribuição dos supercondutores no mancal	10
Figura 9 – Distribuição das linhas de indução magnética das topologias de mancais magnéticos. (a) CF. (b) AMA.....	11
Figura 10 - Sistema de medidas Manual	13
Figura 11 – (a) Peça de aço <i>inox</i> para acoplamento do motor de passo. (b) Motor de passo acoplado.	14
Figura 12 – Acoplamento do eixo do motor de passo.	14
Figura 13 - Fuso de esfera.....	15
Figura 14 - Esquema Bidimensional do Sistema de Medidas.....	15
Figura 15 - Esquema de pulsos do motor de passo.	16
Figura 16 – Operação elementar de um motor de passo	17
Figura 17 – Característica Conjugado vs. freqüência do motor de passos	18
Figura 18 – Sistemas de medidas.	20
Figura 19 - Hardware do Basic Step 1	21
Figura 20 - Pinagem do Basic Step 1.	22
Figura 21 - Conector DB9 da Porta Serial	22
Figura 22 - Hardware do Basic Step M8	23
Figura 23 - Pinagem do micro controlador Basic Step M8	23
Figura 24 – Borneira Placa de Aquisição de dados Advantech PCI-1711.....	25
Figura 25 - Motor de passo unipolar	26
Figura 26 – Esquema de bobinas do motor Kalatec.	27
Figura 27 – Ligação série de duas bobinas motor Kalatec 5034.....	27
Figura 28 – Motor de passo bipolar	30
Figura 29-Esquema de acionamento de uma fase do motor de passos.....	31
Figura 30 - Strain Gage ou Extensômetro.....	33
Figura 31 – Ponte de Wheatstone	33

Figura 32 - Gráfico de Deformação vs. Carga, mostrando histerese, repetibilidade e não linearidade	33
Figura 33 - Gráfico de Deformação vs. Tempo mostrando a "relaxação" ou <i>creep</i>	34
Figura 34 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na célula – Célula de carga 5A.....	36
Figura 35 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na célula – Célula de Carga 5B.....	37
Figura 36 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 10 kg... 38	
Figura 37 - Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 50 kg....	39
Figura 38 - Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 200 kg..	40
Figura 39 - Dinâmica do processo ZFC	41
Figura 40 – Curva força vs. distância em ZFC aplicado ao mancal AMA com o sistema antigo apontando a região de histerese do supercondutor.	42
Figura 41 - Curva força vs. deslocamento em ZFC de um mancal AMA com deformação no sistema de medidas.	43
Figura 42 - Curva força vs. deslocamento no sistema de medidas novo.....	44
Figura 43 - Curva força vs. deslocamento das duas topologias de mancais supercondutores.	45

Tabelas

Tabela 1 - Tabela de seqüência de 8 passos - Passo Inteiro	27
Tabela 2 - Seqüência de acionamento passo inteiro com torque 50% maior	28
Tabela 3 - Acionamento meio passo do motor de passo	29
Tabela 4 - Acionamento bipolar do motor de passo	30
Tabela 5 - Tabela de constantes das células de carga.	40

Abreviaturas

AMA - Anéis Magnetizados Axialmente

CF - Concentrador de fluxo

ZFC - *Zero Field Cooling* (Resfriamento em campo zero).

T_c - Temperatura Crítica.

B_c - Indução Magnética Crítica.

I_c - Corrente Crítica.

1. Introdução

O objetivo principal deste trabalho é apresentar a automatização de um sistema de medidas de força de levitação magnética para mancais magnéticos supercondutores, construído no Laboratório de Aplicação de Supercondutores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Este sistema pode auxiliar em algumas etapas os diversos projetos existentes neste laboratório, em especial os projetos do armazenador cinético de energia (Flywheel) [1] e do trem de levitação magnética [2][3].

O Flywheel é um sistema de armazenamento de energia cinética que consiste em uma massa acoplada a um motor-gerador elétrico capaz de converter energia elétrica em cinética e vice-versa [1]. Esta massa é o rotor e permanece em movimento com alta velocidade mantendo a energia do sistema como energia cinética proporcional ao momento de inércia do flywheel e ao quadrado da velocidade angular. Portanto, com o aumento da velocidade angular a energia armazenada aumenta, porém as perdas também aumentam. Para reduzir as perdas por arraste de ar, este sistema é encapsulado em uma câmara a vácuo e a perda por atrito no mancal é resolvida empregando-se mancais magnéticos supercondutores.

O Mancal magnético supercondutor é um conjunto formado por um disco de ímãs permanentes e blocos de supercondutores. Os supercondutores são fixados em uma base constituindo o estator do mancal. O disco de ímãs permanentes é a parte móvel do mancal, sendo então denominada de rotor.

O trem de levitação magnética é um sistema baseado nas propriedades de um mancal magnético supercondutor [2]. O protótipo deste sistema foi construído no Laboratório de Aplicações de Supercondutores e é composto por um mancal magnético supercondutor linear e um motor síncrono linear. O mancal magnético supercondutor linear é formado pelo criostato onde estão alocados os supercondutores e um trilho constituído de ímãs permanentes. Neste caso a parte móvel contém supercondutores diferentemente da flywheel.

Inicialmente, as medidas de força eram feitas manualmente através de uma manivela [4], porém estas medidas apresentam problema de reprodutibilidade. Para solucionar este problema, é que este trabalho apresenta a automatização deste sistema utilizando um motor de passo com um sistema de acionamento em substituição a manivela.

Durante grande parte deste trabalho, o acionador linear utilizado no sistema automatizado era o mesmo do sistema manual e apesar das melhorias obtidas nas

medições, para forças superiores a 100 N, o acionador linear sofria uma deformação que comprometia a repetibilidade das medidas do sistema [4]. O acionador linear sofreu evoluções e a comparação dos resultados dos dois acionadores será mostrada no capítulo 5.

O motor de passo é um dispositivo já bastante utilizado em sistemas que necessitam de precisão no controle de posição como mesas gráficas, *plotters* e braços mecânicos. Uma grande vantagem para este dispositivo é sua total adaptação à lógica digital podendo então se criar uma interface entre a CPU e movimentos mecânicos.

A célula de carga é usada como instrumento de medição com aplicações desde balanças comerciais até a automação de processos industriais. Este dispositivo quando submetido a uma força, sofre uma deformação detectada por uma ponte de *strain gage* que gera sinais de tensão proporcionais a força aplicada.

Na última etapa deste sistema de medidas está a aquisição dos dados de força que foi feita de duas formas diferentes. Primeiramente, foi utilizado um micro controlador que dispunha de entradas analógicas e um conversor A/D que possibilita o tratamento dos dados. Porém, a aquisição de dados através de uma placa de aquisição de dados que tem interface com MATLAB® tornou a medida mais simples e hoje é a forma de aquisição utilizada no sistema de medidas.

Para fins de comparação, neste trabalho são feitas medidas de força com duas topologias diferentes de rotores dos mancais magnéticos supercondutores. A configuração AMA (anéis magnetizados axialmente) e a configuração CF (concentrador de fluxo).

Os capítulos deste texto estão dispostos da seguinte maneira:

No capítulo 2, apresenta-se uma breve introdução ao estudo da supercondutividade e suas propriedades. Neste capítulo também é apresentado o mancal magnético supercondutor que é um objeto de estudo deste trabalho pois a medida pois este sistema foi desenvolvido para caracterizar estes mancais.

No capítulo 3, é apresentado todo o sistema de medida construído para medir a força entre o rotor magnético e o bloco de supercondutores em função do espaçamento entre essas duas partes. Este sistema de medidas é composto por um motor de passo, uma guia linear, uma célula de carga e uma placa de aquisição de dados para a obtenção dos sinais da força de levitação magnética provenientes da célula de carga. Portanto existe uma divisão no sistema em duas partes, que são: o acionador linear e o sistema de controle do motor de passo e aquisição de dados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados das medidas de força de levitação magnética do mancal em função da distância entre o rotor de imã permanente e a base supercondutora, comparando as medidas realizadas com as duas topologias de mancais. Também são apresentadas medidas realizadas com as duas guias lineares mostrando as diferenças entre elas. Em todos os resultados ainda pode ser constatado o caráter histerético da força de levitação dos mancais magnéticos supercondutores de acordo com a forma da curva de força x distância.

No capítulo 5, são discutidos os resultados obtidos e apresentados alguns passos importantes de melhoria para este sistema de medidas como o acionamento bipolar do motor de passo.

2. Supercondutividade e Mancais Magnéticos Supercondutores

2.1. Supercondutividade

O fenômeno da supercondutividade foi observado pela primeira vez na cidade de Leiden, Holanda, pelo cientista Heike Kamerlingh Onnes [5]. Em 1908, uma equipe liderada por ele conseguiu obter a liquefação do gás hélio que ocorre a 4,2 K (-268,8° C) e devido a esse feito, Onnes passou a dedicar-se ao estudo das propriedades elétricas dos metais em temperaturas muito baixas, empregando o hélio líquido como fluido refrigerante.

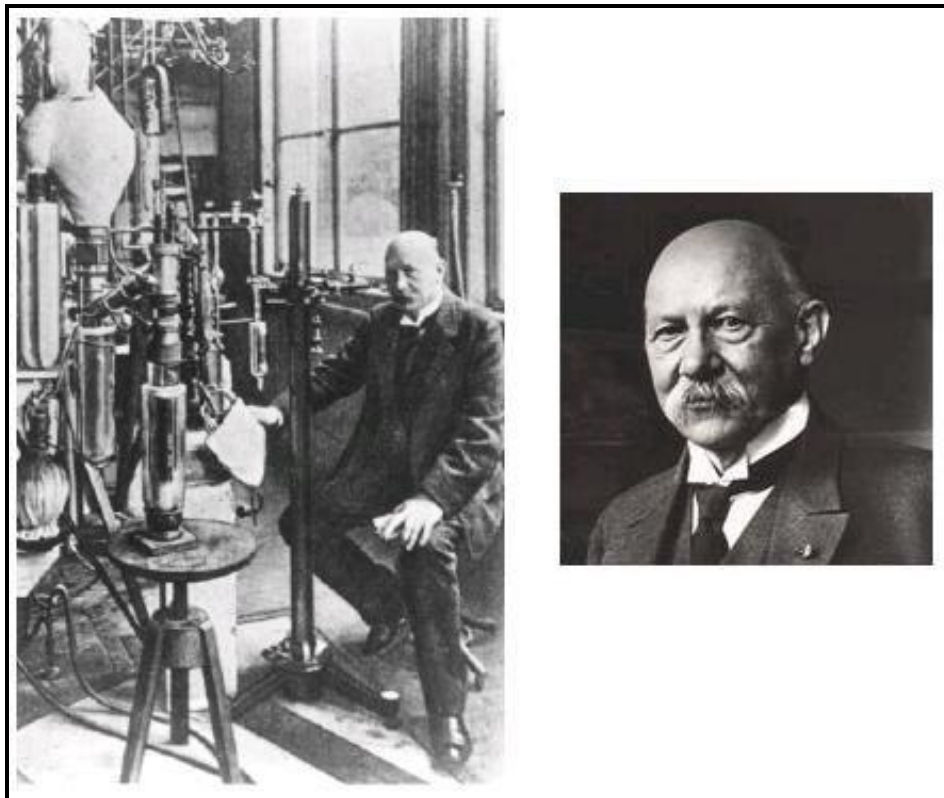


Figura 1 - Heike Kamerlingh Onnes [6] [7].

Em 1911, Onnes estudava a variação da resistência elétrica de uma amostra de mercúrio em função da temperatura quando observou o fenômeno do súbito desaparecimento da resistência elétrica próximo a temperatura de 4,2 K como mostra a figura 2.

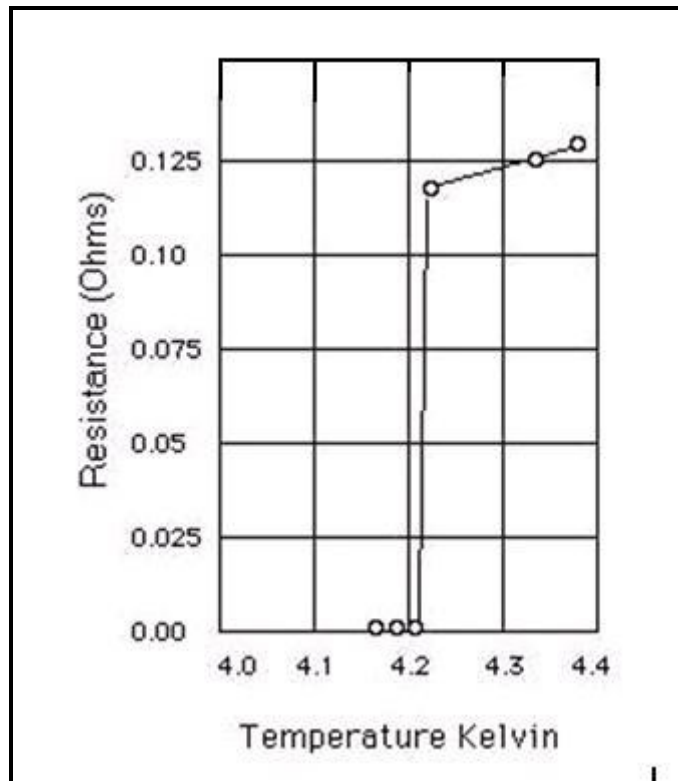


Figura 2 - Curva de Resistência x Temperatura do Hg [8].

Onnes então interpretou que o mercúrio passava de um estado resistivo normal para um estado *supercondutor* onde a resistividade abruptamente passa a ser nula abaixo de uma dada temperatura denominada *temperatura crítica* (T_c).

Em 1912, Onnes e sua equipe descobrem que a supercondutividade não era uma propriedade específica do mercúrio com a descoberta desta propriedade no estanho e no chumbo. Daí por diante, essa propriedade da supercondutividade foi descoberta em vários outros sistemas supercondutores como mostra a figura 3.

Os estudos sobre a supercondutividade renderam à Onnes o prêmio Nobel de Física em 1913.

Um marco importante na história da supercondutividade foi a descoberta em 1986 de supercondutores com elevada temperatura crítica que revolucionou o campo de pesquisa sobre supercondutividade. Além disso, os supercondutores com alta temperatura crítica possibilitaram a utilização de líquidos refrigerantes mais baratos, como o nitrogênio líquido, cuja produção demanda um menor gasto de energia.

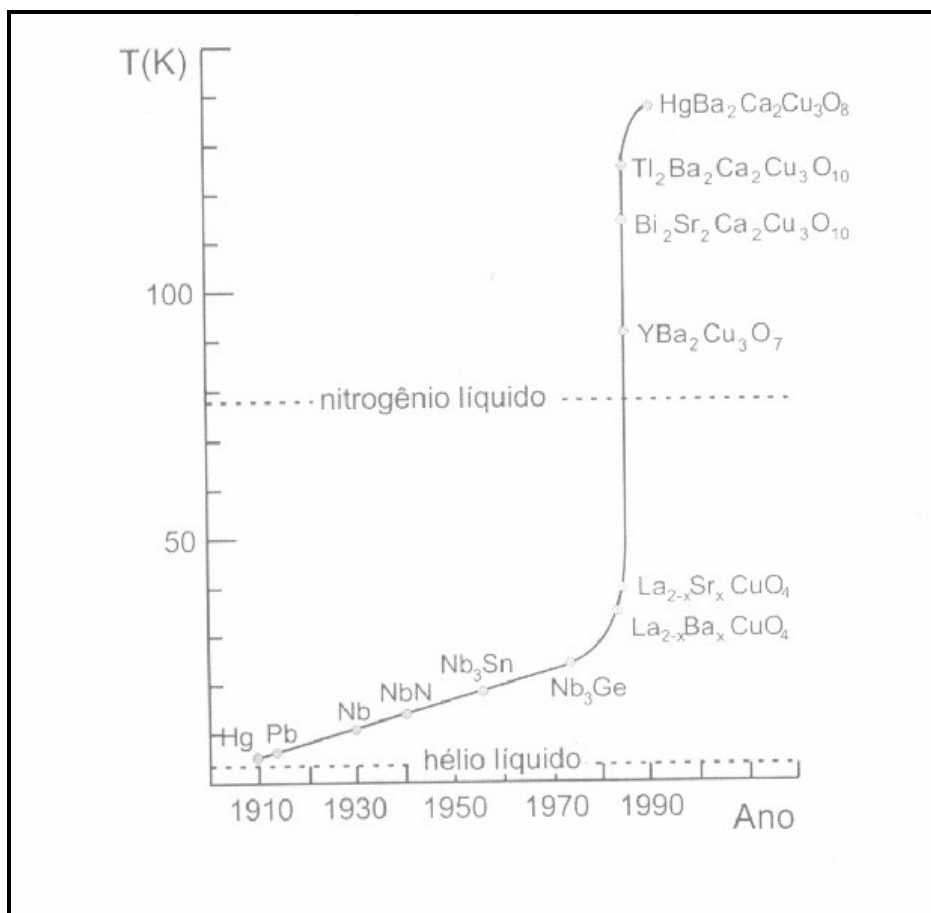


Figura 3 - Cronologia da descoberta de supercondutores com altas temperaturas críticas [5].

