UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Física

Dipolos magnéticos da linha de transporte do feixe do Microtron

Mauricio de Lima Lopes

Dissertação apresentada
ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de mestre.

Comissão Examinadora:
Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins - IFUSP (orientador)
Prof. Dr. Nemitala Added - IFUSP
Prof. Dr. Valdir Sciani - IPEN

São Paulo
2002

FICHA CATALOGRÁFICA

**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Lopes, Mauricio de Lima

Dipolos Magnéticos da Linha de Transporte do Feixe do
Microtron.

São Paulo 2002.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo
Instituto de Física – Departamento Física Experimental

Orientador: Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins
Área de Concentração: Física

Unitermos: 1. Acelerador de Elétrons;
2. Eletroímã; 3. Microtron;
4. Transporte de feixe.

USP/IF/SBI-028/2002

RESUMO

Neste trabalho apresentamos o projeto, construção e testes de eletroímãs dipolares usados na linha de transporte do feixe do Microtron do IFUSP.

Inicialmente são feitos estudos da contribuição do campo de borda dos eletroímãs na curvatura total do feixe e posteriormente esses valores foram usados para a definição de parâmetros de projeto.

Foram construídos e caracterizados dois dipolos (30 e 45°) e ainda um eletroímã seletor ($\pm 90^\circ$) com simetria azimutal. Os resultados obtidos nos testes realizados com os dipolos mostraram um desempenho adequado à operação do acelerador.

Também é descrito um método para a simulação da trajetória de elétrons na presença de um campo magnético.

ABSTRACT

In this work we present the design, construction and testing of dipole magnets used on the beam line of IFUSP-Microtron.

Initially we studied the fringe field of the magnets on the total beam bending, these values had been used for the definition of design parameters.

It has been constructed two dipoles (30 and 45°) as well as a switch magnet ($\pm 90^\circ$) with azimuthal symmetry. The tests results of the dipoles had shown an adequate performance to the accelerator's operation.

A method for the simulation of the electron path in the presence of a magnetic field is also described.

Agradecimentos

Este trabalho não estaria completo sem que eu expressasse os meus agradecimentos às seguintes pessoas:

Ao Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins pela orientação, pelo apoio e pela paciência despendida para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Manoel Tiago Freitas da Cruz pelo incentivo e apoio e pelos conselhos utilíssimos de MATLAB e de programação;

Ao Prof. Dr. Paulo Reginaldo Pascolati pelo incentivo e pelo apoio;

Ao Prof. Dr. Jiro Takahashi pelos inúmeros conselhos;

Ao Sr. Paulo Beolchi Rios pelo inestimável apoio;

Ao Sr. Jack Tanabe pelos conselhos sobre a geometria do eletroímã seletor;

Ao corpo técnico do projeto Microtron: Alexandre Malafronte, Roberto da Rocha Lima, Marcelo Lucena, Luciano Portante, Alfredo Bonini, por toda ajuda e paciência despendida comigo;

Ao pessoal da oficina mecânica: Betão, Raimundo, Wilson, Márcio, Alex, Donato, Benedito, Miguel, Otavio, Pedrão;

Ao pessoal da eletrônica: Carlos, Eduardo, Renato;

Ao Pessoal do IPT, em especial o Sr. Donizete Macedo Costa, pelo apoio em algumas etapas do trabalho;

Aos bolsistas de iniciação científica: Takao, Tiago, Ana, Thiago Fiorini pela significativa contribuição ao trabalho;

Às secretárias do LAL: Sandra e Tereza pela paciência;

À Minha família: Rubens, Maria Leônia, Cassia, Paulo, Getúlio, Maria José, Natalia, Vinicius.

À Audrey Laiosa pelo carinho, apoio e incentivo nos momentos mais difíceis;

Aos Invencíveis: Leandro "Guri", Fabio "Belas", Ricardo "Dais", Flavio, Arthur, Juliana, Erika, Eliane;

À Kelen Martins Andrade pelo apoio;

À Carla Regina Rauber Pasa pelo incentivo;

Aos meus colegas do LAL e do IFUSP pelo apoio e incentivo;

À FAPESP pelo fundamental apoio financeiro

Dedicado aos meus pais: Rubens e Maria

*“... disciplina é liberdade,
compaixão é fortaleza e
ter bondade é ter coragem...”*
(Renato Russo - Há tempos)

Índice

Introdução.....	1
Descrição do novo acelerador	1
Linha de transporte	3
Objetivo	5
 Capítulo 1 Eletroímãs dipolares	7
Introdução	7
Nomenclatura	7
Tipos de magnetos	8
Definição dos parâmetros de um eletroímã dipolar	9
Requerimentos para a bobina:.....	12
Simulação de eletroímãs	13
 Capítulo 2 Metodologia experimental.....	15
Introdução	15
Automação do sistema de medidas.....	15
Alinhamento e teste	18
 Capítulo 3 Projeto e construção dos dipolos de 30° e 45°	23
Introdução	23
Simulação do plano XY.....	23
Correções em virtude do campo de borda.....	24
Dimensionamento elétrico das bobinas	27
Aspecto final dos dipolos	28
 Capítulo 4 Caracterização dos dipolos de 30° e 45°	29
Introdução	29
Caracterização magnética	29
Estimativa das componentes multipolares.....	31

Capítulo 5 Projeto dos dipolos de 90°	33
Introdução	33
Definição da geometria	33
Simulação do plano XY.....	34
Dimensionamento elétrico das bobinas	37
Aspecto final dos dipolos	38
 Capítulo 6 Projeto do eletroímã seletor (<i>switch magnet</i>) ..	39
Introdução	39
Simulação do plano XY.....	39
Câmara de vácuo	42
Aspecto final dos dipolos	46
 Capítulo 7 Construção, montagem e caracterização do <i>switch magnet</i>.....	47
Introdução	47
Construção	47
Montagem	48
Testes da câmara de vácuo	52
Caracterização magnética	52
 Capítulo 8 Estudo da trajetória de elétrons em um campo magnético	57
Introdução	57
Software para a simulação de trajetória de partículas em campo magnético.....	57
Teste do programa TRACE utilizando os dados dos dipolos D4 e D5	60
Comentários adicionais sobre o programa TRACE	63
 Conclusão	65
 Referências	67
 Anexos	69

Introdução

Descrição do novo acelerador

O Laboratório do Acelerador Linear (LAL) do IFUSP está construindo um acelerador de elétrons para substituir o antigo MKII, que esteve em operação de 1971 a 1993. O novo acelerador, recirculado tipo microtron [1,8], terá corrente contínua e energia máxima de 31 MeV. A mudança no fator de utilização (*duty cycle*) de 0,01% (no MKII) para 100% (no microtron) permitirá um salto qualitativo nas experiências a serem realizadas no LAL, com a introdução de experiências de coincidência, em linha. O LAL já dispõe de um monocromador de fótons [9] (*photon tagger*), capaz de produzir feixes de fótons monocromáticos com energias entre 2 e 27 MeV. As características principais do novo acelerador são resumidas na Tabela 1. A Figura 1 mostra, em vista isométrica, um desenho artístico da montagem do novo acelerador no prédio do acelerador linear. Na mesma figura pode-se ver o posicionamento do monocromador de fótons na sala experimental, que fica 2,68 m abaixo da sala do acelerador, de forma a minimizar o *background*. No lado oposto ao *tagger*, aparece a linha de feixe que será dedicada a experimentos de bremsstrahlung (com alta intensidade de feixe) ou experiências com raios-X produzidos por radiação de polarização [10]. Um dos aspectos principais do projeto da nova máquina refere-se à linha de transporte do feixe, do acelerador à sala de experiências e daí aos instrumentos e alvos. Para esse tipo de uso (tanto o uso do *tagger* quanto do cristal e goniômetro para produção de radiação de polarização) o feixe deve ter características muito precisas, compatíveis com os severos requisitos necessários para a produção de fótons no *tagger* ou no cristal. Daí a necessidade de um sistema de transporte bem calculado e projetado, de forma a garantir um feixe, no local de uso, com características de tamanho, forma e divergência adequadas.

Canhão de elétrons		
Energia de saída	100 keV ($\pm 0,1\%$)	
Corrente	1,0 mA	
Diâmetro do feixe	< 2,0 mm	
Emitância transversal	1,9 mm-mrad	
Injetor		
	Captura	Pré-acelerador
Energia de entrada (MeV)	0,1	0,9
Energia de saída (MeV)	0,9	1,8
Dispersão em energia (keV)	$\pm 2,7$	$\pm 2,3$
Diâmetro do feixe (mm)	2,4	2,6
Potência de RF (kW)	9,0	9,0
Comprimento (m)	1,00	1,47
Booster		
Energia de entrada	1,765 MeV	
Energia de saída	4,94 MeV	
Corrente	50 μ A	
Potência de RF	7,0 kW	
Ganho de energia por volta	0,63 MeV	
Número de voltas	5	
Comprimento da seção	0,78 m	
Campo magnético recirculador	0,0986 T	
Raio da primeira órbita	7,6 cm	
Raio da última órbita	18,2 cm	
Acelerador principal		
Energia de entrada	4,94 MeV	
Energia de saída	31 MeV	
Corrente máxima	50 μ A	
Ganho de energia por volta	0,93 MeV	
Número de voltas	28	
Comprimento da seção	1,04 m	
Potência de RF	13,0 kW	
Campo magnético recirculador	0,1587 T	
Raio da primeira órbita	11,5 cm	
Raio da última órbita	68,6 cm	
Características finais		
Energia máxima	31 MeV ($\pm 0,1\%$)	
Corrente máxima	50 μ A	
Diâmetro do feixe	< 2,0 mm	
Emitância transversal	1,9 mm-mrad	

Tabela 1 - Características principais do acelerador Microtron

Figura 1 - Vista isométrica do acelerador microtron

Linha de transporte

O transporte do feixe, desde o sistema de injeção até o ponto final onde serão feitas as experiências, será feito utilizando eletroímãs dipolares e quadrupolares. A Figura 2 mostra o posicionamento dos elementos óticos desde a saída do *booster* até a sala experimental (não está incluído o *microtron* principal). O projeto ótico do sistema de transporte do feixe foi calculado com auxílio do programa TRANSPORT [11], baseado em características de eletroímãs que poderiam ser construídos no laboratório. A Tabela 2 resume as características principais dos elementos dipolares de toda a linha do feixe:

Figura 2 - Posição dos dipolos ao longo da linha de feixe

Nome	Ângulo (°)
D3	-15
D4	+30
D5	-45
D6	-90*
D7	+90*
D8	+90
D9	-90
SWMAG	± 90

Tabela 2 - Nomenclatura dos dipolos

* desvio vertical

Objetivo

O objetivo desse trabalho foi o projeto dos eletroímãs dipolares da linha de transporte do feixe de elétrons, desde a saída do booster até os pontos finais (onde serão feitas as experiências), com ênfase no projeto e construção de um eletroímã seletor que terá a finalidade de desviar o feixe para uma das duas linhas de experimentos (*tagger* ou *bremsstrahlung*). São feitas considerações sobre a distribuição e uniformidade do campo magnético, campo de borda e saturação do ferro nos eletroímãs, de acordo com os parâmetros definidos pelo projeto óptico da linha.

São descritos os detalhes mecânicos das partes que compõem os eletroímãs, bem como o dimensionamento elétrico das bobinas.

Como vamos trabalhar com partículas leves (elétrons) e com baixa energia, não há necessidade de campos magnéticos muito intensos, portanto este trabalho está restrito a eletroímãs convencionais (não super-condutores).

Este texto foi escrito de tal forma a não ser somente uma dissertação, mas também uma espécie de manual introdutório para o projeto de eletroímãs dipolares. Nesse sentido, uma extensa quantidade de documentos (desenhos mecânicos, listagens de programas, entradas e saídas dos dados de simulações) foi anexada.

Capítulo 1

Eletroímãs dipolares

Introdução

Em aceleradores de partículas é comum o uso de eletroímãs dipolares. Basicamente são utilizados para a mudar a direção do movimento das partículas ou para separá-las de acordo com seus momentos. De qualquer forma, as duas ações, de deflexão e de separação de momentos, são correlacionadas [12].

Na linha de transporte do acelerador Microtron do IFUSP são utilizados eletroímãs dipolares para a condução do feixe, desde a saída da última estrutura aceleradora até o ponto onde são feitas as experiências. Para o projeto desses eletroímãs, foram observadas algumas regras, definidas basicamente pelo projeto óptico da linha de transporte. Deve ser ressaltado que o projeto de um eletroímã deve ser feito em conjunto com o projeto óptico.

Nesse capítulo, discutiremos as principais características dos eletroímãs dipolares, bem como a definição de alguns parâmetros importantes do projeto.

Nomenclatura

A Figura 3 mostra um dipolo magnético genérico salientando algumas nomenclaturas adotadas nesse texto. A distância G é conhecida como Entreferro (ou *Gap*). A distância P é chamada de face (ou parte) polar. Também é mostrado o Ferro do eletroímã (núcleo).

Figura 3 - Nomenclatura adotada.

Tipos de magnetos

Existem basicamente duas estruturas de magnetos: tipo C e tipo H, cujas seções retas podem ser vistas na Figura 4. Os eletroímãs são construídos com núcleo de ferro baixo teor de carbono, ativados com bobinas de cobre ou alumínio conectadas a uma fonte de alimentação estabilizada. A geometria tipo C é a mais usada, pois facilita o acesso para o sistema de vácuo ou outros componentes da linha do feixe, como por exemplo a extração de radiação síncrotron; no entanto essa geometria possui uma baixa rigidez mecânica e produz um campo magnético assimétrico. Já a configuração H produz linhas de campo magnético simétricas (isto é, as componentes quadrupolares do campo são praticamente eliminadas) e sua rigidez mecânica é muito maior, no entanto essa geometria fornece alguns problemas de acesso [13]. A Figura 5 mostra as duas formas básicas de eletroímãs em formato C: fechado e *flat*.

Figura 4 - Estruturas básicas de magnetos: C (direita) e H (esquerda)

Figura 5 - Magnetos em C: fechado (esquerda) e *flat* (direita)

Usualmente, são utilizadas faces polares em forma circular, quando é desejado defletir o feixe para a esquerda ou direita em ângulos variáveis (como é o caso de um eletroímã seletor). Se apenas um ângulo de curvatura será utilizado, pode-se construir a face polar de tal forma a acompanhar a trajetória do feixe ou mesmo em formato retangular, reduzindo os custos de usinagem (Figura 6). Os dois últimos magnetos descritos são chamados de *sector* ou *wedge* (esses nomes vêm do fato que a região de campo pode ser considerada como um corte em uma circunferência). Geralmente são usados com o formato C, para facilitar a colocação da câmara de vácuo.

Figura 6 – Formatos de face polar: circular (esquerda), setor com corte em ângulo (centro) e setor com corte retangular (direita)

Definição dos parâmetros de um eletroímã dipolar

Em virtude da existência do campo de borda e deste ser responsável por um percentual do desvio da trajetória das partículas é necessário levá-lo em consideração na definição dos parâmetros de construção e de operação do eletroímã. Para isso utilizamos como base o perfil de campo de um eletroímã de 15°.

Estes dipolos foram parte do trabalho de conclusão de curso do aluno da FATEC Jayson Takao Taromaru [14]. Neste eletroímã foram feitas algumas hipóteses sobre a extensão do campo de borda baseados nos perfis de campo dos eletroímãs do *booster*.

Apesar de algumas deficiências nas medidas de caracterização do campo magnético dos dipolos, o trabalho do Sr. Taromaru pode nos fornecer importantes parâmetros do campo de borda, úteis para o projeto dos outros dipolos.

A Figura 7 mostra o sistema de coordenadas adotado para as medidas do Sr. Taromaru e a Figura 8 mostra o perfil da componente B_y do campo magnético (normalizado) ao longo do eixo z.

Figura 7 - Sistema de coordenadas adotado

Figura 8 - Mapeamento de $B_y(z)$

Podemos observar na Figura 8 a existência de basicamente duas regiões: um platô (compreendido entre os pontos 70-130 mm), que corresponde à região de campo constante (dentro de 1% de variação) no interior do dipolo e as regiões de campo de borda (compreendidas entre os pontos 0-70 mm e 130-200 mm). Esses dados permitiram a obtenção de alguns parâmetros importantes, que devem ser levados em conta na construção dos eletroímãs dipolares.

i) Dimensões do dipolo e ângulo de curvatura

O campo de borda faz com que parte do desvio que as partículas irão sofrer ocorra fora do dipolo. É necessário descobrir qual a contribuição do campo de borda (bem como do dipolo de fato) na curvatura total. A integral do campo magnético é diretamente proporcional ao desvio da partícula (desde que

a partícula tenha velocidade constante, como é o caso), por isso podemos fazer os cálculos baseados na área sob a curva da Figura 8.