A total inexistência de resistividade elétrica em um supercondutor em temperaturas abaixo de T_c é a propriedade mais conhecida destes elementos. Uma outra propriedade dos supercondutores é que acima de um determinado valor de campo magnético ou corrente elétrica o supercondutor mesmo abaixo da temperatura crítica, passa a se comportar como um condutor normal apresentando um valor de resistência diferente de zero. Estas propriedades são o campo magnético crítico (H_c) e a corrente crítica (I_c). Portanto quando submetido a um campo magnético superior a H_c , a temperatura em que a resistência elétrica se anula diminui e se este campo for extremamente forte, ele pode suprimir totalmente o estado supercondutor.

Quando percorrido por uma corrente elétrica (contínua) também superior a um valor crítico, o estado supercondutor também é destruído. Nos elementos supercondutores, o valor crítico para esta corrente está relacionado ao valor do campo magnético produzido pela própria corrente na superfície da amostra [5].

Uma outra propriedade do supercondutor é o chamado *Efeito Meissner* que foi descoberto em 1933 por Walther Meissner e Robert Ochsenfeld [5]. Aplicando-se um campo magnético fraco no elemento supercondutor em seu estado normal ($T > T_c$) e depois e

depois resfriando-o a uma temperatura abaixo da crítica, pode-se observar a expulsão do fluxo magnético do interior do material, ou seja, o supercondutor comporta-se como um diamagneto perfeito. Este estado de diamagnetismo perfeito é chamado de Efeito *Meissner*.. A figura 4 ilustra o *Efeito Meissner*.

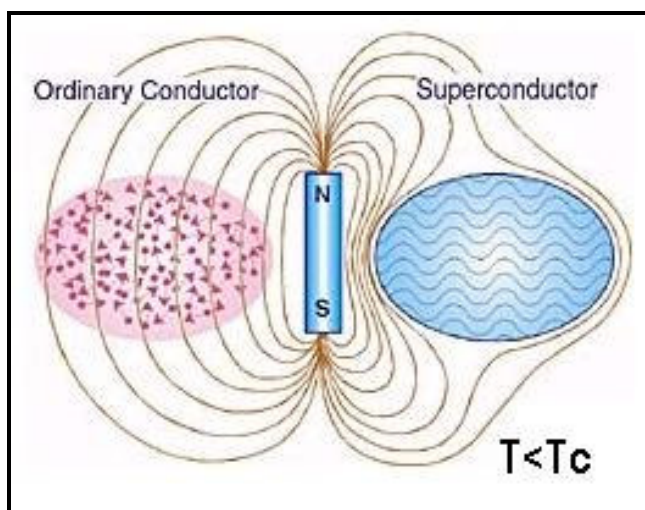


Figura 4 - Comparação da penetração de campo em um condutor normal e um supercondutor [9].

Os supercondutores como um todo, apresentam o efeito Meissner até um determinado valor pequeno de campo magnético. Para valores mais elevados de campo, são observados comportamentos diferentes por parte dos supercondutores o que leva à necessidade de classificar esses elementos por tipo de comportamento. Existem então os supercondutores do tipo I e do tipo II.

Os supercondutores do tipo I apresentam apenas dois estados: o efeito Meissner e o estado normal, isto é, ele expulsa o fluxo magnético de seu interior até o momento em que o campo magnético aplicado a ele é inferior a B_C , com o campo crítico atingido, este tipo de supercondutor passa ao estado normal.

Já os supercondutores do tipo II possuem um estado intermediário entre os dois estados do tipo I. Na verdade estes elementos têm dois campos críticos B_{C1} e B_{C2} onde quando o primeiro é atingido, o fluxo magnético penetra parcialmente no supercondutor só penetrando completamente quando B_{C2} é atingido. Este estado intermediário é denominado Estado Misto ou Estado de Vórtices pelo fato de se formar uma estrutura que é análoga aos vórtices formados por fluídos em escoamento turbulento [5]. A figura 5 mostra o comportamento da magnetização dos dois tipos de supercondutores.

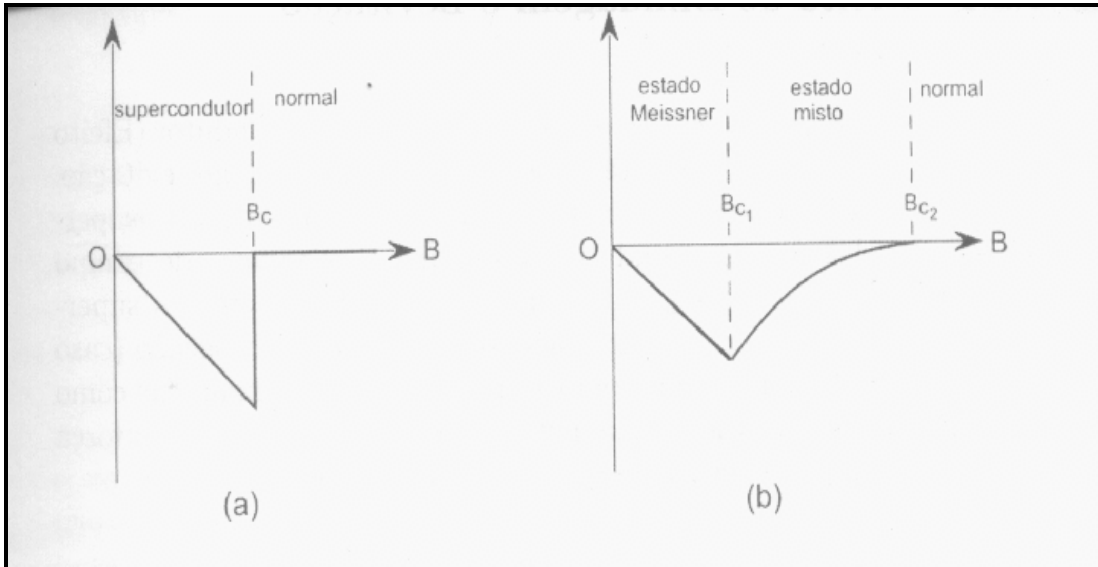


Figura 5 - Magnetização x Indução magnética de supercondutores - (a) Tipo I. (b) Tipo II [5].

O segundo campo crítico muitas vezes é muito maior que o primeiro, tornando o uso do supercondutor do tipo II muito mais útil para aplicações tecnológicas. Este é o caso deste trabalho que utiliza amostras supercondutoras do tipo II como componente do mancal magnético supercondutor (ver capítulo 3).

A expulsão de fluxo magnético do interior de um supercondutor pode ser usada para gerar forças magnéticas de levitação [5]. A levitação magnética permite então que uma fonte de campo magnético levite sobre um supercondutor e vice-versa. A primeira situação é a configuração de um mancal magnético supercondutor onde um disco de imã permanente levita sobre uma base supercondutora. E este assunto será mais bem detalhado na seção 2.2.



Figura 6 - C.W. Chu [10].

Em 1987 houve uma descoberta por parte de C.W. Chu e sua equipe, que significou mais um grande avanço para que o estudo da supercondutividade fosse cada vez mais disseminado pelo mundo. Trata-se da descoberta do $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ (pronunciado “ibaco”),

referido também por YBCO. Este supercondutor apresenta uma temperatura crítica de 92 K aproximadamente, podendo ser resfriado pelo nitrogênio líquido que tem uma temperatura de ebulição de 77 K. O YBCO permitiu a redução nos custos de estudos e experiências realizadas com supercondutores possibilitando aplicações tecnológicas diversas. Este material é utilizado neste trabalho para formar a base supercondutora do mancal magnético supercondutor.

2.2. Mancais Magnéticos Supercondutores

Os mancais magnéticos supercondutores baseiam-se na interação entre materiais supercondutores e ímãs permanentes. Além da força de repulsão entre o ímã e o supercondutor devido à propriedade diamagnética do material, pode existir também uma força de atração devida ao aprisionamento de fluxo magnético no interior do supercondutor. Esta força de atração depende da condição de resfriamento e/ou do histórico magnético do supercondutor e permite variar a rigidez do mancal [11].

A auto-estabilidade mecânica dos mancais supercondutores é uma grande vantagem sobre os outros dispositivos de levitação magnética. Essa estabilidade torna o sistema totalmente passivo, dispensando a necessidade de utilizar um sistema de controle e monitoramento da posição para a operação do mancal supercondutor, diferentemente do caso dos mancais eletromagnéticos ativos. Uma dificuldade encontrada para a implementação desses mancais é o elevado custo dos blocos supercondutores. Por exemplo, um bloco cilíndrico com 28mm de diâmetro e 10mm de altura custa da ordem de US\$ 300,00 [11].

Os mancais supercondutores podem ser empregados em sistemas como a flywheel, ultracentrífugas, máquinas elétricas de alta velocidade com alto desempenho, sistemas posicionadores para satélites e telescópios [12].

Para este projeto, o material supercondutor utilizado foi o YBCO como dito na seção 2.1. Para uma levitação estável, é necessário que o fluxo magnético seja aprisionado no YBCO, pois de outra forma o ímã permanente não tem uma levitação estável [4].

Para os testes do sistema de medida construído, foram realizadas medidas de força de levitação em dois mancais magnéticos supercondutores rotativos com diferentes topologias de distribuição do campo magnético nos rotores de ímãs permanentes. Ambos os mancais possuem um rotor com um arranjo de ímãs permanentes de Nd-Fe-B (figura 7) e um estator com blocos supercondutores de YBCO, texturizados por fusão semeada, refrigerados por nitrogênio líquido (figura 8). As duas topologias de mancais

supercondutores são apresentadas na figura 7 e são denominadas de: Concentrador de Fluxo (CF), figura 7a, e Anéis Magnetizados Axialmente (AMA), figura. 7b. Para uma melhor comparação entre as duas configurações de mancais de escora estudadas, ambas topologias apresentam o mesmo volume total de ímã permanente [12].

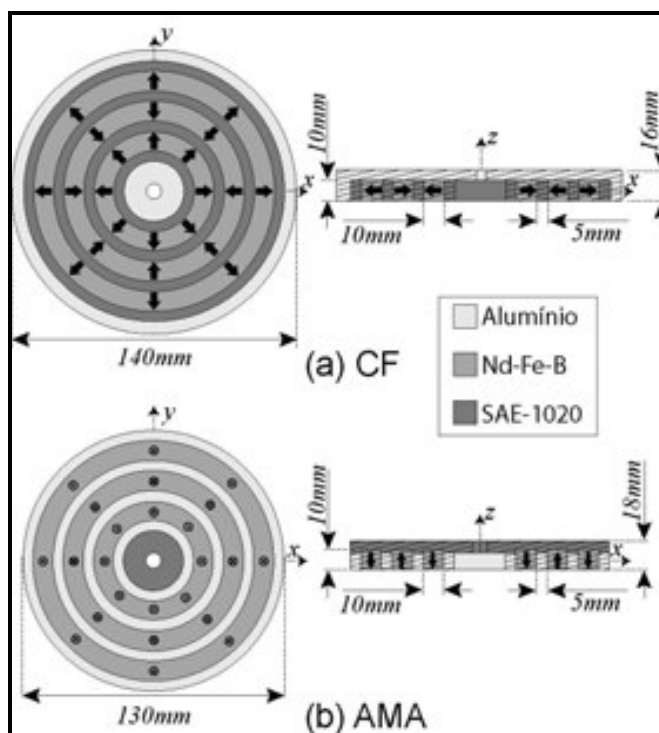


Figura 7 - Rotores de Ímã permanente (a) Configuração CF. (b) Configuração AMA [11].

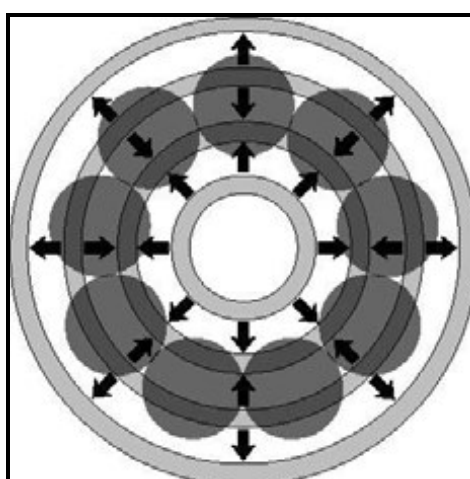


Figura 8 - Distribuição dos supercondutores no mancal [11].

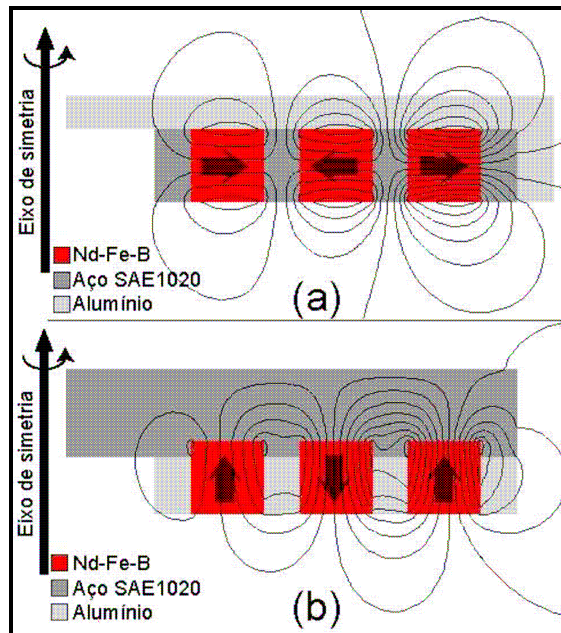


Figura 9 – Distribuição das linhas de indução magnética das topologias de mancais magnéticos. (a) CF. (b) AMA

No capítulo 5 são mostradas curvas comparativas de força vs. distância destes mancais para que se possa observar diferença de força de repulsão entre cada mancal e a base supercondutora.

3. Sistema de medidas de força de levitação magnética

O sistema de medidas de força de levitação magnética consiste basicamente de um motor de passo acoplado a uma guia linear, que movimentava na direção axial um sensor de força (célula de carga) acoplado ao mancal a ser medido. O acionador também pode ser acoplado a outro tipo de sensor, por exemplo, o sensor Hall para mapeamento unidimensional de campo. Neste trabalho este conjunto motor de passo-guia linear é utilizado para movimentar o rotor de material magnético (Nd – Fe – B), que compõe um mancal magnético supercondutor com o intuito de medir a força de repulsão entre este rotor e a base do mancal composta por supercondutores. Esta força entre o rotor e o bloco supercondutor é medida através de uma célula de carga que envia sinais de tensão proporcionais à força exercida sobre ela para uma placa de aquisição analógico-digital ou a uma entrada analógica de um micro-controlador. Este sistema é capaz de obter a curva da força de levitação em função da posição de um mancal supercondutor.

Este sistema pode ser separado em duas partes para ser melhor detalhado. A primeira parte é o acionador linear, onde é ressaltada toda a parte dinâmica do sistema como a rotação do motor de passo e a translação do acionador linear bem como a relação existente entre esses dois movimentos, e os parâmetros pertencentes à cada um. Isto permite a determinação da relação entre a distância percorrida pelo rotor de ímã permanente e o número de passos do motor. A segunda esclarece toda a parte de controle de acionamento do motor de passo, a passagem do estágio de controle para o de potência, a aquisição dos dados de força e a obtenção da curva de força vs. distância.

O acionador linear, basicamente, trata de toda a parte da movimentação de seus componentes. O acionador linear deste sistema era acionado através de uma manivela como pode ser vista na figura 10. Este foi o primeiro protótipo do sistema, porém o processo de medição da força era bastante demorado tendo que girar a manivela uma volta completa e esperar alguns minutos para depois dar outra volta completa. Conforme o disco fosse se aproximando do bloco supercondutor era dada uma meia volta por vez na manivela, o que exigia máxima atenção e também paciência por parte de quem executasse as medidas. Uma vez ocorrido um erro, todos esses passos teriam que ser repetidos e as amostras supercondutoras teriam que ser retiradas do banho em nitrogênio líquido (pois devido ao caráter histerético a medida depende da história magnética dos supercondutores) para depois resfriá-las novamente até que a transição para o estado supercondutor ocorra, quando se reiniciam as medidas.

A solução para este problema foi a utilização de um motor de passo no sistema de medidas. A principal vantagem da implementação do motor de passo sem dúvida é a redução considerável do tempo de realização da medição além de permitir uma precisão muito maior no controle de posição do rotor magnético.

Para acoplar o motor à guia linear no lugar da manivela, foi necessária a confecção de uma peça de aço inox para a fixação ao eixo do motor e uma peça para fixar e dar sustentação ao motor. As figuras 11 e 12 possibilitam a visualização das peças usadas para o acoplamento.

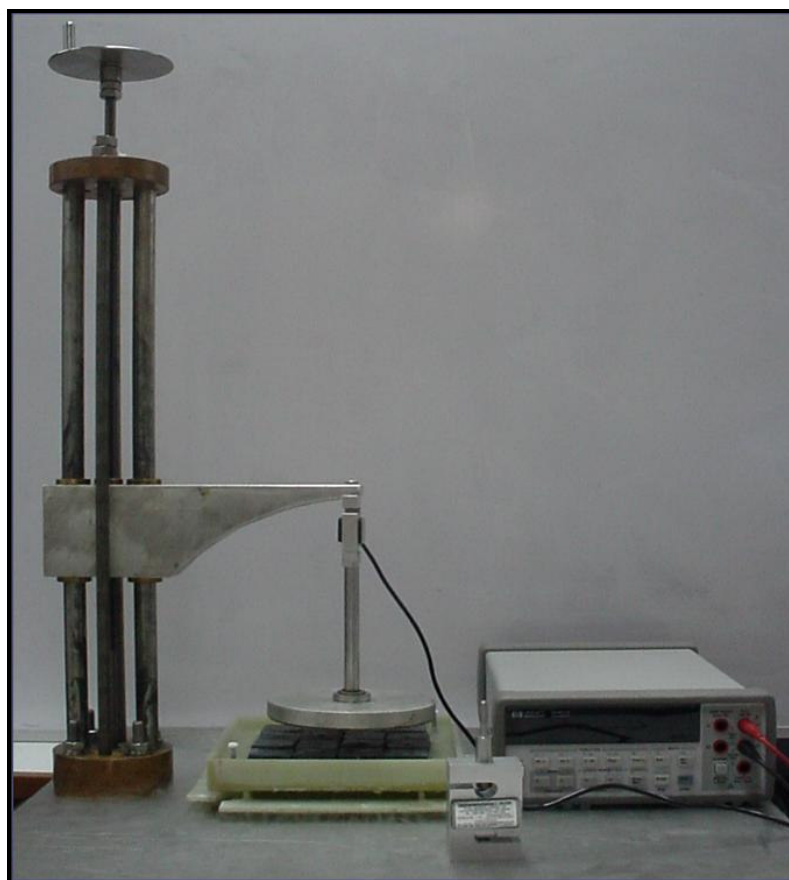


Figura 10 - Sistema de medidas Manual [4].

O motor de passo quando acionado movimentava a guia linear que está acoplado ao eixo do mesmo. O novo sistema de medida foi construído utilizando um fuso de esferas, que quando submetido a uma rotação, transforma este movimento de rotação em movimento linear. O fuso de esfera pode ser visto na figura 13.

Esta movimentação é feita através de um motor de passo com acionamento monopolar, cujos detalhes são apresentados na seção 3.1. O acionador garante o movimento de translação do rotor na direção axial. Acoplado ao sistema está a célula de carga, que por sua vez acopla-se ao rotor magnético possibilitando a medição da força de levitação.

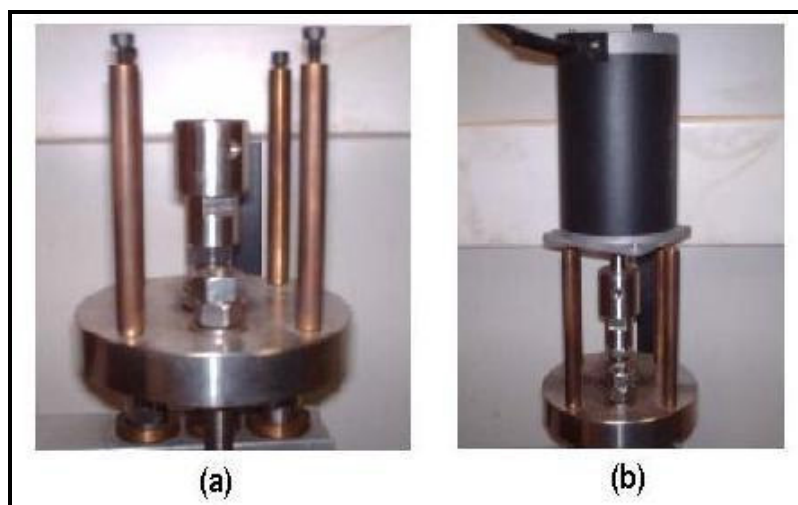


Figura 11 – (a) Peça de aço *inox* para acoplamento do motor de passo. (b) Motor de passo acoplado.



Figura 12 – Acoplamento do eixo do motor de passo.

Para uma melhor visualização do sistema, na figura 14 é mostrado um esquema ilustrativo da parte mecânica.

A célula de carga possui uma resistência elétrica variável que é proporcional à deformação sofrida quando submetida a forças. Quando a célula de carga então é comprimida, gera um sinal positivo de tensão devido à variação de sua resistência e quando estendida, um sinal negativo de tensão é gerado. Sendo assim, quando a guia linear é movida, permite a aproximação ou afastamento do disco magnético em relação aos supercondutores que encontram-se fixos na base do sistema.



Figura 13 - Fuso de esfera.

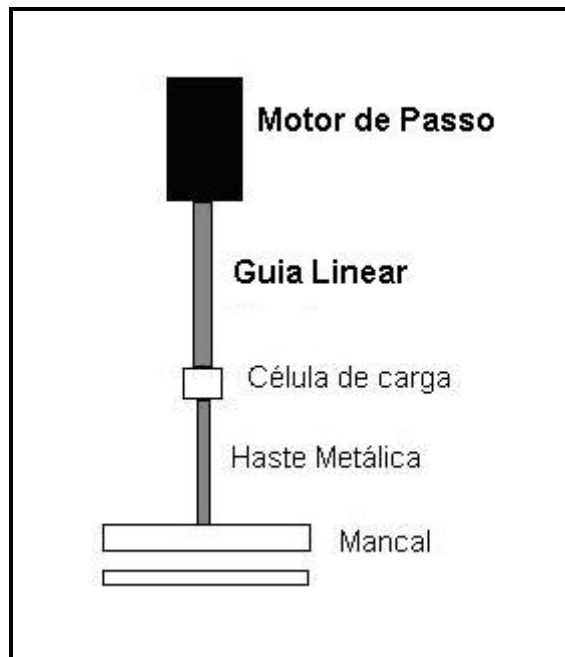


Figura 14 - Esquema Bidimensional do Sistema de Medidas.

3.1. Motor de passo

O motor de passo é um dispositivo que se adapta muito bem à lógica digital e por isso sua popularidade em sistemas dinâmicos é muito grande. Neste sistema de medidas, o motor de passo é usado para movimentar o eixo de uma guia linear para que este possa transformar os movimentos rotacionais do motor de passo em movimentos translacionais.

Vários periféricos de computadores utilizam motores de passo em inúmeras aplicações, como mesas gráficas, unidades de disco, plotters e etc. Não só na Informática, mas também na robótica esses motores estão sendo cada vez mais usados, em sistemas de movimentação de braços mecânicos e etc. Com o auxílio desses motores, podem-se criar interfaces entre o computador e o movimento mecânico, constituindo, em suma, a chave para a Robótica [13].

O motor de passo é um tipo de motor síncrono projetado para girar apenas um ângulo especificado para cada pulso elétrico recebido na unidade de controle [14]. É um dispositivo eletromagnético, que processa uma informação digital para realizar um ato desejado, neste caso um movimento. Esta é a principal característica de um motor de passo. A cada pulso, ele faz um incremento angular (passo). Cada passo é só uma porção de uma rotação completa. Então, vários pulsos devem ser aplicados para alcançar o ângulo de rotação desejado do eixo.

A figura 15 apresenta um esquema em que mostra um pulso somente com o deslocamento angular nominal do motor de passos, e também uma seqüência de pulsos indicando que o motor sofreu vários incrementos angulares.

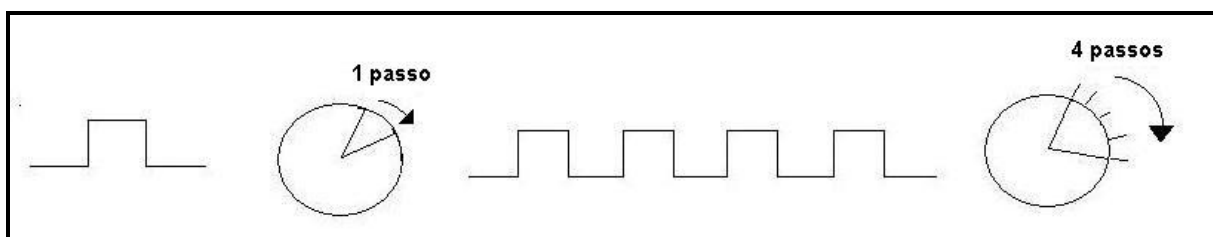


Figura 15 - Esquema de pulsos do motor de passo.

Nos sistemas de controle digital citados acima, o motor recebe comandos em malha aberta, na forma de um trem de pulsos, para girar um eixo ou mover uma placa de uma distância especificada. Ele converte mecanicamente os pulsos digitais em incrementos de rotação do eixo. A rotação não só tem uma relação direta ao número de pulsos, mas sua velocidade é relacionada à freqüência dos mesmos. Com um motor de passo, normalmente não é necessário um sistema de sensor de posição e realimentador para fazer com que o atuador de saída siga as instruções de entrada. Entre cada passo, o motor pára na posição (com sua carga) sem a ajuda de embreagens ou freios. Assim, um motor de passo pode ser controlado de uma forma que faz ele girar um certo número de passos, produzindo um movimento mecânico por uma distância específica, e então ele segura a sua carga quando pára. Além disso, ele pode repetir a operação quantas vezes se desejar. Com a lógica apropriada, os motores de passo podem ser bidirecionais, síncronos, prover aceleração rápida, parar, reverter e conectar-se facilmente com outros mecanismos digitais.

Os motores de passo são projetados usualmente com um enrolamento polifásico, de vários pólos, não muito diferente dos enrolamentos de máquinas convencionais. Tipicamente, eles usam enrolamentos trifásicos e tetrafásicos, com o número de pólos determinado pelo passo angular desejado por pulso de entrada. Os rotores são do tipo relutância variável, ou imã permanente. Os motores de passo operam com um circuito lógico externo de alimentação conforme um trem de pulsos é aplicado à entrada do circuito de alimentação, o circuito fornece correntes apropriadas aos enrolamentos de estator do motor para fazer o eixo de campo de entreferro girar por passos, em coincidência com os pulsos de entrada [14]. Neste trabalho, o trem de pulsos foi gerado de duas maneiras: através de um micro-controlador e da ferramenta Simulink do software MATLAB®. A comparação entre as duas formas de geração de trem de pulsos utilizadas neste trabalho é feita nas seções 3.2.1. e 3.2.2.

A operação elementar de um motor de passo tetrafásico com um rotor de dois pólos pode ser visto na figura 16. O rotor pode ser um elemento ferromagnético ou imã permanente.

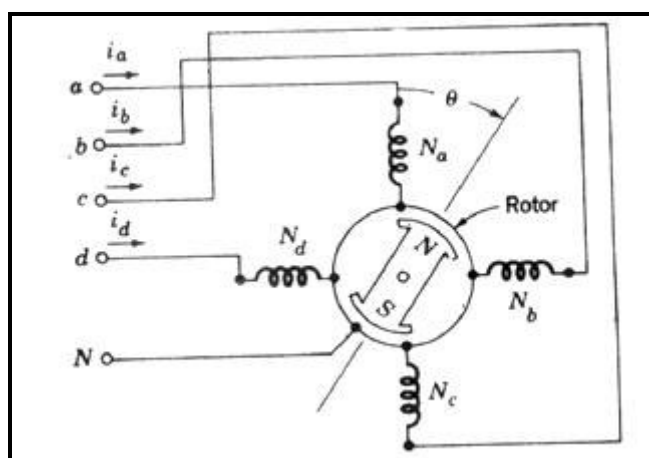


Figura 16 – Operação elementar de um motor de passo [14].

As características de um motor de passo são frequentemente apresentadas na forma de conjugado em função da frequência de pulsos aplicados a unidade de alimentação como mostra a figura 16. Conforme a frequência dos pulsos aumenta, o motor fornece menor conjugado porque o rotor tem menos tempo para mover a carga de uma posição para a próxima, conforme a configuração das correntes de estator é deslocada. O motivo da ocorrência deste fato é o comportamento indutivo do motor de passo.

A faixa de partida do motor de passo (figura 17) é aquela na qual a posição de carga segue os pulsos sem perder passo. A faixa de giro é aquela na qual a velocidade da carga

apenas segue a freqüência de pulsos sem perder passo, mas não pode partir, parar ou inverter, obedecendo ao comando. O ponto de conjugado máximo é o máximo conjugado de retenção de uma carga imóvel do motor excitado.

A vantagem do motor de passo é o menor tamanho e custo mais baixo da unidade de alimentação do motor comparado às partes correspondentes de um servomecanismo controlador de posição ou velocidade. Alguns motores de passo, de relutância variável, típicos, operam com pequenos passos angulares, 15º ou menos. Tipos característicos a ímã permanente operam a passos maiores, até 90º, e com freqüências máximas de resposta de 300 pps (passos por segundo).

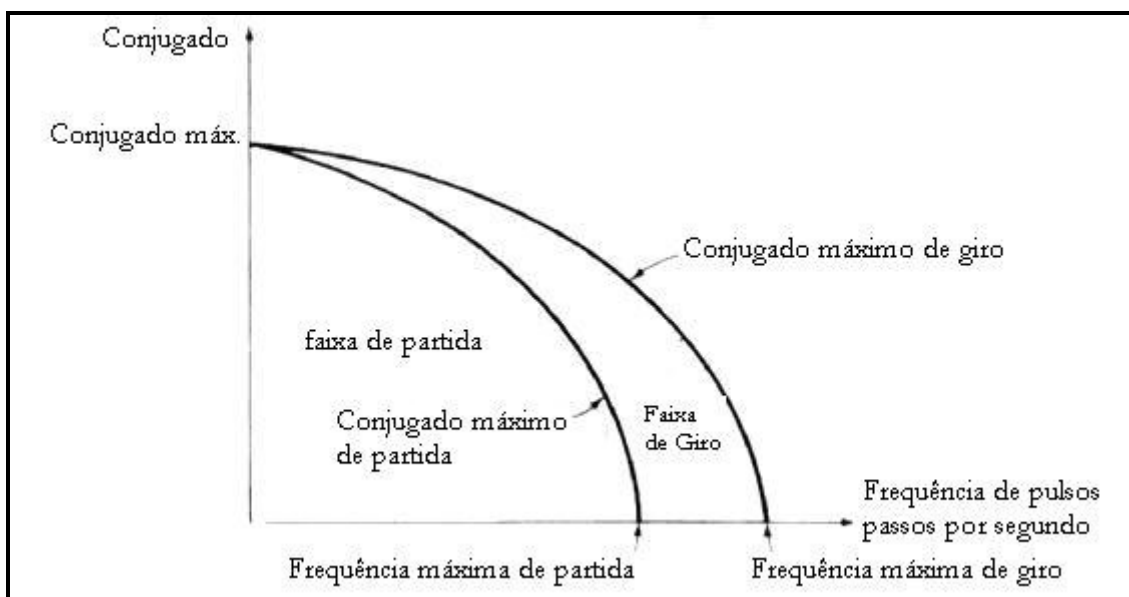


Figura 17 – Característica Conjugado vs. freqüência do motor de passos [14].

Durante a realização das medidas de força que são apresentadas neste trabalho, foi usado no sistema de medida em que o motor de passo gira 1,8º a cada passo realizado pela lógica de acionamento e a guia linear se movimenta 1,5 mm a cada rotação completa dada pelo motor.

Logo:

$$(360^\circ / \theta) = P \text{ (número de passos por volta).}$$

Onde: θ = deslocamento angular por passo;

P = número de passos por volta.

$$D = \frac{d}{P} \cdot p, \quad (3.1)$$

Onde : D = Distância linear percorrida pelo eixo;
 d = deslocamento axial por volta completa (mm); (fuso do parafuso ou fuso de esfera utilizado)
 p = número de passos.

A equação (3.1) estabelece a relação entre o número de passos de um motor de passo e o deslocamento axial de um acionador linear em mm.