Como os dipolos de 15° tinham 100 mm de extensão ao longo da direção do feixe, calculamos na Figura 8, a área entre os limites da face polar (entre os pontos 50 e 150 mm), bem como a área da região fora do dipolo (entre os pontos 0-50 mm e 150-200 mm).

Observação: É importante salientar que, mesmo dentro do dipolo, o campo não é constante, diminuindo de intensidade nas regiões próximas às bordas.

O campo na região interna do dipolo tem a contribuição de 77,2 % da curva total. Com esse resultado é possível definir o ângulo de construção de um dipolo (usualmente chamado de ângulo de ataque) de forma que o feixe entre e saia perpendicularmente às faces polares, para que não sejam introduzidos efeitos de focalização no dipolo. Por exemplo, se desejamos fazer uma curva de 60°, então devemos construir um dipolo que tenha aproximadamente 51° de curvatura (77% de 60°).

ii) Caracterização do campo

Também é necessário determinar a intensidade do campo para que o feixe faça a curva estipulada. Para isso é necessário saber qual o percentual do campo uniforme é responsável pelo desvio. Calculou-se então a área limitada entre os pontos 70 e 130 mm em relação à área total.

Região de campo uniforme: responsável por 47,2 % da área total.

Com este resultado é possível determinar qual o campo necessário para o dipolo desviar o feixe do ângulo desejado, já que de posse do ângulo e do comprimento, obtém-se o raio de curvatura e consequentemente o campo magnético necessário pela seguinte relação [15]:

$$B = \frac{1}{0,2998} \frac{1}{r} \sqrt{E^2 + 2E_0 E} \quad (1)$$

onde B é o campo magnético em kG; r é o raio de curvatura da trajetória da partícula em cm, E e E_0 são a energia cinética e energia de repouso do elétron, respectivamente, em MeV.

Por exemplo, se desejamos que o feixe descreva uma curva de 60° então devemos calcular qual o raio de curvatura de um dipolo ideal com 60 mm de comprimento efetivo e um ângulo de 28,3° (47% de 60°), ou seja, $r = 121,5$ mm. Com isso é possível, utilizando a Equação 1, determinar o valor do campo magnético necessário para a deflexão do feixe.

Observação: todos os valores apresentados anteriormente são válidos para um dipolo de 100 mm de comprimento e gap de 24 mm

No capítulo 3 veremos com mais detalhes o uso desses parâmetros aplicados aos casos dos eletroímãs de 30 e 45°.

Requerimentos para a bobina:

Uma informação muito relevante para o projeto de eletroímãs dipolares é a relação Ni (ou Amperes-espira). Esse número nos dá uma estimativa para a dimensão da seção reta da bobina. Para isso, consideremos o dipolo genérico da Figura 9.

Figura 9 - Dipolo genérico.

Se definirmos uma curva C sendo percorrida no sentido horário (como mostrado na Figura 9), pela lei de Ampère temos [16]:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_B^A \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni$$

Como $\vec{B} = \mu_{meio} \vec{H}$ e $\mu_{ferro} \gg \mu_{Ar} \approx \mu_0$, além de que a componente perpendicular do campo na interface entre os meios se conserva, temos que $\int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{l} \gg \int_B^A \vec{H} \cdot d\vec{l}$. Portanto, para uma aproximação do campo entre as faces polares, temos:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} \cong \int_A^B \vec{B} \cdot d\vec{l} = Bh = \mu_0 Ni$$

$$N_i = \frac{Bh}{\mu_0} \quad (2)$$

onde h é a distância entre os pólos (*gap*) em metros, B é o campo magnético em Teslas e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Simulação de eletroímãs

Para se chegar às dimensões finais de um eletroímã ou para se obter informações sobre a uniformidade de campo na região da face polar ou mesmo a distribuição de campo na região do ferro, é necessário à utilização de programas específicos para o cálculo de campos magnéticos em duas dimensões. Esses programas realizam os cálculos utilizando as técnicas de diferenças finitas ou elementos finitos [17]. Nesse trabalho utilizamos dois programas: POISSON [18] e o FEMM [19]. O POISSON é um programa desenvolvido pela equipe do *Los Alamos National Laboratory* e consagrado na comunidade científica. No entanto a utilização dessa ferramenta pode ser um pouco complicada para usuários iniciantes, uma vez que a definição do problema a ser resolvido demanda a entrada de muitos parâmetros na forma de um arquivo texto. Já o FEMM é um programa que possui uma interface muito mais amigável ao usuário, portanto, mais simples de utilizar. No entanto com o FEMM não é possível realizar uma série de outros cálculos, como por exemplo, análise harmônica, necessária para se ter uma estimativa das componentes multipolares do magneto.

É importante salientar que, tanto o POISSON quanto o FEMM, podem ser obtidos na internet de forma gratuita e que existem outros programas comerciais similares (ou até mesmo mais poderosos), que realizam até mesmo cálculos em três dimensões (como o OPERA-3D).

Capítulo 2

Metodologia experimental

Introdução

Uma vez que se pretendia não somente projetar, mas também construir e caracterizar os eletroímãs, foi necessário estabelecer uma metodologia experimental.

Basicamente a caracterização de um eletroímã é o mapeamento do seu campo magnético. Neste capítulo, apresentaremos o sistema utilizado para essas medidas.

Automação do sistema de medidas

Na ocasião em que foram construídos os eletroímãs do *booster*, foi utilizada para sua caracterização uma mesa (capaz de se movimentar em dois eixos) de fabricação do LAL. A mesa, com dimensões de $1 \times 2 \text{ m}^2$, resolução de 0,63 mm e reprodutibilidade melhor que 0,05 mm, pode ser vista na Figura 10.

Esta mesa possuía um programa de controle específico para eletroímãs cuja geometria fosse semicircular (como é o caso dos eletroímãs do *booster*). O antigo programa possuía uma interface de comandos do tipo DOS, de tal forma que a entrada dos parâmetros de operação era feita através de linhas de comando, o que dificultava a operação por parte do usuário, pois era necessário, em muitos casos, recorrer ao manual para descobrir um determinado comando.

Figura 10 - Mesa XY

Optamos por um novo programa de controle, de tal forma que a geometria fosse determinada pelo operador, seja qual fosse a forma do eletroímã. Optou-se por fazer uma interface gráfica, mais amigável ao usuário. Neste novo programa (escrito em linguagem C para um microcomputador PC) o usuário define uma área de mapeamento utilizando as setas do teclado ao mesmo tempo em que observa os carros se movimentando. Isto garante que a sonda não colida com qualquer obstáculo (por exemplo, uma face do dipolo ou a bobina) garantindo a segurança dos equipamentos. Durante a etapa do mapeamento o usuário pode escolher qual o tamanho do intervalo de medida, podendo optar por um mapeamento detalhado (que demanda cerca de 1 hora em uma área de $400 \times 200 \text{ mm}^2$), ou fazer um mapeamento menos detalhado e consequentemente mais rápido (cerca de 20 minutos). É possível ainda acompanhar a evolução do mapeamento em relação à área total e também saber qual o valor de campo na posição atual da sonda (segundo um sistema de coordenadas próprio). A Figura 11 mostra uma tela típica do novo software.

Figura 11 - Interface do novo programa de controle da mesa XY

A listagem do novo programa de controle da mesa XY encontra-se no Anexo - A.

Os mapeamentos são feitos utilizando um sensor de efeito Hall (sensível à componente do campo magnético normal a sua face, conforme Figura 12) F.W. Bell, modelo HTL-0608, conectado a um Gaussímetro analógico F.W. Bell modelo 640. O Gaussímetro é ligado ao computador por meio de uma placa Conversora Analógico-Digital (ADC). É feita uma calibração de "campo zero" do equipamento de tal forma que o campo medido é devido apenas ao eletroímã.

Figura 12 - Ponta de efeito Hall

Alinhamento e teste

Para o alinhamento dos dipolos foi construído um suporte que permite regulagem de altura e seu nivelamento. As posições da mesa e do suporte são fixas de maneira a garantir a reprodutibilidade das medidas. A Figura 13 mostra um dipolo fixado no suporte descrito acima.