No acionador linear construído inicialmente (figura 18, sistema antigo), o braço de medida apresenta ligeira inclinação quando a força de repulsão do mancal era maior do que 200 N [4], o que poderá ser observado nos resultados mostrados adiante. Logo, o acionador linear foi totalmente reformulado de forma que este problema fosse solucionado e este novo sistema é mostrado na figura 17 (sistema novo).

As medidas apresentadas neste texto foram realizadas utilizando o sistema de medidas com os dois acionadores lineares diferentes. O acionador linear do sistema de medidas antigo se movimenta a 1,5 mm por volta completa enquanto que o novo acionador se movimenta 5 mm por volta completa. E então, se esses parâmetros forem aplicados a equação 3.1, o valor da constante entre a distância percorrida e o número de passos dados será diferente para cada um.

Além desta relação, pode-se determinar também a velocidade linear do sistema de medidas em função do período do trem de pulsos que excita as bobinas do motor. Esta relação é mostrada na parte de controle do sistema de medidas.

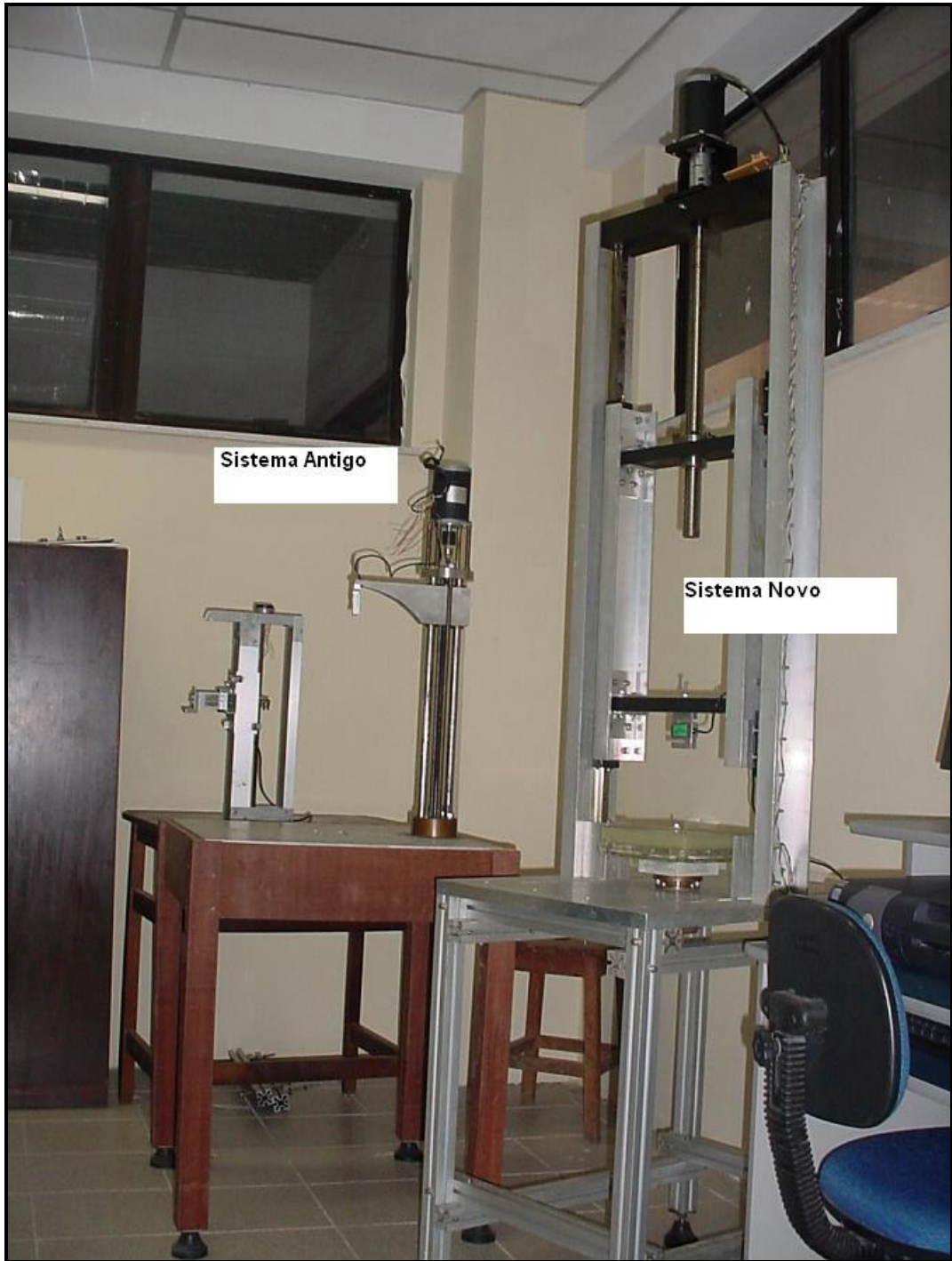


Figura 18 – Sistemas de medidas.

3.2. Controle do motor de passo e aquisição de dados.

O controle do motor de passo e aquisição de dados é o complemento do acionador linear na construção do sistema de medidas e consiste no acionamento do motor de passo. A obtenção de dados da curva força vs. distância dos mancais magnéticos supercondutores é feita utilizando os mesmos controladores. O motor de passo é acionado por lógica digital através de trem de pulsos, como pode ser visto na seção 3.1. Esses pulsos podem ser gerados por micro controladores ou por softwares de simulação com auxílio de conversores D/A possibilitando que o acionamento do motor possa ter várias velocidades.

3.2.1. Micro-controladores.

Neste trabalho, inicialmente, o controle do acionamento do motor de passos foi feito através de um sistema da Tato Equipamentos Eletrônicos chamado de Basic Step, baseado no micro controlador PIC16F628 da Microchip. Este sistema, através de seu *firmware*, pode ser programado em uma linguagem simples chamada Pbasic o que torna fácil o acionamento do motor.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois tipos diferentes do Basic Step : o modelo M1 e o modelo M8.

O modelo M1 consiste de uma pequena placa de circuito impresso onde todos os componentes estão alojados como mostra a figura 19.



Figura 19 - Hardware do Basic Step 1 [15].

A pinagem do basic step 1 é mostrada na figura 20 e a descrição de cada pino também.

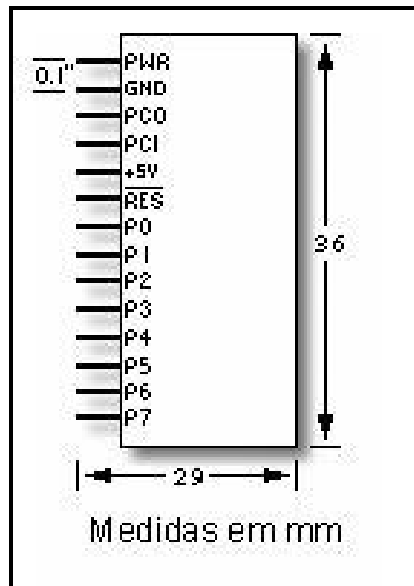


Figura 20 - Pinagem do Basic Step 1[15].

- PWR** – Alimentação (7 – 15 V)
- GND** – Terra
- PCO** – Saída de comunicação com o PC.
- PCI** – Entrada de comunicação com o PC.
- + 5V** – Saída de 5V.
- RES** – Reset
- P0 – P7** – Pino 0 até Pino 7

A comunicação entre o micro controlador e o PC é feita através da porta serial com conexão DB9 como pode ser visto na figura 21.

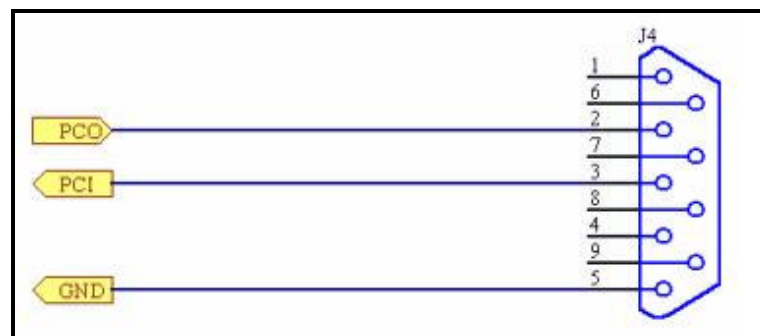


Figura 21 - Conector DB9 da Porta Serial [15].

Os pinos de 0 à 7 podem ser usados como entrada ou saída sendo isto especificado na programação do controle do pic.

Quatro saídas digitais são usadas para gerar o trem de pulsos que movimentam o motor de passos. Através da lógica digital, programa-se o micro controlador para que este envie os sinais de controle para o estágio de potência para que estes sinais sejam amplificados, possibilitando assim o acionamento do motor.

O micro controlador basic step M8 apresenta uma série de vantagens em relação ao M1 e por esta razão este foi implementado no trabalho pois possuía um número maior de I/O o que facilitaria a aquisição de dados, além da memória que tem uma capacidade muito superior (8kb) em relação ao M1 (256 bytes).

Nas figuras a seguir pode-se ver a pinagem e o hardware do basic step M8.

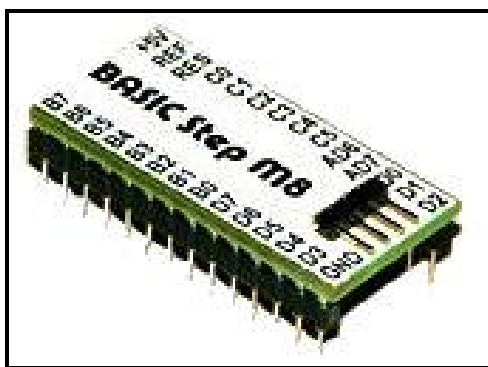


Figura 22 - Hardware do Basic Step M8 [15].

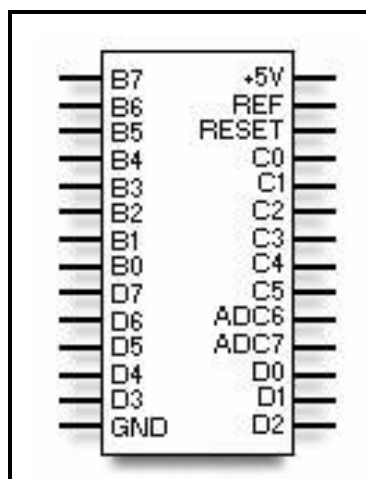


Figura 23 - Pinagem do micro controlador Basic Step M8 [15].

O BASIC Step M8 possui 3 portas que podem ser configuradas como entrada ou saída, com os nomes porta B, C e D além de 2 pinos de conversor analógico / digital. Todos os pinos da porta C podem ser configurados para serem entradas analógicas também.

Através do micro controlador, pode-se escolher o tempo de pausa entre os dois passos a serem dados. Este intervalo equivale a um quarto do período do trem de pulsos.

Com os trens de pulsos acionando as bobinas do motor, toda a parte mecânica é acionada, por exemplo movimentando o mancal para cima ou para baixo, dependendo do sentido de rotação do motor, e aproximando ou afastando do estator supercondutor.

Através de uma célula de carga que envia os sinais analógicos de tensão proporcionais à força de levitação a uma entrada do micro controlador, é possível armazenar estes dados e processá-los para que seja possível o levantamento da curva de força em função da distância.

A grande vantagem destes micro-controladores é que uma vez feito o carregamento da programação para o *hardware* via comunicação serial, este pode trabalhar embarcado (sem a necessidade do *software* para realimentação da programação). Todavia, a aquisição de dados é bem mais complexa, visto que há a necessidade de um outro software para que os dados sejam tratados e representados em um gráfico. Logo, devido a esta dificuldade, foi adotado um outro programa para a operação e a aquisição de dados do sistema de medidas.

3.2.2. Utilização de placa de aquisição de dados para implementação do sistema de medidas usando o Simulink (MATLAB®).

Apesar dos micro-controladores poderem trabalhar embarcados, a aquisição de dados é bastante complexa, o que dificulta bastante a implementação deste sistema. Portanto, para aquisição de dados, o micro-controlador foi substituído pela ferramenta Simulink MATLAB® pois esta dispõe de blocos de entrada e saída analógica e digital que se comunicam com uma placa de aquisição de dados (figura 23). Logo, com o auxílio de blocos com função geradora de onda quadrada e do *scope* que traça em tempo real os sinais recebidos pela entrada digital, é possível gerar o trem de pulsos que aciona o motor de passos e realizar a aquisição dos dados de força. Estes dados são armazenados na área *work space* do software SIMULINK/MATLAB® e, posteriormente, pode-se então traçar o gráfico da maneira mais conveniente.

Diferentemente dos micro-controladores, não é feito o carregamento do programa para o *hardware* (de forma a operar embarcado), que neste caso é a placa de aquisição de dados. Esta é apenas um canal de comunicação entre a parte virtual do sistema e a parte

física enviando os sinais de saída e recebendo os de entrada. Não há um *buffer* que armazena as informações no *hardware*, tudo é processado pelo próprio *software*.

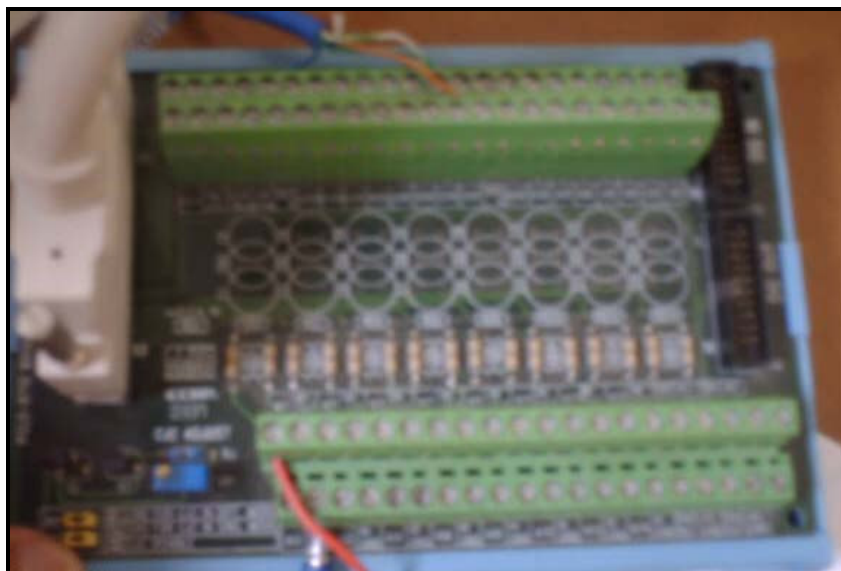


Figura 24 – Borneira Placa de Aquisição de dados Advantech PCI-1711.

A placa de aquisição utilizada foi a PCI-1711 *Series* da Advantech. Esta placa contém 16 entradas digitais e 16 saídas digitais, possibilitando ao usuário uma grande flexibilidade no projeto de acordo com sua necessidade. Além disso, possui um conversor A/D de 12 bits com frequência de amostragem até 100 kHz e um conversor A/D de 16 bits com frequência de amostragem de 250 kHz [16][17].

Neste trabalho, foram usadas quatro saídas digitais para acionar as bobinas do motor de passo e uma entrada analógica para coletar os sinais de tensão gerados pela célula de carga.

3.2.3. Acionamento do motor de passo

O tipo de acionamento dos motores de passo varia de acordo com a disposição das ligações das bobinas do motor e as fontes de alimentação, sendo classificados como unipolares ou bipolares.

Os motores de passo podem ser bipolares (os quais requerem duas fontes de alimentação ou uma fonte de alimentação de polaridade comutável) ou unipolares (que requerem apenas uma fonte de alimentação) [18].

A tensão utilizada nos dois casos é contínua e é necessário um circuito eletrônico capaz de produzir seqüências que viabilizem a rotação do motor. No controle de um motor de passo não é necessária a implementação de uma estratégia de realimentação, como a

utilização de um *encoder*, ou qualquer outro sensor de posição que assegure uma melhor exatidão no posicionamento do motor. A vantagem de operar sem realimentação é que não é necessário ter um sistema de controle em malha fechada [19].

3.2.3.1. Motor de passo unipolar

Os motores de passo com acionamento unipolar têm sua principal característica na derivação ao centro de cada um de seus enrolamentos, onde de acordo com a figura 25, a derivação central de cada bobina é ligado ao terminal positivo da fonte de alimentação e os terminais das bobinas são, alternadamente, aterrados para reverter a direção do campo das bobinas. Com esta configuração, o número de fases do motor de passos é sempre o dobro do número de bobinas, uma vez que cada bobina se encontra dividida em duas. Na figura 25, é apresentada a representação de um motor de passo unipolar de 4 fases.