Figura 13 - Dipolo fixado no suporte para caracterização

Os testes deste novo sistema de mapeamento automático foram feitos utilizando 3 dipolos de 15° (D1 a D3), pois já haviam sido mapeados manualmente. Esses dipolos seriam inicialmente usados na linha de injeção do *booster*. Melhorias na malha de distribuição de microondas permitiram a eliminação dos dipolos D1 e D2.

Os resultados dos mapeamentos são fornecidos através de uma tabela de campo em função da posição (apenas a componente Y do campo). Após um tratamento utilizando programas matemáticos (MATLAB e Origin) são obtidas as curvas de nível características desses dipolos. Estas curvas de nível são apresentadas nas Figuras 13a, b e c (D1, D2 e D3 respectivamente). É importante ressaltar que os resultados das Figuras 13a, b e c são dados de

campo em função de uma certa área definida pelo operador e estes dados após tratamento são apresentados de forma normalizada.

Como podemos ver na Figura 15, estes resultados estão compatíveis com o mapeamento manual realizado pelo Sr. Taromaru em relação à extensão do campo de borda. É importante lembrar que os dados levantados pelo Sr. Taromaru foram feitos ao longo de uma linha e que os mapeamentos realizados com a mesa XY são feitos em uma área. Para obter a Figura 15, extraímos de cada um dos mapeamentos das Figura 14a, b e c uma linha, para que se possa comparar com os dados obtidos manualmente.

Durante o mapeamento, os dipolos são alimentados por uma fonte de corrente contínua estabilizada. Os dipolos são ligados à fonte por cerca de 1 hora (no caso do eletroímã seletor 8 horas) antes das medidas serem iniciadas para que a fonte e o eletroímã permaneçam termicamente estáveis durante o mapeamento.

Observação: Outras caracterizações tais como medidas das componentes multipolares (usualmente feito com o método da bobina rotativa) ou ensaios de saturação do ferro não foram feitas. Veremos nos próximos capítulos que é possível obter uma estimativa dessas informações através de simulações, com razoável confiabilidade.

(a)

(b)

(c)

Figura 14 - Resultados dos mapeamentos dos dipolos (a) D1, (b) D2 e (c) D3

Figura 15 – Comparação entre os mapeamentos dos dipolos D1, D2 e D3 feitos com a mesa XY e o mapeamento realizado de forma manual.

Capítulo 3

Projeto e construção dos dipolos de 30° e 45°

Introdução

Neste capítulo iremos apresentar o projeto dos dipolos D4 (30°) e D5 (45°). Será feito o dimensionamento dos dipolos no plano XY por meio de simulações, bem como as correções dos parâmetros de construção em virtude do campo de borda, como foi visto no capítulo 1. Também será mostrado o dimensionamento elétrico das bobinas

Simulação do plano XY

No dipolo D3 utilizou-se uma configuração de dipolo C tipo *flat*. Para os dipolos D4 e D5 não é possível este tipo de configuração, pois os campos envolvidos são consideravelmente maiores e portanto não conseguiríamos projetar uma bobina que suportasse a corrente necessária. Por isso optou-se por uma configuração em C fechada. Desta forma ganha-se maior liberdade para o projeto da bobina.

A Figura 16 mostra o perfil XY dos dipolos D4 e D5 (perfil comum aos dois dipolos). O círculo indica a posição tubo por onde passará o feixe e a área hachurada indica a seção reta da bobina.

Para se chegar às dimensões finais do perfil XY, inicialmente utilizamos as dimensões do dipolo D3 (como por exemplo espessura do ferro) e mais tarde modificamos estas dimensões baseadas nos cálculos fornecidos pelo POISSON, observando a uniformidade de campo na região da face polar, a intensidade de campo na região do ferro (para não haver saturação do material) e por último a definição de uma seção reta para a bobina. Esses

resultados fornecidos pelo POISSON serão apresentados no próximo capítulo juntamente com os resultados dos mapeamentos.

Figura 16 - Perfil dos dipolos D4 e D5 (medidas em mm)

Observação: A listagem do arquivo de entrada do programa POISSON encontra-se no anexo - B.

Correções em virtude do campo de borda

Como já discutido, vimos que a presença do campo de borda implica em algumas correções no projeto dos dipolos.

O perfil de campo apresentado na Figura 8 é válido para um dipolo de 100 mm de comprimento e um *gap* de 24 mm. Adotando estes valores e lembrando que para esta configuração o campo na região interna do dipolo é responsável por 77,2% da curvatura total, podemos então definir os ângulos totais dos dipolos.

D4:

ângulo de curvatura = 30°

ângulo real = $30^\circ \times 0,772 = 23,16^\circ$

ângulo de construção = 23°

D5:
 ângulo de curvatura = 45°
 ângulo real = $45^\circ \times 0,772 = 34,74^\circ$
 ângulo de construção = 35°

Com estes valores definidos e fixando o comprimento da trajetória do feixe no dipolo em 100 mm, obtemos os raios de curvatura na região de campo uniforme.

D4:
 Raio de curvatura = 249,1 mm

D5:
 Raio de curvatura = 163,7 mm

De posse destes valores é possível determinar, com o uso da Equação 1, qual é o campo necessário para elétrons com energia de 5,0 MeV fazerem as curvas com os respectivos raios de curvatura determinados acima. Lembrando que para isso é necessário que o dipolo tenha um comprimento virtual de 60 mm e também que o ângulo de curvatura nessa região é 47,2 % da curvatura total.

D4:
 Campo magnético = 754 G

D5:
 Campo magnético = 1131 G

A Tabela 3 nos traz um resumo das características dos dipolos após as correções.

	D4	D5
Ângulo de construção	23°	35°
Raio de curvatura	249,1 mm	163,7 mm
Campo Magnético	754 G	1131 G
Gap	24 mm	24 mm
Comprimento efetivo	97,5 mm	98,9 mm

Tabela 3 - Resumo das características dos dipolos D4 e D5

A Figura 17 mostra as vistas superiores dos dipolos D4 e D5 respectivamente.

Figura 17 - Vista superior dos dipolos de 30° (em vermelho) e 45° (em azul)

A Figura 18 mostra o aspecto 3D dos dipolos D4 e D5.

Figura 18 - Aspecto 3D dos dipolos D4 e D5

Dimensionamento elétrico das bobinas

Ao mesmo tempo em que é feita a otimização da geometria do ferro com o POISSON, otimiza-se também a área da seção reta da bobina. Depois de definida a seção da bobina é necessário fazer o dimensionamento elétrico (bitola do fio, número de voltas, tensão de alimentação, etc.). As Tabelas 4a e b nos dão as características elétricas para as bobinas dos dipolos D4 e D5 respectivamente.

Para o dimensionamento elétrico escolheram-se 5 bitolas diferentes de fio e verificou-se a corrente necessária por espira, a diferença percentual entre a corrente nominal máxima e a de operação (para determinar uma margem de segurança no caso de se querer passar uma corrente maior do que a necessária) e tensão de operação.

Das Tabelas 4a e b podemos ver que fatores como potência dissipada e massa total são praticamente invariantes com a escolha da bitola do fio. Optou-se por fazer as duas bobinas com as mesmas características, utilizando fio AWG 17, que permite uma tensão de operação compatível com as fontes de tensão existentes no mercado.

As bobinas foram confeccionadas na empresa Líder Transformadores Ltda. sobre um molde metálico fornecido (o desenho encontra-se no anexo -C).

AWG	Dímetro (mm)	Quantidade de espiras	Corrente por espira (A)	Corrente nominal (A)	D%	Resistência total (Ω)	Tensão (V)	Potência dissipada (W)
14	1,678	476	3,8	6,0	37,0	1,1	4,0	15,0
15	1,500	640	2,8	4,8	41,4	1,8	5,0	14,1
16	1,341	792	2,3	3,7	38,6	2,8	6,3	14,3
17	1,200	1000	1,8	3,2	43,8	4,4	7,9	14,3
18	1,074	1242	1,4	2,5	42,0	7,0	10,1	14,6

(a)

AWG	Dímetro (mm)	Quantidade de espiras	Corrente por espira (A)	Corrente nominal (A)	D%	Resistência total (Ω)	Tensão (V)	Potência dissipada (W)
14	1,678	476	5,9	6,0	2,0	1,1	6,2	36,4
15	1,500	640	4,4	4,8	8,9	1,8	7,8	34,1
16	1,341	792	3,5	3,7	4,4	2,8	9,8	34,5
17	1,200	1000	2,8	3,2	12,5	4,4	12,4	34,6
18	1,074	1242	2,3	2,5	9,8	7,0	15,7	35,4

(b)

Tabela 4 - Características elétricas para as bobinas (a) D4 (b) D5

Aspecto final dos dipolos

A Figura 19 mostra o aspecto final dos dipolos após as etapas de usinagem e acabamento (no caso a foto mostra o dipolo D5).

Figura 19 - Aspecto final dos dipolos

Capítulo 4

Caracterização dos dipolos de 30° e 45°

Introdução

As caracterizações dos eletroímãs D4 e D5 envolveram apenas o mapeamento da componente Y do campo magnético. Este mapeamento é suficiente para verificarmos possíveis discrepâncias entre o projeto e a construção (com respeito a uniformidade do campo) e às hipóteses feitas sobre a extensão do campo de borda. Como foi mencionado no capítulo 2, não foi possível medir as componentes multipolares do campo magnético. No entanto foi feita uma estimativa desses valores, que são apresentados no final do capítulo.

Caracterização magnética

As Figuras 19a e b mostram as curvas de nível resultantes das medidas dos dipolos D4 e D5 respectivamente. Podemos perceber por estas figuras que os comportamentos dos dipolos D4 e D5 são muito semelhantes no que diz respeito à extensão do campo de borda. As figuras mostram também um pequeno erro de alinhamento entre o dipolo e a sonda, caracterizado por uma rotação das curvas de nível; este erro, porém, não prejudica a análise qualitativa e quantitativa dos magnetos¹.

¹ Veremos no capítulo 8 que é possível corrigir esse problema a posteriori.

Figura 20 - Resultados dos mapeamentos dos dipolos (a) D4 e (b) D5

Comparamos também a previsão dada pelo programa POISSON com os resultados das medidas de campo magnético na região polar ao longo do eixo X. Esses resultados encontram-se na Figura 21.

Figura 21 - Comparação entre os resultados do POISSON e dos mapeamentos dos dipolos D4 e D5

Podemos perceber que de maneira geral os dois dipolos concordam muito bem com a simulação feita pelo POISSON.

Estimativa das componentes multipolares

É necessário também se determinar as componentes multipolares, pois são importantes para o comportamento do feixe ao longo da trajetória (tal como efeitos de focalização). No entanto não é viável verificarmos com este equipamento as componentes multipolares do magneto pois envolveria medir todas as componentes do campo (B_x , B_y e B_z) em um volume que contivesse o campo diferente de zero.

O programa POISSON fornece uma análise harmônica e conseqüentemente as componentes multipolares do magneto em questão. Os dados fornecidos por esta análise correspondem, com uma precisão bastante boa [20], àqueles determinados experimentalmente por um método que utiliza bobina rotativa [21].

Apresentamos na Tabela 5 as componentes multipolares desses magnetos obtidas através da análise harmônica do POISSON. Este dados são obtidos através dos coeficientes da expansão do campo magnético em termos das componentes multipolares, que têm a seguinte forma:

$$B \propto \sum_{n=1}^{\infty} (A_n + iB_n)$$

onde A_n é o coeficiente da parte real e B_n da parte complexa da expansão do vetor de campo magnético B em termos dos multipolos (n)

n	A_n	B_n
1	-1,3E+03	0,0E+00
2	-1,5E+01	0,0E+00
3	2,4E+01	0,0E+00
4	-1,7E+01	0,0E+00
5	1,1E+01	0,0E+00
6	-3,7E+00	0,0E+00
7	9,0E-01	0,0E+00
8	5,2E-01	0,0E+00
9	5,2E-01	0,0E+00
10	3,1E-01	0,0E+00

Tabela 5 – Saída da simulação do POISSON das componentes multipolares dos magnetos D4 e D5

Podemos perceber que a componente mais importante (em módulo) é de fato a fundamental (dipolo, $n=1$). Para um magneto qualquer, apenas algumas componentes multipolares são permitidas, segundo a relação:

$$n = N(2m+1)$$

onde $m=0,1,2,3,\dots$; n são as componente permitidas e N é o tipo de magneto em questão ($N=1$ para dipolo, $N=2$ para quadrupolo, etc.)

Desta forma era de se esperar que a primeira componente multipolar permitida (além da fundamental) seria a componente de sextupolo ($n=3$). No entanto podemos perceber que existe uma componente de quadrupolo ($n=2$) da mesma ordem de grandeza da de sextupolo. Isto se deve ao fato de que este é um dipolo tipo *C*. Tal fato produz uma certa assimetria das linhas de campo que não acontecem em um dipolo tipo *H*, por exemplo.

No entanto, a estimativa de componentes multipolares só é necessária para aceleradores cujos feixes passam diversas vezes no mesmo dipolo (como é o caso de um anel de armazenamento), pois as contribuições dos multipolos de ordem superior se somam em cada volta e se tornam relevantes do ponto de vista de ótica de feixe. No caso dos dipolos da linha de transporte do Microtron, as contribuições dos multipolos de ordem superior podem ser compensadas (com o uso de lentes quadrupolares) ou são irrelevantes.

Capítulo 5

Projeto dos dipolos de 90°

Introdução

Assim como nos dipolos D4 e D5, fizemos o dimensionamento dos dipolos de 90° (D6 a D9), fazendo todas as correções pertinentes.

Definição da geometria

Normalmente temos utilizado um dipolo de 100 mm de comprimento e um entreferro (*gap*) de 24 mm. Adotando estes valores vimos que o campo na região interna do dipolo é responsável por 77,2% da curvatura total. No entanto, devemos lembrar que esses dipolos de 90° serão utilizados para desviar o feixe com energia desde 5 MeV até 31 MeV. Se calcularmos o raio de curvatura para que uma partícula faça um desvio de 90° em um arco de 100 mm obtemos aproximadamente 64 mm. Isto corresponde a um campo (para uma partícula de 31 MeV) de aproximadamente 1,6 T. Este é um campo relativamente alto se considerarmos os campos de saturação dos materiais que normalmente são utilizados. Além disso, o tamanho da bobina que precisaríamos para gerar este campo seria muito grande e o eletroímã não apresentaria a resistência mecânica necessária para suportá-la.

Para contornar este problema, aumentamos o raio de curvatura para 350 mm, implicando também em um aumento do comprimento interno da trajetória, passando de 100 para 550 mm. Com isso, necessitamos de um campo de operação de aproximadamente 0,3 T (para o feixe de 31 MeV).

Com o aumento do comprimento interno, a contribuição do campo na região interna do dipolo sobe para 96%. Isso se deve ao fato de que ampliamos a região de campo uniforme de 60 para 510 mm, portanto as razões entre campo na região interna do dipolo e fora dele mudam. Portanto o ângulo de construção é:

$$\text{ângulo de curvatura} = 90^\circ$$

$$\text{ângulo real} = 90^\circ \times 0,96 = 86,40^\circ$$

ângulo de construção = 86°

A Figura 22 mostra a vista de topo da geometria adotada para os dipolos de 90° . A linha pontilhada indica a centróide do feixe.

Figura 22 - Vista de topo da geometria dos dipolos de 90° (medidas em mm)

Simulação do plano XY

Assim como nos dipolos D4 e D5, utilizaremos uma configuração para os dipolos D6 a D9 do tipo C fechado.

Para as dimensões do dipolo, tomamos como base os valores dos dipolos D1 a D3, mais tarde modificados com base nos cálculos fornecidos pelo programa POISSON, observando a uniformidade de campo na parte polar, a intensidade de campo na região do ferro (para não haver saturação do material) e por último a definição de uma região para a bobina.

Observação: Os arquivos de entrada e saída do programa POISSON encontram-se no anexo - B.

A Figura 23 mostra o perfil XY dos dipolos D6 a D9. O círculo indica a posição do tubo por onde passará o feixe e a área hachurada indica a secção reta da bobina.

Figura 23 - Perfil XY dos dipolos de 90°

As Figura 24 e Figura 25 mostram o resultado da simulação com o programa POISSON.