Os motores de passo utilizados neste trabalho para os dois acionadores construídos foram modelos da Kalatec. O modelo 5034-350 e o modelo 5034-348, na verdade são um pouco diferentes do motor da figura 25. Eles dispõem de quatro bobinas independentes como pode ser visto na figura 26, possibilitando o acionamento mono ou bipolar. Todas as medidas foram feitas utilizando acionamento monopolar e, portanto, duas bobinas são ligadas em série sendo que a junção dos terminais destas bobinas é a derivação central. A figura 27 mostra esta associação.

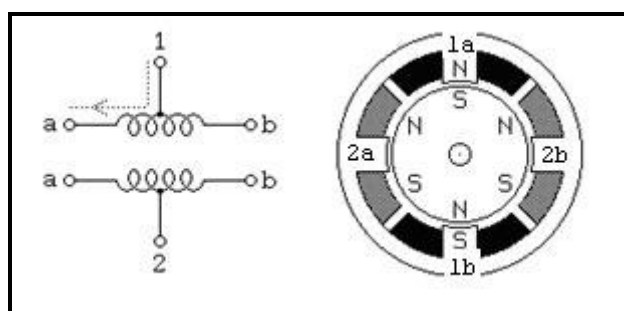


Figura 25 - Motor de passo unipolar [19].

Na figura 25, pode-se ver o corte transversal de um motor com um passo de 30 graus. O enrolamento 1 encontra-se distribuído entre o pólo superior e pólo inferior do estator do motor, enquanto que o enrolamento 2 encontra-se distribuído entre o pólo esquerdo e o pólo direito do estator. O rotor é um ímã permanente com seis pólos (3 pólos sul e 3 pólos norte), dispostos ao longo da circunferência do rotor. Para uma resolução angular maior, o rotor deverá conter proporcionalmente mais pólos.

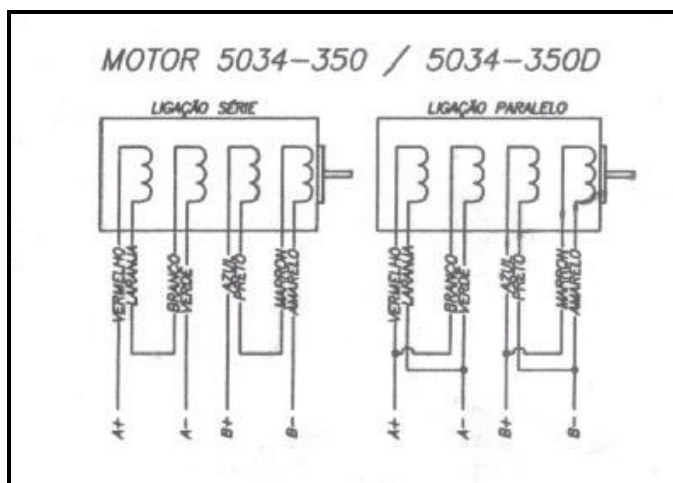


Figura 26 – Esquema de bobinas do motor Kalatec.

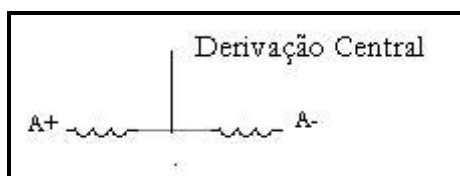


Figura 27 – Ligação série de duas bobinas motor Kalatec 5034.

Levando em consideração a figura 25, a corrente que parte da derivação central para o terminal “a” induz um campo magnético cujo pólo norte é o pólo superior e o pólo inferior o pólo sul. O pólo sul do estator tende a se alinhar com o do rotor causando assim um deslocamento. Se retirada a alimentação do enrolamento 1 e colocada no enrolamento 2, o rotor deslocará de um passo e assim por diante. A tabela 1 mostra uma seqüência de oito passos levando em consideração o esquema da figura 25.

Tabela 1- Tabela de seqüência de 8 passos - Passo Inteiro

	1 - a	1 - b	2 - a	2 - b
1	1	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	0	1	0
7	0	1	0	0
8	0	0	0	1

Este tipo de atuação é denominado passo completo ou *full-step* (cada pulso dado corresponde ao deslocamento nominal do motor). Existe uma atuação alternativa a esta que também é de passo inteiro, porém, capaz de aumentar o torque de carga em 50 %. Para tal situação são acionadas duas fases simultaneamente a cada passo. Note que nunca podem ser acionadas ao mesmo tempo fases que pertencem ao mesmo enrolamento. A única desvantagem é a duplicação das perdas de energia. A tabela 2 mostra este tipo de acionamento.

Tabela 2 – Seqüência de acionamento passo inteiro com torque 50% maior.

	1 - a	1 - b	2 - a	2 - b
1	1	0	0	1
2	0	1	0	1
3	0	1	1	0
4	1	0	1	0
5	1	0	0	1
6	0	1	0	1
7	0	1	1	0
8	1	0	1	0

Outro tipo de atuação possível consiste em alimentar, alternadamente, um e dois enrolamentos, permitindo deste modo avançar meio passo de cada vez, isto é, metade do deslocamento nominal do motor de passos. Este tipo de atuação é denominado de meio-passo, ou *half-step*. Neste tipo de atuação, para que se consiga uma revolução completa, é necessário que se dê o dobro de passos. Na tabela 3 é apresentada uma atuação do tipo meio passo para o mesmo deslocamento dos acionamentos anteriores.

Como mostrado, são necessários 16 acionamentos para realizar o mesmo deslocamento de 8 acionamentos do passo completo. Este acionamento meio passo é utilizado para se obter uma melhor precisão da posição do motor de passo ou para deslocamentos que o passo inteiro não seria capaz de alcançar. Neste trabalho, foi adotado o acionamento passo inteiro com acionamento de duas fases simultaneamente, pois a necessidade de se obter um torque maior superou a necessidade de um maior controle de posição.

Entre dois passos, existe um tempo t que na verdade é um quarto do período T do trem de pulsos que aciona as bobinas do motor. Este tempo está ligado diretamente a velocidade linear do rotor de imã permanente.

Tabela 3 - Acionamento meio passo do motor de passo

	1 - a	1 - b	2 - a	2 - b
1	1	0	0	1
2	0	0	0	1
3	0	1	0	1
4	0	1	0	0
5	0	1	1	0
6	0	0	1	0
7	1	0	1	0
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	0	0	0	1
11	0	1	0	1
12	0	1	0	0
13	0	1	1	0
14	0	0	1	0
15	1	0	1	0
16	1	0	0	0

Para o caso do acionamento passo inteiro com duas bobinas e um deslocamento angular por passo de $1,8^\circ$ do motor 5034, para que uma volta seja completada são necessários 200 passos. Como o tempo t entre cada passo é um quarto do período do trem de pulso, $200t$ ou $50T$, o rotor se desloca uma distância d mm, sendo d , o deslocamento realizado pelo acionador linear após uma volta. Logo, é fácil perceber que a velocidade linear de aproximação ou afastamento do rotor à base supercondutora é:

$$v = \frac{d}{50T} \quad . \quad (3.2)$$

A velocidade então é função do deslocamento por volta nominal do acionador linear e do período do trem de pulsos.

3.2.3.2. Motor de passo bipolar

Ao contrário dos motores de passo unipolares, os motores bipolares requerem um circuito de atuação bem mais complexo. Os motores de passo bipolares são conhecidos pelo sua excelente razão tamanho/torque: proporcionam um maior torque comparativamente a um motor unipolar do mesmo tamanho [19].

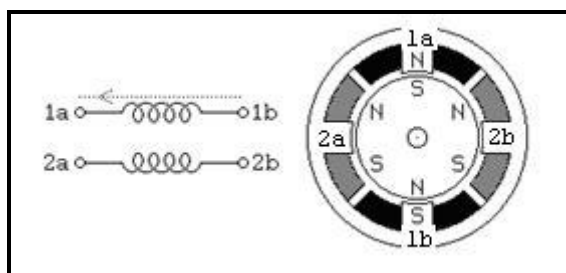


Figura 28 – Motor de passo bipolar [19].

Os motores bipolares são constituídos por enrolamentos separados que devem ser atuados em ambas direções para permitir o avanço de um passo, ou seja, a polaridade deve ser invertida durante o funcionamento do motor. O padrão de atuação do *driver* é todo semelhante ao obtido para o motor de passo unipolar em *full-step*, neste tipo de acionamento a tensão é invertida. Um exemplo de aplicação pode ser encontrado na tabela 4, onde é implementada a atuação do motor apresentado na figura 28.

Tabela 4 - Acionamento bipolar do motor de passo.

	1 - a	1 - b	2 - a	2 - b
1	+	-	0	0
2	-	+	0	0
3	0	0	+	-
4	0	0	-	+
5	+	-	0	0
6	-	+	0	0
7	0	0	+	-
8	0	0	-	+

3.2.4. Driver de Potência

Neste sistema de medidas, os sinais de controle provenientes do PC necessitam ser amplificados, pois a corrente deste circuito não é suficiente para acionar as bobinas do motor de passo. Portanto, faz-se necessário a utilização de um estágio de potência entre o PC e as bobinas do motor.

O *driver* de potência tem essa função de receber sinais de controle e envia-los às seqüência de fases correspondentes para o acionamento do motor de passo. Este driver é constituído basicamente por resistores, transistores, optoacoplador e diodos como mostra a figura 29.

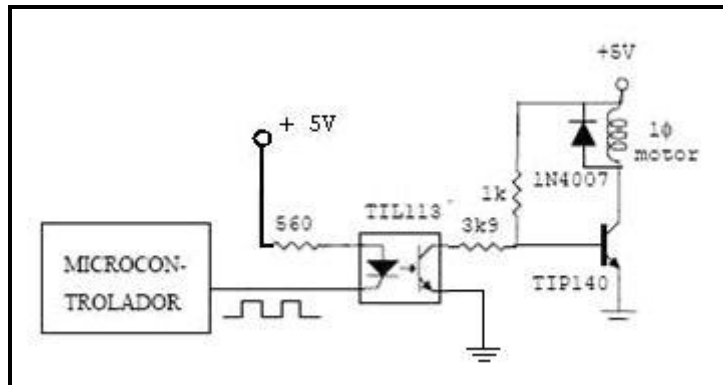


Figura 29-Esquema de acionamento de uma fase do motor de passos.

O optoacoplador é um componente eletrônico que consiste de um LED e um fototransistor juntos no mesmo encapsulamento. O propósito do optoacoplador é manter duas partes do circuito isoladas eletricamente entre si [20]. Neste caso a parte de potência e a de controle do sistema de medidas.

A operação do *driver* ocorre do seguinte modo: quando o nível lógico no catodo do LED é zero, este não emite sinal luminoso saturando o fototransistor. Deste modo o transistor ligado a bobina entra na zona de corte. Quando o nível lógico no catodo é 1, o LED emite um sinal luminoso ocasionando o corte do fototransistor. Neste caso, o transistor ligado a bobina satura.

Portanto o transistor opera como uma chave neste circuito estando na zona de corte quando o LED é acionado e saturando quando o mesmo não é acionado.

Os diodos utilizados são chamados de *Free-Wheeling*. A bobina é um elemento indutivo e portanto armazena energia enquanto passa corrente por ela, e esta energia não é eliminada com a saturação do transistor criando então uma tensão reversa na bobina que pode danificar o transistor. O diodo é então conectado antiparalelo a bobina e “cria” um caminho para que esta energia seja eliminada evitando danos ao transistor.

3.2.5. Células de carga

Para a determinação da força de levitação magnética é usada uma célula de carga como instrumento de medição. O uso de células de carga como transdutores de medição de força abrange hoje uma vasta gama de aplicações desde as balanças comerciais até a automatização de controle de processos industriais. Nesta seção são discutidos o

funcionamento, calibração e a aplicação propriamente dita da célula de carga no sistema de medidas de força de levitação magnética.

3.2.5.1. Princípios de Funcionamento

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gage* (Figura 30), quando submetido a uma deformação. Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone (Figura 31) e o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada.

Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua deformação. A força atua, portanto sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade. Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objetos de um meticuloso cuidado, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a sua relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a conseqüente deformação dos extensômetros seja preservada tanto no ciclo inicial de contração quanto nos ciclos subseqüentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, portanto, deve conduzir a uma "linearidade" dos resultados [20] (figura 32).

Neste trabalho, a célula de carga é usada para medir a força de levitação magnética do mancal e não o peso de um determinado componente. Sua deformação se dá pelo fato de estar acoplada ao rotor de imã permanente que sofre a ação da força de repulsão e transmite esta força à célula devido ao contato entre ambos através de uma haste metálica, ocasionando a deformação da mesma.

Considerando-se que variações de temperatura geram dilatações (ou contrações) em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há a necessidade de se "compensar" os efeitos de temperatura através da introdução no circuito de Wheatstone de resistências especiais que variem com o calor de forma inversa a dos extensômetros.

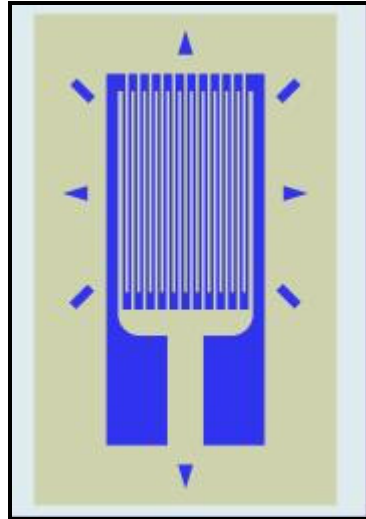


Figura 30 - Strain Gage ou Extensômetro[21].

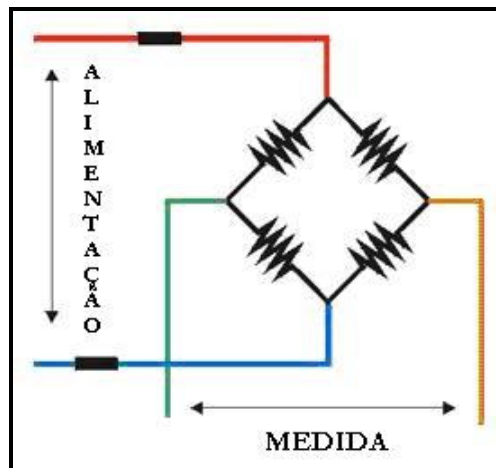


Figura 31 – Ponte de Wheatstone [20].

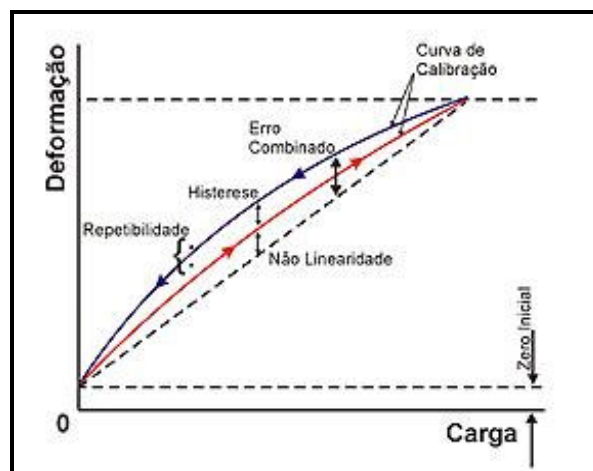


Figura 32 - Gráfico de Deformação vs. Carga, mostrando histerese, repetibilidade e não linearidade [20].

Um efeito normalmente presente ao ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga é o da "histerese" decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam entre si (Figura 32). Outro efeito que também deve ser controlado é a "repetibilidade", ou seja, indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente, também deve ser verificada e controlada através do uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de carga [20] (Figura 32).

Finalmente, deve-se considerar o fenômeno da "relaxação" ou *creep*, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresenta-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma (Figura 33).

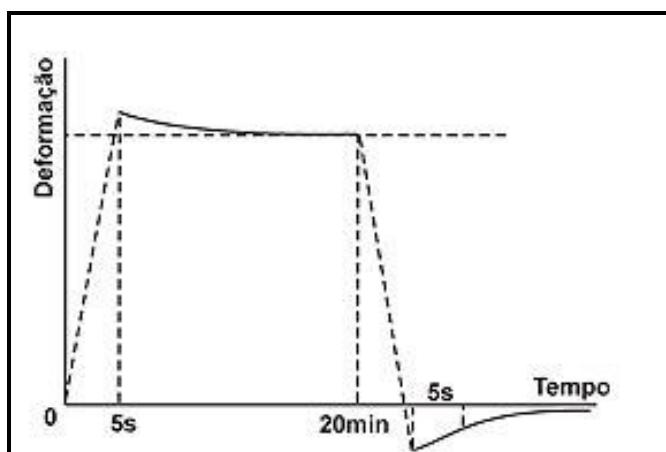


Figura 33 - Gráfico de Deformação vs. Tempo mostrando a "relaxação" ou *creep* [20].

As células de carga dispõem de quatro terminais. Dois destes terminais (vermelho e preto) são para a alimentação da célula de carga. As células de carga existentes no laboratório têm uma faixa de tensão de alimentação de 10 a 18 V sendo que a tensão recomendada pelo fabricante é de 15 V, porém utilizamos a tensão de alimentação de 12 V.

Os outros dois terminais (verde e amarelo) geram os sinais de tensão para os terminais de um dispositivo medidor de tensão. Neste caso ou o sinal é enviado para as entradas do micro controlador ou para as entradas da placa de aquisição de dados.

3.2.5.2. Calibração da Célula de Carga

As células de carga emitem um sinal de tensão proporcional à deformação da célula. As células de carga disponíveis para o desenvolvimento deste trabalho têm a especificação de 2mV/V, o que significa que a máxima carga suportada (nominal) por ela tem a indicação em volts do produto da tensão de alimentação da célula pela especificação. Um exemplo. Se a tensão de alimentação for de 12 V, a máxima carga suportada indicará uma tensão de 24 mV. Logo, se a máxima carga (carga nominal) for 50 kg, para uma carga de 25 kg, o medidor indicará 12 mV e assim por diante de acordo com a linearidade da célula. Apesar de possuir este dado, todas as células foram calibradas de forma a se conseguir uma maior precisão nas medições de força. Essa calibração foi feita no laboratório de Geotecnia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A tensão de alimentação de todas as células foi de 12,008 V. As cargas máximas das células são de 5,10, 50 e 200 kg sendo que existem duas células de 5 kg diferenciadas pelas letras A e B.

A seguir, são dispostos gráficos de força em função da tensão elétrica das células podendo-se então determinar a constante de proporcionalidade entre tensão e frequência das células. O valor da aceleração da gravidade utilizado foi de 9,80665 m/s² [22].

Célula de Carga com carga nominal de 5 kg (Célula A).

O gráfico da figura 34 mostra a perfeita linearidade da célula de carga nominal de 5 kg. Lembrando que existem duas células de carga de 5 kg e o gráfico referido é da célula A.

A constante de proporcionalidade entre a força de compressão da célula e a tensão nos terminais da célula de carga determinada foi de:

$$K_{5A} = 2,2562 \times 10^3 \text{ N/V.}$$

Para determinar esta constante, determinou-se o coeficiente angular do gráfico da figura 34.

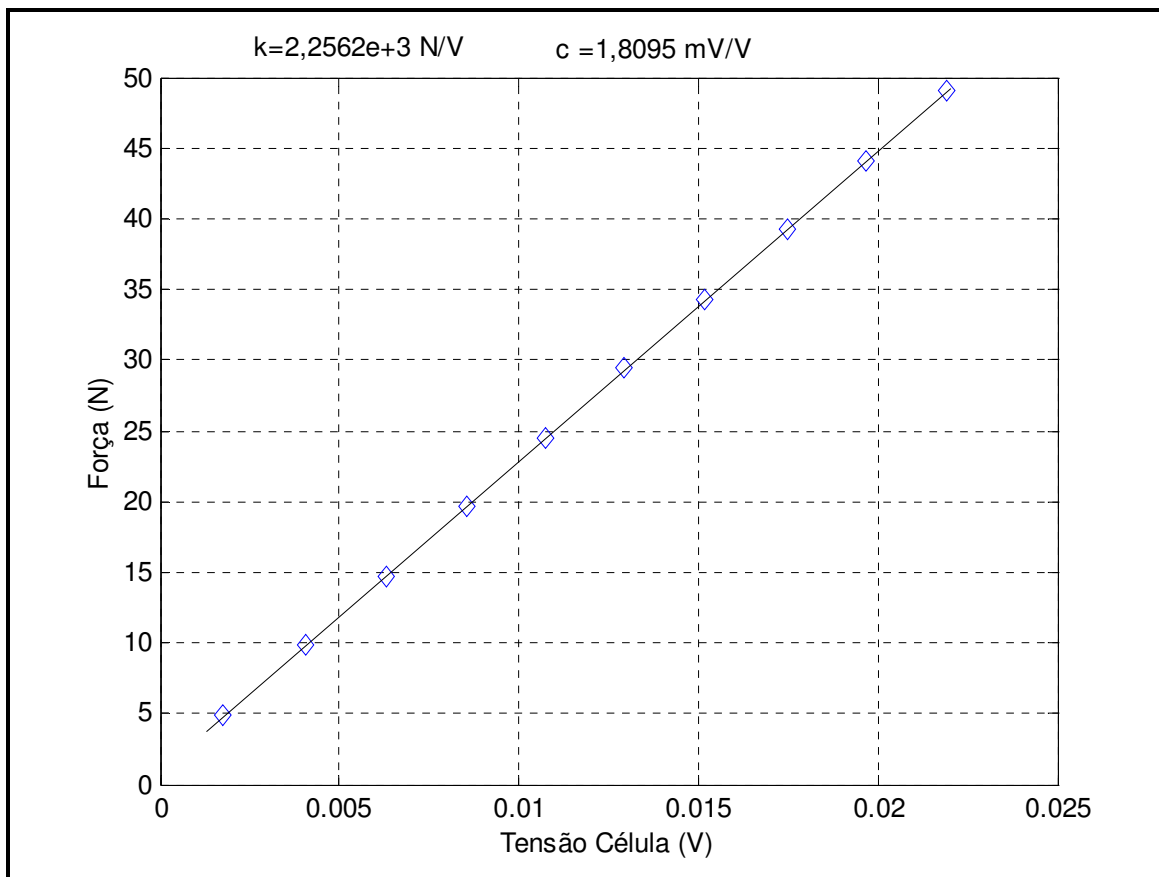


Figura 34 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na célula – Célula de carga 5A.

Apesar da célula de carga gerar sinais em mV, a constante é dada em volts pois este sinal é amplificado através de um amplificador operacional de precisão (INA 111) enviando este sinal à placa de aquisição de dados.

A constante da célula também foi determinada apesar de já termos este dado na especificação do fabricante de 2 mV/V. O resultado mostra uma pequena diferença para o dado nominal.

$$C_{5A} = 1,8095 \text{ mV/V.}$$

Esta constante é determinada de um modo um pouco mais complexo. Primeiramente, determina-se o coeficiente angular entre a tensão em mV da célula e a massa correspondente a força de compressão da célula. Este coeficiente é representado então neste trabalho pela letra “b”. A unidade de “b” é mV/kg. A constante C é então determinada pela seguinte expressão.

$$C = b \cdot \frac{M}{V}, \tag{3.3}$$

onde M é a massa da carga nominal que neste caso é 5 kg e V é a tensão de alimentação da célula (que para o caso tratado foi de 12,008 V).

Os valores calculados para as próximas células de carga seguem o mesmo procedimento que foi aqui demonstrado não sendo necessário toda a demonstração de como foram determinadas as duas constantes.

Célula de Carga com carga nominal de 5 kg (Célula B).

A constante de proporcionalidade entre força e tensão é:

$$K_{5B} = 2,2254 \times 10^3 \text{ N/V.}$$

A constante da célula de carga também pode ser determinada e tem o seguinte valor:

$$C_{5B} = 1,8344 \text{ mV/V.}$$

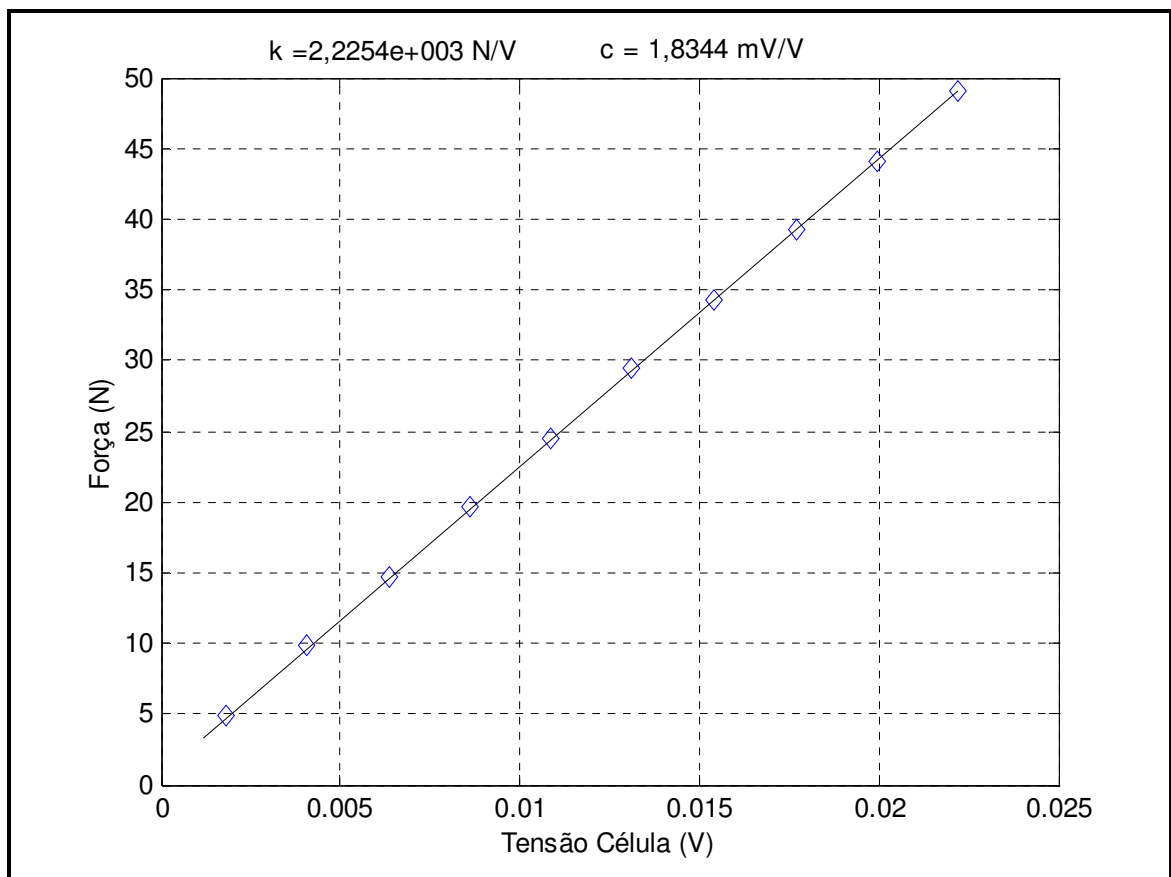


Figura 35 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na célula – Célula de Carga 5B

Célula de Carga com carga nominal de 10 kg .

A constante de proporcionalidade entre força e tensão calculada segundo o gráfico da figura 36 é:

$$K_{10} = 4,4289 \times 10^3 \text{ N/V.}$$

A constante da célula de carga também obtida pelo gráfico tem o seguinte valor :

$$C_{10} = 1,8438 \text{ mV/V.}$$

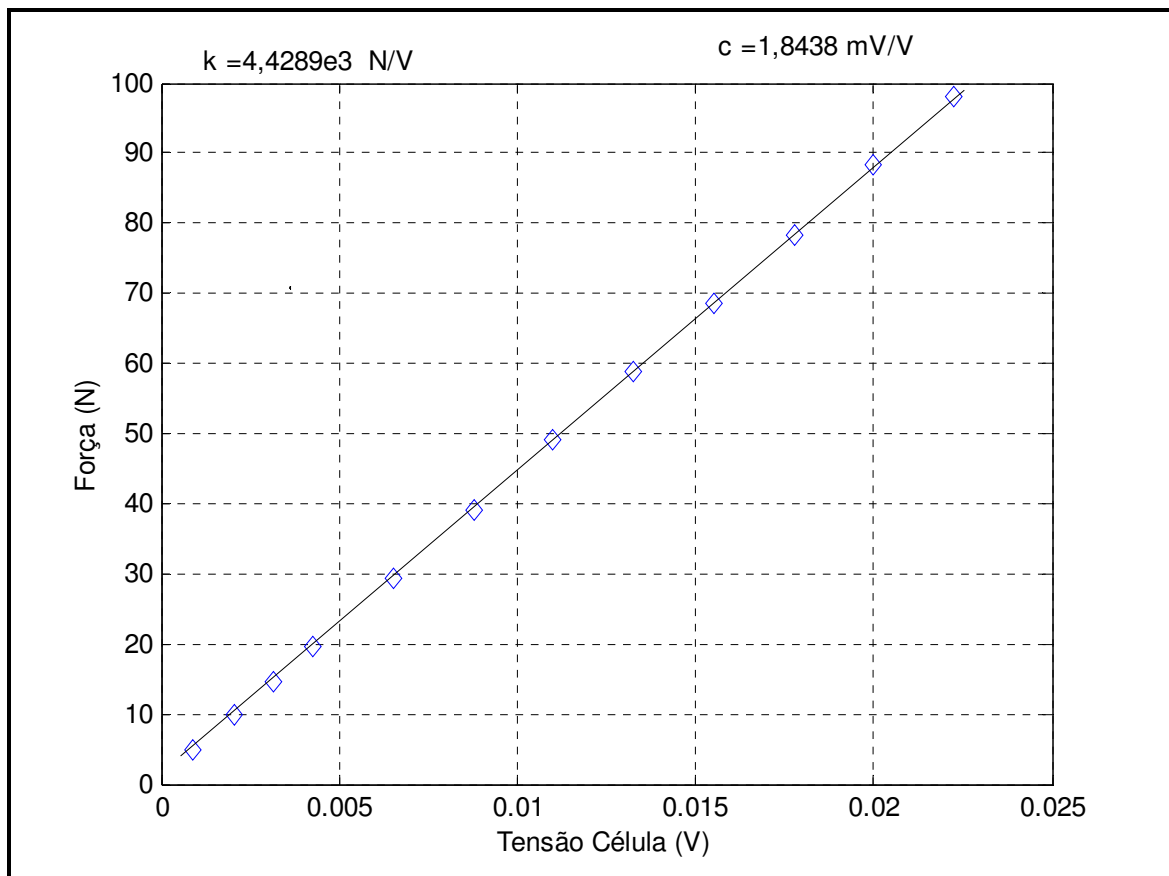


Figura 36 – Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 10 kg.

Célula de Carga com carga nominal de 50 kg.

A constante de proporcionalidade entre força e tensão da célula de carga com carga nominal de 50 kg calculada a partir do gráfico da figura 37 é:

$$K_{50} = 1,8006 \times 10^4 \text{ N/V.}$$

A constante da célula de carga também determinada através da figura 37 é:

$$C_{50} = 2,2678 \text{ mV/V.}$$

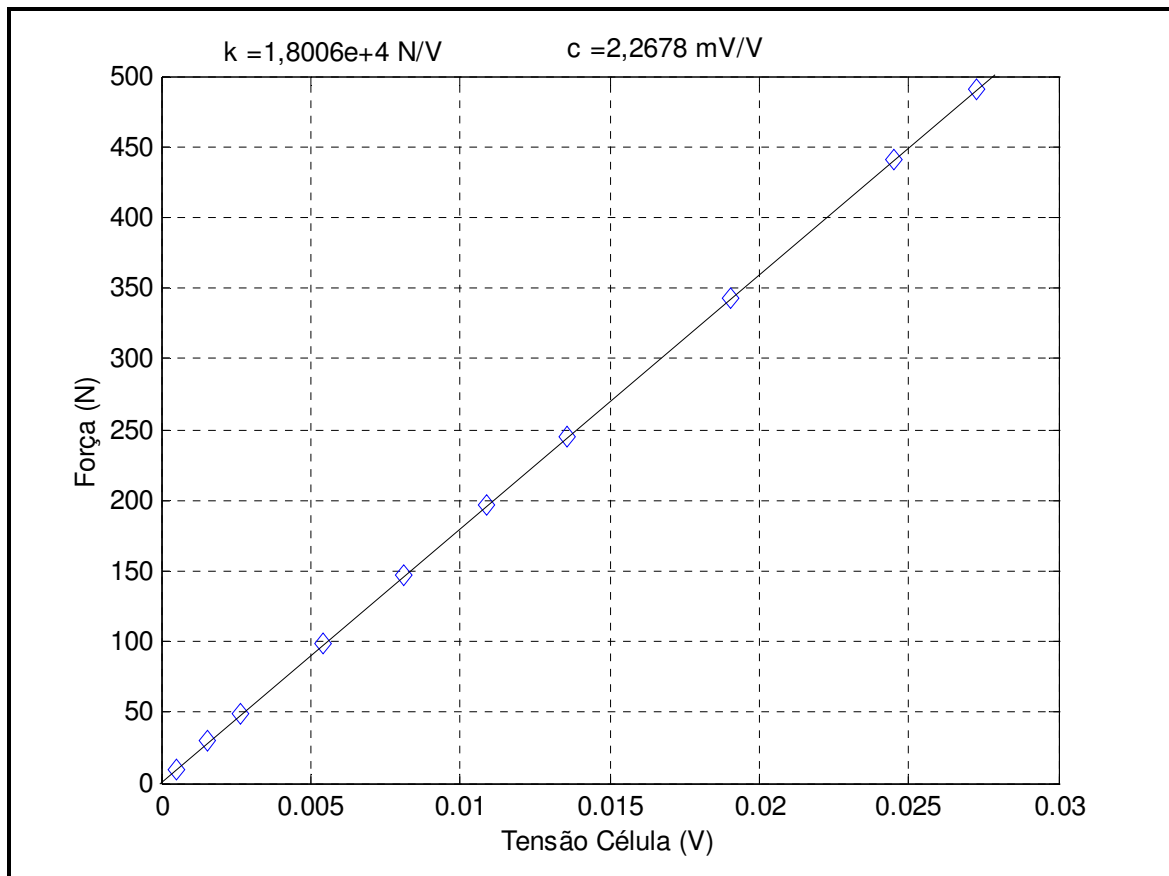


Figura 37 - Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 50 kg.