Figura 24 - Resultado da simulação do perfil XY no POISSON

Figura 25 - Ampliação do gráfico da figura 10 destacando a região da face polar

Utilizamos também o programa FEMM para verificarmos a distribuição de campo no ferro do dipolo. A Figura 26 mostra o resultado dessa simulação. A simulação feita com o FEMM foi ajustada de tal forma a obter um campo na região uniforme de aproximadamente 0,4 T. Obviamente esse campo é maior do que aquele necessário para que o feixe sofra o desvio desejado. No entanto utilizamos um campo um pouco maior, como margem de segurança, para verificar se não ocorre saturação em nenhuma parte do dipolo. Como podemos observar, todo o dipolo tem um campo abaixo de 1,4 T, ou seja, nenhum problema de saturação com essa geometria.

Figura 26 - Distribuição de campo magnético no dipolo de 90°

Dimensionamento elétrico das bobinas

Ao mesmo tempo em que é feita a otimização da geometria do ferro com o POISSON, otimiza-se também a área da seção reta da bobina. Depois de definida a seção da bobina, é necessário fazer o dimensionamento elétrico (bitola do fio, número de voltas, tensão de alimentação, etc.).

A Figura 27 mostra a geometria da bobina que será utilizada.

Figura 27 - Geometria da bobina (dimensões em mm).

Para a bobina do dipolo de 90° , escolheu-se o fio AWG 15, cuja bitola é de 1,5 mm. Para uma seção de 80 x 100 mm é possível o agrupamento de $53 \times 66 = 3498$ espiras. Descontando 40% da área disponível como perdas devidas ao encapamento entre camadas da bobina, obtemos um total de 2100 espiras:

O fabricante nos informa que a corrente máxima para o fio 15 é 4,95 A. A valor máximo de Amperes-espira, a ser utilizada segundo a simulação feita no POISSON, é de 8000 Ae. Isto equivale a termos uma corrente de 3,8 A circulando pela bobina.

O fabricante nos informa também que a resistência é de $10,30 \, \Omega/\text{km}$. Adotando um perímetro médio de 0,7 m, implica em um comprimento total de aproximadamente 1500 m. Portanto teremos uma resistência de aproximadamente $16 \, \Omega$. A Tabela 6 resume as principais características da bobina.

Fio adotado	AWG 15
Bitola do fio	1,5 mm
Número de espiras	2098
Resistência total da bobina	16 Ω
Tensão máxima da fonte	80 V
Corrente máxima da fonte	5 A

Tabela 6 - Características das bobinas

As bobinas serão confeccionadas na empresa Líder Transformadores Ltda. sobre um molde metálico fornecido pelo LAL (o desenho encontra-se no anexo - C).

Aspecto final dos dipolos

A Figura 28 mostra o aspecto final com um modelo 3D dos dipolos de 90°. A Tabela 7 nos traz um resumo das características dos eletroímãs.

Figura 28 - Modelo 3D dos dipolos de 90°

Ângulo de construção	86°
Raio de curvatura	350 mm
Campo Magnético (E=31MeV)	0,3 T
Comprimento central	550 mm
Gap	24 mm
Massa do ferro	240 kg
Massa da bobina	30 kg
Massa total do eletroímã	270 kg

Tabela 7 - Resumo das principais características dos dipolos de 90°

Capítulo 6

Projeto do eletroímã seletor (*switch magnet*)

Introdução

Este é o último modelo de eletroímã dipolar que compõe a linha de transporte do feixe (excetuando-se os eletroímãs do microtron principal). Este eletroímã tem a finalidade de direcionar o feixe para uma das duas linhas de experiências. Conforme a Figura 1, que mostra a posição das linhas experimentais do acelerador, necessitamos de um eletroímã capaz de deslocar o feixe de $\pm 90^\circ$.

A geometria escolhida, de tal forma a resolver o problema com apenas um elemento e, desta forma, facilitar o projeto óptico, era única: tipo H. Essa é a geometria que normalmente é adotada para um *switch magnet*. No entanto, esses dipolos desviam o feixe em ângulos rasos (tipicamente até 45°). Então era necessário que se adaptasse essa geometria ao nosso problema. A solução encontrada foi a de um eletroímã com simetria azimutal.

Simulação do plano XY

A definição da geometria do *switch magnet* obedeceu a alguns critérios. Como o espaço físico do prédio era limitado, desejávamos obter um eletroímã que fosse relativamente compacto. Determinamos o tamanho da peça polar, de tal forma que o feixe descrevesse uma trajetória com o menor raio de curvatura possível. No entanto, se tomássemos um raio de curvatura muito pequeno significaria ter um campo muito intenso, ou seja, poderíamos ter um campo que fosse maior que o campo de saturação do material usado. Também a bobina necessária para produzir esse campo poderia ser muito grande, e pelo fato de ela estar contida no eletroímã, aumentaria as outras dimensões do dipolo, inviabilizando a construção. Otimizamos as dimensões do eletroímã de maneira

a ter uma face polar de 110 mm de raio (o mesmo valor para o raio de curvatura do feixe). Com isso o campo magnético necessário para desviar os elétrons com 31 MeV é de aproximadamente 1T.

As demais dimensões do *switch magnet* foram obtidas com base nos cálculos fornecidos pelo programa POISSON, observando a uniformidade de campo na parte polar, a intensidade de campo na região do ferro (para não haver saturação do material) e por último a definição de uma região para a bobina. Inicialmente utilizamos um *gap* de 24 mm (padrão para os outros magnetos dipolares da linha do feixe). No entanto, com a necessidade de se colocar uma câmara de vácuo no interior do dipolo (como será descrito mais à frente), tivemos que aumentar o *gap* para 31 mm. As Figuras 28 e 29 mostram a geometria do *switch magnet*. A linha verde na Figura 29 representa o caminho esperado do feixe de elétrons.

A Figura 31 mostra o resultado da simulação feita pelo programa POISSON.

Observação: Os arquivos de entrada e saída do programa POISSON encontram-se nos anexos - B.

Figura 29 - Geometria do *switch magnet* – vista em corte (medidas em mm).

Figura 30 - Geometria do *switch magnet* – vista de topo (medidas em mm)

Figura 31 - Resultado da simulação do campo magnético com o programa POISSON.

Vale lembrar que o resultado da Figura 31 é para um corte do eletroímã. Mas como vimos anteriormente, o *switch magnet* tem simetria azimutal, portanto o campo produzido por este magneto é aquele apresentado na Figura 32. Esse resultado foi obtido através da simulação da rotação dos dados fornecido pelo POISSON, utilizando o MATLAB.

Figura 32 - Simulação do campo produzido pelo *switch magnet*.

A vantagem desse tipo de configuração, onde há uma simetria azimutal, é que o campo magnético produzido pelo dipolo fica confinado em seu interior, não existindo campo de borda.

Utilizamos também o programa FEMM para verificarmos a distribuição de campo no ferro, assim como foi feito com o dipolo de 90°. A Figura 33 mostra o resultado dessa simulação. A simulação feita com o FEMM foi ajustada de tal forma a obter um campo na região uniforme de aproximadamente 1 T. Como podemos observar todo o dipolo tem um campo abaixo de 1,6 T, ou seja, nenhum problema de saturação com essa geometria (usualmente os ferros saturam em 2,2 T [18]).

Figura 33 - Distribuição de campo magnético no *switch magnet*.

Câmara de vácuo

Em todo o trajeto, desde o canhão de elétrons até o experimento, o feixe de elétrons permanece em vácuo. Em todos os outros dipolos, é usada como câmara de vácuo a própria tubulação do feixe. No caso do *switch magnet*, não existe uma tubulação interna. Daí a necessidade de termos uma câmara de vácuo especialmente desenhada para esse magneto.

Dentre todas as soluções possíveis, optamos por utilizar a própria estrutura do eletroímã como câmara. Para isso dividimos o eletroímã em três partes: dois discos e um anel espaçador. O vácuo é feito na região interna do anel. Além disso, eram necessárias duas tampas de latão para isolar as bobinas da região em vácuo, evitando, dessa forma, vazamentos virtuais provenientes do enrolamento.

Foi feito um rebaixo de 4 mm nos discos onde é encaixada a tampa de latão, também utilizado para a colocação do anel de vedação (*gasket*). Utilizaremos um *gasket* metálico feito de um fio de estanho (99,7%) com 1 mm de diâmetro.

A Figura 34 mostra esquematicamente a câmara de vácuo detalhando os rebaiços nos discos.

É possível atingir com facilidade uma pressão de 10^{-3} torr, com um sistema de vácuo convencional, mesmo que esse sistema encontre-se relativamente distante da câmara. Essa pressão é suficientemente baixa para a passagem dos elétrons, uma vez que a perda de energia para elétrons de 5 MeV nesta pressão é de aproximadamente $2 \cdot 10^{-5}$ keV/cm [22]. Essa perda de energia é cerca de 10^5 vezes menor que a dispersão de energia do feixe (que é 0,1% da energia do feixe). Portanto a perda de energia dentro da câmara, mesmo com essa pressão, é desprezível.

Figura 34 - Esquema da câmara de vácuo

Dimensionamento elétrico das bobinas

Como nos casos anteriores, depois de definida a seção da bobina, é necessário fazer seu dimensionamento elétrico (bitola do fio, número de voltas, tensão de alimentação, etc.).

A geometria da bobina que será utilizada é a de um solenóide, facilitando bastante a construção, pois não necessita de um molde especial. A Figura 35 mostra a geometria da bobina.

Figura 35 - Geometria da bobina do *switch magnet* (medidas em mm).

Para a bobina do *switch magnet*, escolheu-se o fio AWG 12, cuja bitola é de 2,110 mm. Para uma seção de 70 x 150 mm é possível o agrupamento de $33 \times 71 = 2343$ espiras. Descontando 40% da área disponível como perdas devidas ao encapamento entre camadas da bobina, obtemos um total de 1400 espiras:

O fabricante nos informa que a corrente máxima para o fio 12 é 9,90 A. O valor máximo de Amperes-espiras, a ser utilizada segundo a simulação feita no POISSON, é de 11000 Ae. Isto equivale a termos uma corrente de 7,82 A circulando pela bobina.

Segundo o fabricante, a resistência é de 5,13 Ω /km. Adotando um perímetro médio de 1,19 m implica em um comprimento total de aproximadamente 1673 m. Portanto teremos uma resistência de aproximadamente 9 Ω . A Tabela 8 resume as principais características da bobina.

Fio adotado	AWG 15
Bitola do fio	2,1 mm
Número de espiras	1406
Resistência total da bobina	9 Ω
Tensão máxima da fonte	200 V
Corrente máxima da fonte	10 A

Tabela 8 - Características das bobinas

As bobinas foram confeccionadas na empresa Líder Transformadores Ltda.. A Figura 36 mostra a bobina a ser utilizada no *switch magnet*. A resistência medida das bobinas foi de 8,9 Ω .

Figura 36 - Bobina utilizada no *switch magnet*

Aspecto final dos dipolos

A Figura 37 mostra o aspecto final com um modelo 3D do switch magnet. A Tabela 9 nos traz um resumo das características deste magneto.

Figura 37 - Aspecto 3D do *switch magnet*.

Raio de curvatura	110 mm
Campo Magnético (E=31MeV)	0,95 T
Gap	31 mm
Massa do ferro	1600 kg
Massa da bobina (cada)	50 kg
Massa total do eletroímã	1700 kg

Tabela 9 - Resumo das principais características do *switch magnet*.

Capítulo 7

Construção, montagem e caracterização do *switch magnet*

Introdução

Após a etapa de projeto, passamos para as etapas de construção, montagem e testes do *switch magnet*. Neste capítulo pretendemos abordar os aspectos da logística da construção, cuidados na montagem e por fim vamos apresentar os resultados dos testes de vácuo e do mapeamento magnético.

Construção

Como vimos no capítulo anterior, o *switch magnet* foi dividido em três partes: dois discos que contém a maior parte da estrutura do eletroímã e onde são alocadas as bobinas e um anel que é basicamente responsável pelo *gap*. Conseguimos obter o material bruto para a construção dos dois discos e do anel já com a forma circular, facilitando assim o processo de usinagem. No entanto, cada um dos discos tinha uma massa de aproximadamente 800 kg. Isto extrapola o limite de carga dos tornos do Instituto de Física. Foi necessário então procurar uma oficina mecânica fora da USP que pudesse suportar essa carga. Algumas tentativas no IPT e em algumas outras empresas que possuísem tornos verticais foram feitas mas a relação custo x benefício não era boa. Após algum tempo de pesquisas conseguimos achar a empresa Mecânica Europa Ltda. que possuía um torno horizontal com limite de carga de 1000 kg e diâmetro máximo de 2 m.

Precisávamos também desenvolver uma logística de transporte dos discos. Para isso foram feitas algumas pequenas alterações no desenho das peças, para que pudessem ser colocados olhais para a suspensão, utilizando a ponte rolante do laboratório.

No anel espaçador são soldados tubos com flanges nos furos por onde os elétrons irão passar e serão usados tanto para conectar o eletroímã ao resto da linha de transporte, como também para a conexão com o sistema de vácuo.

Montagem

Apresentamos agora a seqüência de montagem das partes do eletroímã. A Figura 38 mostra o disco inferior já colocado em seu suporte. Tomamos o cuidado de proteger a parte externa do disco, pintando-a, pois pelo material ser ferro com baixo teor de carbono, a oxidação se dá de maneira muito rápida. A parte interna do eletroímã protegemos inicialmente com um verniz. No entanto observamos que o calor proveniente da bobina deteriora o verniz, então a melhor opção é a proteção com óleo de silicone. A Figura 39 mostra a colocação da bobina no disco.

Figura 38 - Disco inferior do *switch magnet*

Figura 39 - Colocação da bobina

Um cuidado especial foi tomado com o anel espaçador no sentido de mante-lo o mais limpo possível, diminuindo com isso os vazamentos virtuais provenientes da sujeira [23]. Os tubos do anel espaçador foram polidos utilizando escovas especiais presas a uma furadeira, como pode ser visto na Figura 40. Também a superfície externa do anel foi limpa utilizando acetona como pode ser visto na Figura 41. O mesmo procedimento foi utilizado para as tampas de latão.

Figura 40 - Limpeza dos tubos do anel

Figura 41 - Limpeza do anel

Após a limpeza dos componentes, passamos à montagem da câmara de vácuo. A Figura 42 mostra a colocação da tampa de latão no disco inferior. A

Figura 43 mostra o detalhe do fio de vedação para o vácuo. Após isso, o anel espaçador foi cuidadosamente colocado, de maneira a não mover o fio de vedação. A Figura 44 mostra a colocação do anel espaçador detalhando o fio de vedação e do reforço de sustentação para a tampa superior.

Figura 42 - Colocação da tampa

Figura 43 - Detalhe do fio de vedação

Figura 44 - Colocação do anel espaçador com o detalhe do fio de vedação e do reforço de sustentação da tampa superior

Da mesma maneira, foi colocada a tampa superior e o disco superior, completando o conjunto. Prisioneiros foram colocados de tal maneira a esmagar os fios de vedação e manter as partes juntas. A Figura 45 mostra o eletroímã montado.

Figura 45 - *Switch magnet* montado

Testes da câmara de vácuo

Uma vez que o *switch magnet* foi montado, passamos então para a etapa do teste de vazamento da câmara de vácuo. Utilizamos para isso um *leak detector* Alcatel, modelo ASM 180 t conectado a um dos quatro acessos da câmara, tampando os outros três. Inicialmente percebemos que existiam alguns pontos de vazamento. Para sanar este problema apertamos um pouco mais os prisioneiros. Minimizado este problema, constatamos que o eletroímã apresenta um vazamento “inerente” de 10^{-9} mbar.l/s. Este valor garante uma estanqueidade adequada à operação do acelerador.

Caracterização magnética

A caracterização do eletroímã seletor envolveu apenas o mapeamento da componente Y do campo magnético e, diferentemente dos outros eletroímãs, este mapeamento foi feito ao longo de um diâmetro e não em um plano. A Figura 46 mostra o arranjo experimental utilizado. Para garantir um melhor alinhamento na medida, foi confeccionado um disco de *teflon* com um corte retangular onde era colocada a sonda. Esse disco serve como guia para a sonda, deslocando-se dentro de um tubo de cobre, que servia de guia, inserido de um lado a outro do dipolo, como pode ser visto nas Figuras 46 e 47. Este mapeamento é suficiente para verificarmos possíveis discrepâncias entre o projeto e a construção (com respeito a uniformidade do campo) e às hipóteses feitas sobre a extensão do campo de borda (internamente). A Figura 49 mostra o resultado da medida do campo magnético ao longo do diâmetro de entrada (chamado de plano A) e o diâmetro de saída (plano B) e a comparação com os dados provenientes da simulação no POISSON.