Célula de Carga com carga nominal de 200 kg.

A constante de proporcionalidade entre força e tensão é:

$$K_{200} = 9,0409 \times 10^4 \text{ N/V.}$$

A constante da célula de carga também pode ser determinada e tem o seguinte valor.

$$C_{200} = 1,8065 \text{ mV/V.}$$

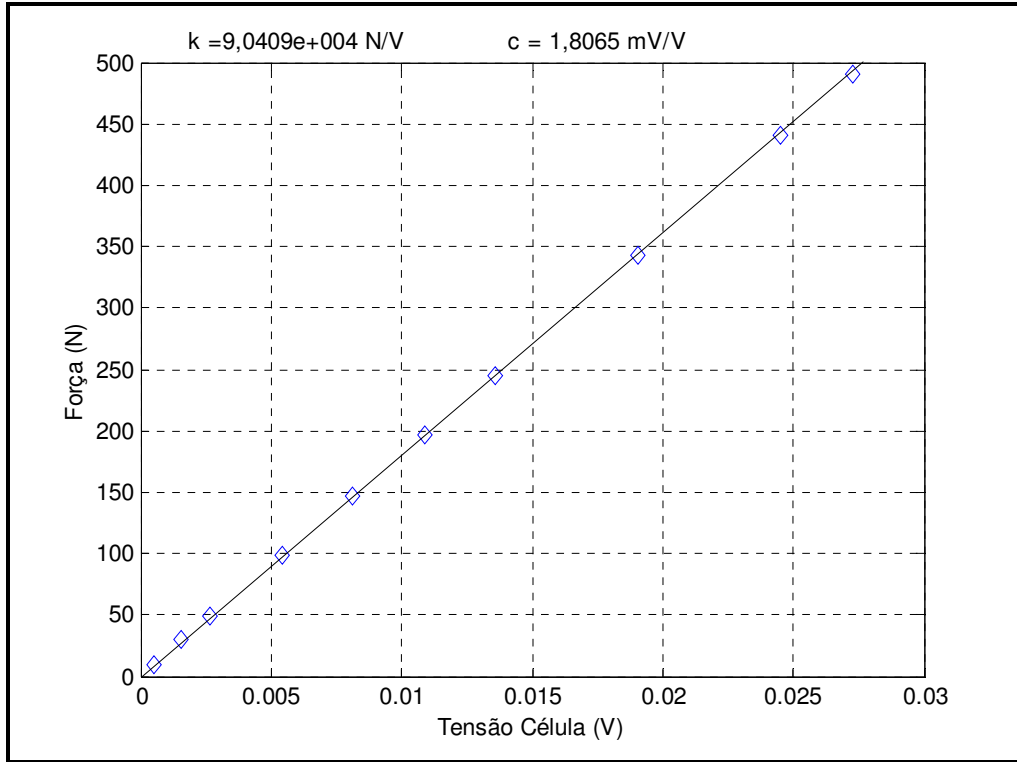


Figura 38 - Gráfico Força de compressão vs. Tensão na Célula – Célula de carga 200 kg.

Abaixo é disposta uma tabela com os valores das constantes determinadas em laboratório de cada célula de carga.

Tabela 5 - Tabela de constantes das células de carga.

Célula de Carga	K (N/V)	C (mV/V)
5A	$2,2562 \times 10^3$	1,8095
5B	$2,2254 \times 10^3$	1,8344
10	$4,4289 \times 10^3$	1,8438
50	$1,8006 \times 10^4$	2,2678
200	$9,0409 \times 10^4$	1,8065

4. Resultados

Neste capítulo, são apresentadas as curvas de força em função da distância dos mancais magnéticos supercondutores com a finalidade de: mostrar o caráter histerético do supercondutor, comparar as medidas entre os dois sistemas de medidas construídos e também comparar as curvas de força da topologia AMA (anéis magnetizados axialmente) e da topologia CF (concentrador de fluxo).

4.1. Visualização do caráter histerético do supercondutor.

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos com o primeiro sistema de medidas e tem a finalidade de mostrar o caráter histerético das amostras supercondutoras. A medida foi feita pelo processo *zero field cooling* onde as amostras supercondutoras são resfriadas sem a presença de campo magnético. Portanto o rotor de imã permanente parte de uma determinada altura até um espaçamento mínimo, que para este caso foi de 3,5 mm e depois, retorna a altura inicial. A figura 39 esclarece melhor esta dinâmica do processo *zero field cooling*.

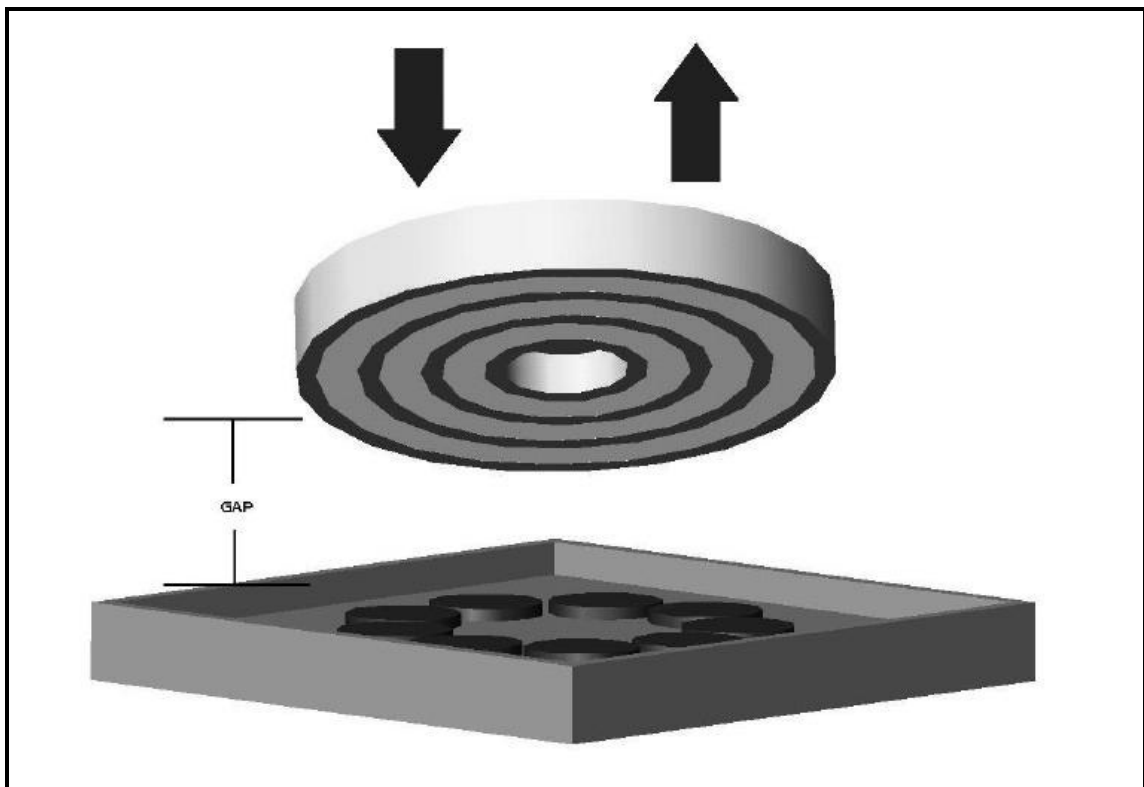


Figura 39 - Dinâmica do processo ZFC [4].

A força de repulsão entre o rotor de imã permanente e a base supercondutora em uma determinada altura no momento da descida, é diferente da força de repulsão nesta mesma altura no momento em que o rotor (Nd-Fe-B) sobe para retornar a posição inicial. A figura 40 mostra a região da curva onde pode ser visto com clareza o caráter histerético das amostras supercondutoras.

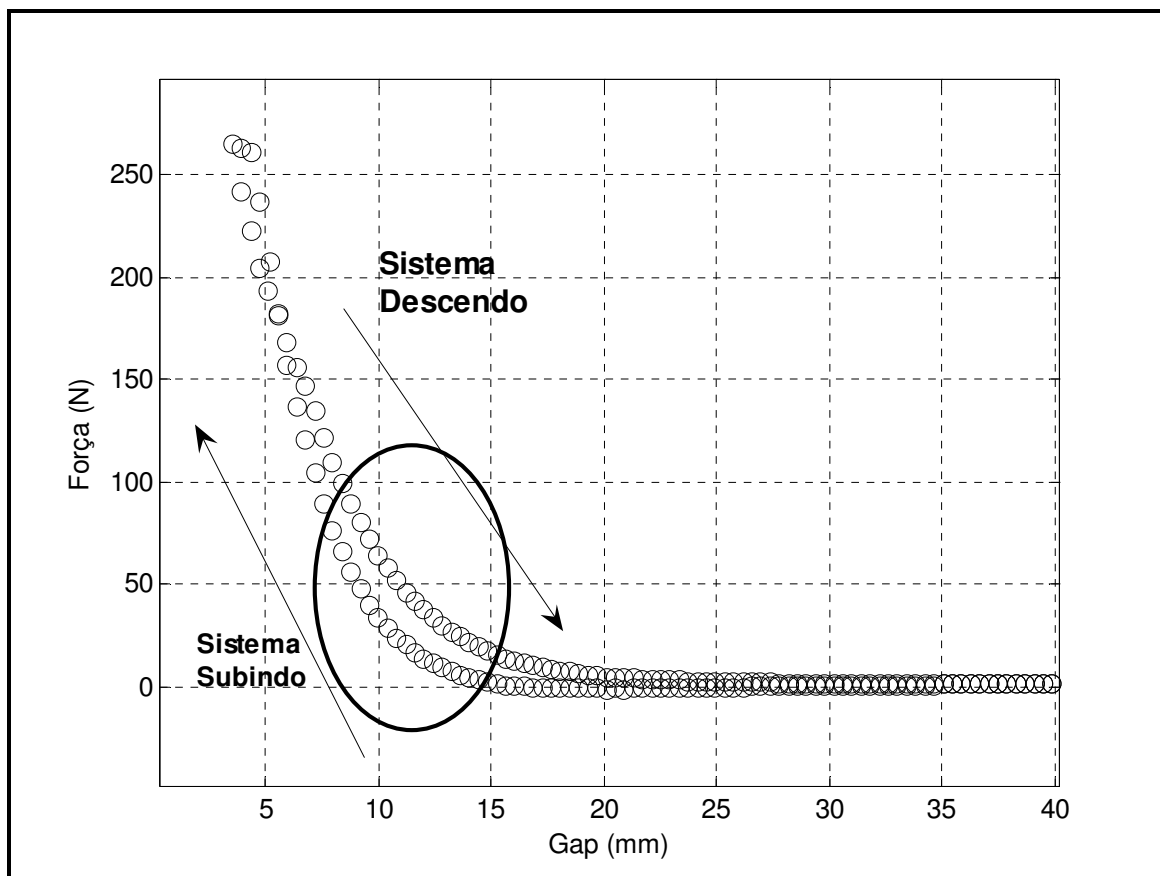


Figura 40 – Curva força vs. distância em ZFC aplicado ao mancal AMA com o sistema antigo apontando a região de histerese do supercondutor.

A região circundada na figura 40 exhibe a diferença de força de repulsão para um mesmo espaçamento. Como um exemplo, com um espaçamento de 10 mm, a força de repulsão no momento da descida do rotor é de aproximadamente 60 N e quando o rotor retornava a altura inicial, esta força foi de 40 N.

Esta medida nos mostra que apesar de algumas imperfeições mecânicas, o primeiro sistema de medidas foi capaz de apresentar resultados bastante satisfatórios e possibilitou medidas mais precisas e ainda reduziu drasticamente o tempo de execução de medida de força.

4.2. Comparação das curvas força vs. distância entre os sistemas de medidas construídos.

Nesta seção, mostram-se através de figuras com as curvas de força x distância as deformações sofridas no acionador linear devido à força exercida no braço de alumínio onde era acoplado o rotor de imã permanente. Estas deformações provocam uma mudança na forma da curva esperada. A figura 41 aponta algumas regiões onde ocorreram deformações no momento da medição com o sistema antigo.

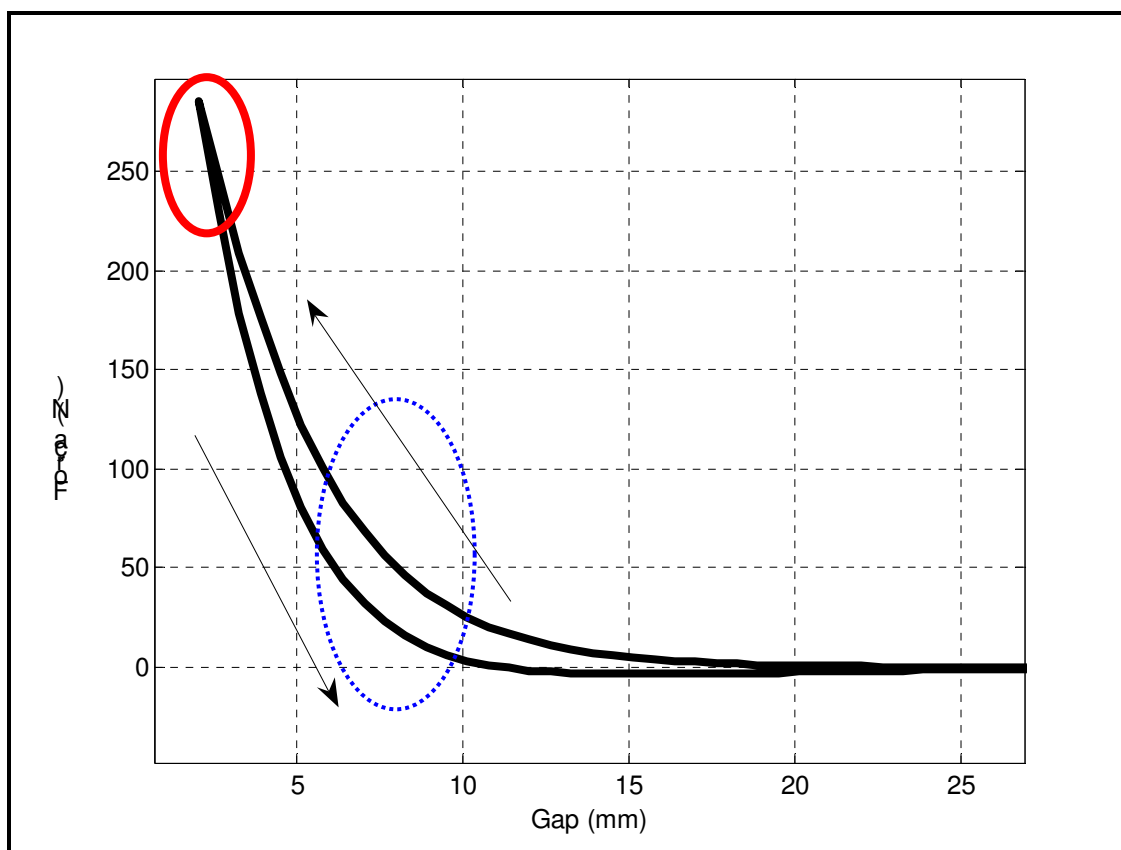


Figura 41 - Curva força vs. deslocamento em ZFC de um mancal AMA com deformação no sistema de medidas.

A região de traço contínuo entre as forças de 150 e 250N, mostra que houve um cruzamento que significaria que a força de repulsão na descida seria menor que na subida do rotor o que não é verdade de acordo com a seção 4.1.

A região pontilhada mostra uma região em que a curva deveria ter um comportamento exponencial de acordo com o esperado, porém, esta se aproxima quase de uma reta. Este detalhe em certos estudos de força de levitação não é fator relevante podendo ser usado como no caso anterior para mostrar o caráter histerético do supercondutor.

A seguir, pode-se ver na figura 42 a curva obtida através do novo sistema de medidas onde as regiões que apresentaram erros na medida do sistema antigo são mostradas. Nesta figura é possível notar a forma exponencial da curva na zona pontilhada e também que não houve cruzamento na região de traço contínuo. O novo sistema de medidas permite uma medida com alta precisão solucionando os problemas mecânicos do sistema antigo.

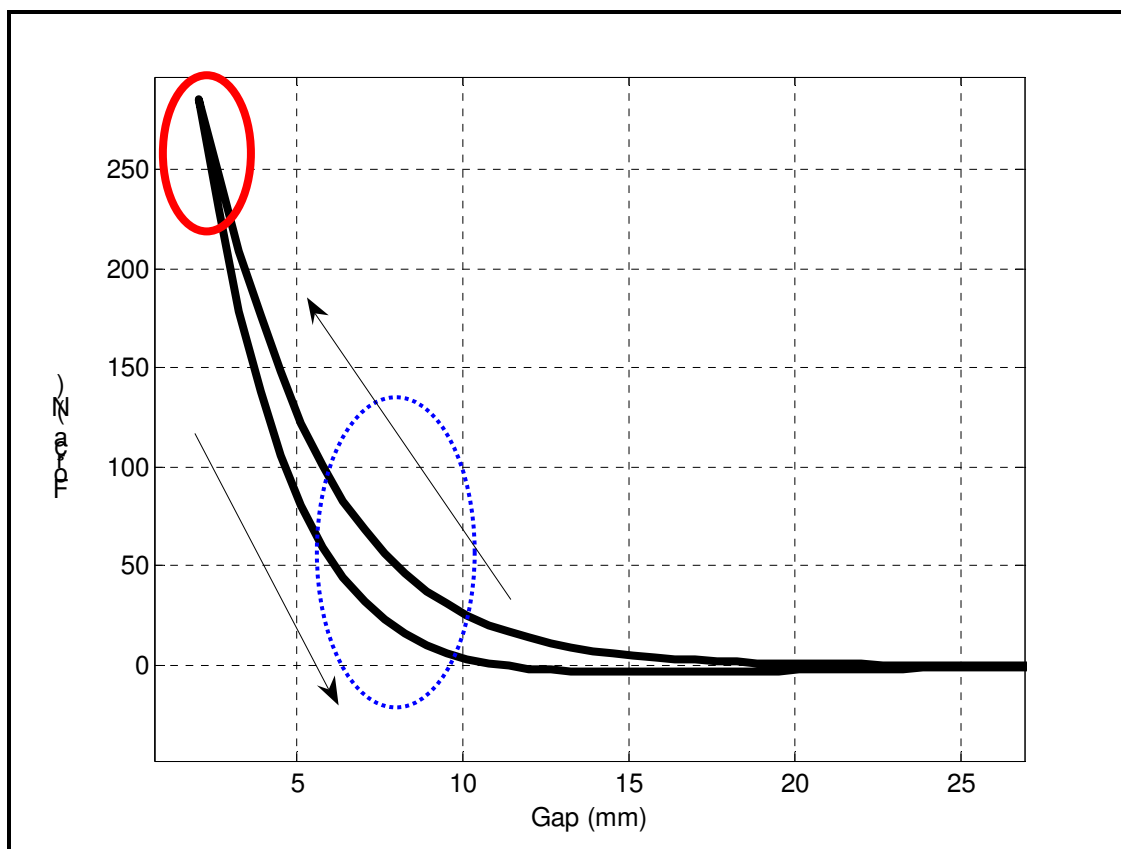


Figura 42 - Curva força vs. deslocamento no sistema de medidas novo.

O primeiro sistema de medidas foi importante para o aprendizado deste tipo de sistema de acionamento de fusos de esfera e foi muito útil para as primeiras medidas realizadas em laboratório. O novo sistema de medidas é um passo para o aperfeiçoamento do sistema implementado.

4.3. Comparação de forças entre as topologias de mancais magnéticos supercondutores .

Esta seção é meramente ilustrativa no sentido de mostrar as duas curvas de força vs. distância das topologias AMA e CF superpostas para a visualização da diferença de

força entre os dois tipos de mancais tratados ao longo de todo este trabalho. As curvas superpostas são mostradas na figura 43.

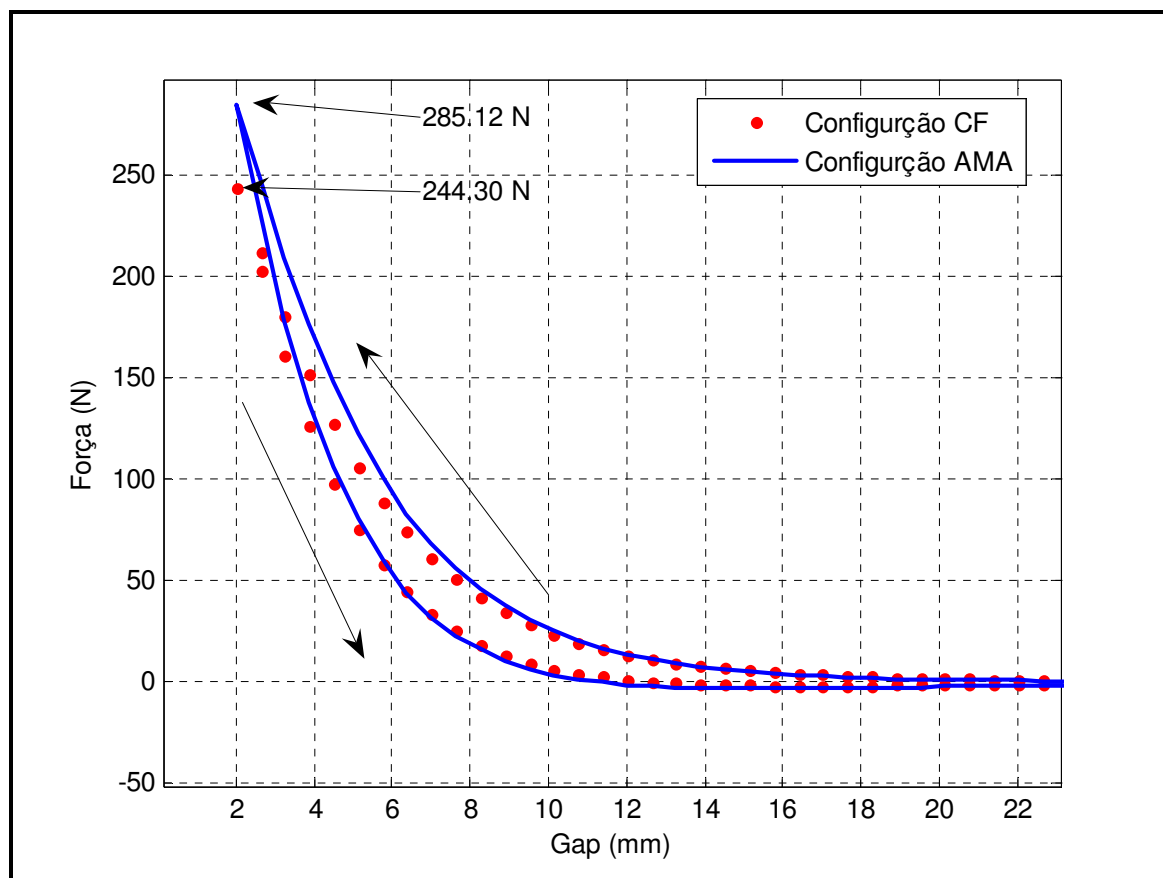


Figura 43 - Curva força vs. deslocamento das duas topologias de mancais supercondutores.

Este gráfico mostra então que o mancal AMA atinge uma força máxima maior (285,12 N) do que o mancal CF (244,30 N). As curvas somente estão justapostas para um *gap* superior a 10 mm. A figura 43 mostra que o sistema de medidas é capaz de caracterizar mancais magnéticos supercondutores de diferentes topologias.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou a automatização de um sistema de medidas de força. Este sistema automatizado possibilitou a dinamização das medidas de força de levitação magnética em mancais magnéticos supercondutores reduzindo o tempo necessário para as medições, aquisições e tratamento dos dados sem necessidade de obtenções manuais de resultados. Os resultados obtidos com o sistema automatizado foram satisfatórios de acordo com os objetivos idealizados desde o início.

A automatização do sistema foi, inicialmente, realizada utilizando toda a parte mecânica da versão manual que contava com um braço de alumínio junto ao fuso sendo o motor de passos acoplado ao fuso podendo acioná-lo através de sua rotação. Este sistema foi bastante útil para os estudos iniciais sobre o sistema de medidas e alguns resultados alcançados foram satisfatórios, como a confecção curva distância vs. força. Esta medida permitiu a visualização do caráter histerético da força de levitação entre um ímã e um supercondutor e ainda algumas considerações sobre topologias de mancais magnéticos supercondutores.

O maior problema deste grupo motor-acionador, é que forças de repulsão superiores a 150 N causam uma deformação no sistema alterando o *gap* mínimo entre o rotor de ímãs permanentes e a base supercondutora, o que ocasiona um erro na medida da posição vertical do rotor magnético. Esta deformação é causada devido à força exercida no braço mecânico. Para forças inferiores a 150 N, as curvas apresentadas estão de acordo com as formas esperadas.

A deformação no sistema também causava um erro na medida um pouco menos notável, pois a curva deve ter a forma de uma exponencial e em certas regiões, esta se aproximava de uma reta. Logo, o primeiro sistema construído apresenta limitações de força e também de velocidade, sendo a máxima atingida sem perda de passos do motor de 0,75 mm/s. Um outro fator relevante para a limitação de velocidade é o acionamento monopolar que foi adotado inicialmente por apresentar maior facilidade em seu circuito de acionamento e também por ser um recurso de menor custo. Entretanto para as atividades iniciais deste trabalho, este tipo de acionamento atendeu perfeitamente às necessidades na implementação inicial da automatização do sistema de medidas.

Um novo sistema de medidas usando duas guias lineares e um fuso de esfera foi desenvolvido e apresentou melhorias significativas nas medidas de força. Os resultados obtidos nas medições com este novo sistema foram mais exatos que os realizados com o sistema antigo. As deformações observadas no sistema antigo não ocorreram neste sistema

novo o que aumenta bastante a confiabilidade das medidas. Isto torna o sistema de medidas uma importante ferramenta nas realizações dos projetos do laboratório ligados à supercondutividade.

Os resultados de comparação entre as duas topologias de mancais magnéticos supercondutores apresentados neste trabalho através da superposição das curvas mostram que para forças acima de 50 N, os mancais apresentam diferenças nas forças de repulsão sendo o mancal de topologia AMA o que atingiu maior força de repulsão. Este resultado aponta mais uma característica deste sistema de medidas que é a capacidade de comparar diversos mancais diferentes para determinar qual atinge a maior força máxima com o menor *gap* possível.

6. Trabalhos Futuros

As evoluções deste trabalho já estão sendo realizadas por outros colaboradores do laboratório. Futuramente, avançando nas melhorias do sistema de medidas, deseja-se realizar o acionamento bipolar do motor de passo, que auxilia no controle de velocidade, possibilitando velocidades maiores do que 0,75 mm/s e também medidas com velocidade variável.

O sistema de medidas depois de implementado já contribuiu na realização de vários trabalhos sendo de grande utilidade hoje para o Laboratório de Aplicações de Supercondutores sendo as evoluções futuras necessárias sempre com intuito da otimização do sistema de medidas.

7. Referências

- [1] Rubens de Andrade Jr. ; Guilherme G. Sotelo; Antônio C. Ferreira; Luis G. B. Rolim; José L. da Silva Neto; Richard M. Stephan; Walter I. Suemitsu, and Roberto Nicolsky, ***Flywheel Energy Storage System Description and Tests***, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No.2, June 2007.
- [2] Rubens de Andrade Jr.; J. A. A. S. Cardoso, G. C. dos Santos; L.B. de Cicco; A. F. G. Fernandes; M. A. P. do Rosário; M. A. Neves; A. P. Sousa; A. Ripper; G. C. da Costa, R. Nicolsky, and, R. M. Stephan. ***Performance of Nd-Fe-B and Ferrite Magnets in Superconducting Linear Bearings with Bulk YBCO***. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 13, No.2, June 2003.
- [3] E. G. Davi; R. M. Stephan; G. C. Costa; A. C. Ferreira; R. de Andrade Jr., R. Nicolsky, and, M. A. C. Moreira, ***Feasibility study of na HTS-Maglev line at the Federal University of Rio de Janeiro***.
- [4] G. C. Bordin, **Medida de força de levitação magnética de manais magnéticos supercondutores**. Projeto de graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, Setembro 2006.
- [5] OSTERMANN, Fernanda; PUREUR, Paulo. **Supercondutividade: Temas Atuais de Física**. 1. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005. 77 p.
- [6] UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. **Aula de la Ciência**. Disponível em: <<http://www.loreto.unican.es/AulaCiencia/SabadosFisica2005pc.html>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.
- [7] CARNEGIE MELLON UNIVERSITY. **Modern Physics Laboratory (33.340)**. Disponível em: <http://www-meg.phys.cmu.edu/physics_33340/>. Último Acesso em : 2 Janeiro 2008.
- [8] **SUPERCONDUCTIVITY**. Disponível em: <<http://hoffman.physics.harvard.edu/research/SCintro.php> >. Último Acesso em : 2 Janeiro 2008.
- [9] Disponível em: <<http://www.ecomodular.com.br/veda.htm>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.
- [10] Disponível em: <http://publish.ust.hk/univ/calfac/dspfcty_info.asp?role=student&deptid=PHYS>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.
- [11] P. V. A. Ferreira; Clayton L. C. Marcelino; G. C. Bordin; Anísio S. P. C. Real; Guilherme G. Sotelo; Rubens de Andrade Jr.; José Luiz da Silva Neto. **Implementação de um sistema**

de caracterização de mancais magnéticos supercondutores. Publicada no anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador, Bahia, Outubro 2006.

[12] Guilherme Gonçalves Sotelo. **Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Maio 2007.

[13] MOTORES DE PASSO. Disponível em: <<http://www.geocities.com/CollegePark/Dorm/8863/motordepasso.htm>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[14] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, Charles, Jr.; KUSKO, Alexander. **Máquinas Elétricas.** Tradução: Josafá Neves. 3. ed. Editora McGraw do Brasil, LTDA, 1975. 618 p.

[15] TATO EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS. **Basic Step Manual.** Disponível em: <www.tato.ind.br>. Último acesso em: 2 Janeiro 2008.

[16] Raphael das Neves Calvo. **Uso de observadores em malha fechada no controle de velocidade de motores de corrente contínua.** Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2006.

[17] ADVANTECH. **User's Manual. PCI-1711 Series.** 1 st., June 2001

[18] *THE UNIVERSITY OF IOWA. Department of Science. Douglas W. Jones. Stepping Motors.* Disponível em: <<http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/types.html>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[19] UNIVERSIDADE DE COIMBRA. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. **Actuação de um Motor de Passo.** Disponível em: <http://www.ime.eb.br/~pinho/micro/trabalhos/Mecatronica_TP1.pdf>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[20] *UNIVERSITY OF WEST INDIES. Faculty of Engineering. Department Of Electrical and Computer Engineering. Ronald de Four. EE33D-Power Eletronic Circuit.* Disponível em: <http://www.eng.uwi.tt/depts/elec/staff/rdefour/ee33d/s3_fwd.html>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[21] ANSWERS.COM. **Strain Gauge.** Disponível em: <<http://www.answers.com/topic/strain-gauge>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[22] BREITSCHAFT, Ana Maria Senra. **Física Experimental II.** Roteiro de experiências para a disciplina de Física Experimental II, Instituto de Física, UFRJ.

[23] UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. Centro de Ciência Exatas e Tecnologia em Automatização Industrial. **Célula de Carga**. Disponível em: <<http://hermes.ucs/ccet/demc/vjbrusam/inst/cel51.pdf>>. Último Acesso em: 2 Janeiro 2008.

[24] Guilherme Gonçalves Sotelo; Rubens de Andrade Jr.; and, A.C. Ferreira. **Magnetic Bearings Sets for a flywheel system**. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No.2, June 2007.