Figura 46 – Arranjo experimental.

Figura 47 - Detalhe do suporte de *teflon* da sonda *Hall*

Figura 48 - Detalhe do tubo guia de cobre

Figura 49 - Caracterização magnética do switch magnet. Os pontos representam os dados experimentais em dois planos distintos e a linha cheia representa a simulação do POISSON

Podemos perceber pela Figura 49 que o comportamento do dipolo é muito semelhante à simulação no POISSON. É possível perceber uma pequena discrepância na região fora da face polar (localizada entre os pontos -110 e 110 mm da figura). O fato de o campo nessa região ser menor que o previsto é um ponto positivo, pois esse campo é o equivalente ao campo de borda de um eletroímã convencional. Isto implica que o desvio no feixe seja quase que integralmente feito na região da face polar. A uniformidade do campo medida na região da face polar é melhor que 10^{-3} que é o limite de precisão do instrumento de medida de campo magnético utilizado.

Para a realização da caracterização magnética do eletroímã seletor, utilizamos um campo de aproximadamente 3 kG (lembrando que o campo de operação do eletroímã para o feixe de 31 MeV é aproximadamente 10 kG). Isso se deve ao fato de que as fontes disponíveis no laboratório forneciam no máximo 3 A. Mesmo utilizando uma fonte com corrente menor do que necessário, pudemos verificar que havia linearidade entre corrente e campo magnético, não caracterizando problemas com saturação do material.

A análise harmônica fornecida pelo POISSON nos mostra que, nesse caso em que a geometria da seção reta é H, a componente de quadrupolo é menor que a de sextupolo como era de se esperar. Os dados da análise multipolar estão na Tabela 10.

n	A_n	B_n
1	-1,43E+03	-1,04E-02
2	3,18E-01	4,90E-04
3	7,00E+00	-5,04E-03
4	-3,54E-01	1,52E-06

Tabela 10 - Saída da simulação do POISSON das componentes multipolares do eletroímã seletor

Testes sobre a dissipação de calor na bobina

Foi feito um levantamento da temperatura da bobina em função do tempo. Utilizando aproximadamente 25% da potência necessária para a operação do eletroímã (com o feixe de 31 MeV), constatamos que após 12 horas de funcionamento a temperatura na superfície da bobina era de 82 °C. A temperatura máxima que o verniz de isolamento dos fios das bobinas pode ser submetido é por volta de 120 °C. Era necessário, portanto, melhorar a dissipação de calor da bobina

Foi feito um dissipador utilizando uma abraçadeira de cobre refrigerada a água. Porém essa alternativa se mostrou ineficiente, uma vez que o calor do centro da bobina não migra para fora (em direção ao dissipador), por causa das lâminas de isolamento elétrico (que também são isolantes térmicas), colocadas entre as camadas das bobinas.

É possível operar este eletroímã com estas bobinas com o feixe de 5 MeV; no entanto não será possível a operação com o feixe de 31 MeV.

Capítulo 8

Estudo da trajetória de elétrons em um campo magnético

Introdução

Nos capítulos anteriores descrevemos os procedimentos para a obtenção das características magnéticas dos eletroímãs dipolares. Apresentamos também os resultados dos mapeamentos do campo magnético daqueles eletroímãs.

Neste capítulo apresentamos um método para simular a passagem de partículas carregadas (elétrons nesse caso) em um campo magnético obtido experimentalmente. Com ele é possível verificar se o feixe não colide com as paredes do tubo, e também a validade das correções dos parâmetros dos eletroímãs devido ao campo de borda.

Software para a simulação de trajetória de partículas em campo magnético

Como vimos uma partícula descreve uma curva cujo raio de curvatura é dado basicamente por:

$$r = K \frac{1}{B}$$

onde r é o raio de curvatura, B é o campo magnético e K é um fator que depende do tipo de partícula e da energia.

Podemos perceber que o raio de curvatura é inversamente proporcional ao campo magnético. Como campo magnético proveniente de um eletroímã não é constante ao longo do seu comprimento, foi necessário o

desenvolvimento de uma ferramenta mais elaborada para determinarmos a trajetória dessas partículas.

Para isso, escrevemos um software com o propósito de determinar a posição da partícula ao longo da trajetória usando para isso os dados obtidos através do mapeamento.

Ao finalizarmos as medidas dos mapeamentos dos eletroímãs D4 e D5 possuíamos uma matriz cujos elementos representavam o valor da componente Y do campo magnético. A distância entre cada uma das linhas ou colunas era de 4,41 mm (ou seja o passo de mapeamento era 4,41 mm). Apesar desse valor ser pequeno, comparado com as dimensões do dipolo, necessitávamos de uma malha mais fina, para que o cálculo fosse mais apurado.

Inicialmente utilizamos o *software* de análise matemática MATLAB [24] para a interpolação linear dos dados, utilizando uma malha dez vezes mais fina que a do mapeamento. Essa malha foi escolhida após terem sido feitas simulações com malhas 5x, 10x e 20x mais finas. Entre as malhas 5x e 10x houve uma diferença de 1% no resultado. Já entre 10x e 20x houve uma diferença de 0,01% no resultado, mostrando que uma malha 10x é suficiente para nos fornecer um resultado bastante bom com uma velocidade de cálculo razoavelmente mais rápida que a 20x. As Figuras 49a e b mostram as diferenças entre a malha original e a malha interpolada, respectivamente.

A seguir, desenvolvemos o programa (TRACE), escrito em linguagem M (MATLAB), que consiste em calcular o raio de curvatura de um elétron em espaços pequenos (da ordem de 0,4 mm que é o tamanho da malha), de maneira que o raio de curvatura em cada trecho possa ser considerado constante. Com isso é possível determinar a trajetória da partícula ao longo do dipolo, somando-se as contribuições de cada trecho. A listagem completa do programa encontra-se no anexo - D.

Ao iniciarmos o TRACE, são feitas quatro perguntas:

1. Qual o campo máximo (em G)?

A matriz de dados de mapeamento apresenta-se normalizada. Portanto, é necessário saber qual o valor do campo utilizado no dipolo e eventualmente fazemos correções nesse valor.

2. Qual a energia da partícula (em MeV)?

Energia do elétron que passará pelo eletroímã

3. Qual o ângulo do feixe (em graus)?

Este é o valor esperado para a deflexão do feixe. O programa utiliza este dado para correções dos parâmetros do feixe da simulação. Também podemos atuar nesse valor para corrigir possíveis erros de alinhamento do dipolo durante o mapeamento.

4. Qual o *off set* do tubo (em mm)?

Este valor representa o afastamento do dipolo em relação ao tubo. É utilizado para corrigir a trajetória do feixe, obrigando-a passar no centro da face polar do eletroímã.

(a)

(b)

Figura 50 - Mapeamento do campo magnético dos dipolos D4 e D5 sem interpolação (a) e com interpolação com uma malha 10x mais fina (b)

Teste do programa TRACE utilizando os dados dos dipolos D4 e D5

A Figura 51 mostra o resultado do programa TRACE após execução com os seguintes parâmetros de entrada:

Campo máximo: 754 G
Energia da partícula: 5,0 MeV
Angulo do feixe: 30°
Off set: 0 mm

Figura 51 - Exemplo de saída do programa. As linhas vermelhas da trajetória representam trechos retilíneos.

Podemos observar que, com os parâmetros inicialmente adotados, a trajetória do feixe não passa pela região de campo uniforme. Devemos então atuar no parâmetro de *off set*. A Figura 52 mostra o resultado após alterarmos o parâmetro de *off set* para 30 mm.

O programa TRACE nos fornece ainda o valor do ângulo de desvio total. Podemos observar que o fato de alterarmos a posição do feixe em relação ao eletroímã, altera sensivelmente o ângulo de desvio total.

Por fim, podemos atuar também no valor de campo máximo, de tal forma que o ângulo de desvio total seja o mais próximo possível do determinado (no caso do D4, 30°). A Figura 53 mostra o resultado do programa TRACE para o dipolo D4 após alterarmos o valor de campo para 752 G.

Figura 52 - Saída do programa TRACE após atuação no *off set*.

Figura 53 - Resultado da simulação da trajetória do feixe de elétrons na presença do campo magnético do dipolo D4

Repetimos o procedimento para os dados do dipolo D5, utilizando como parâmetros finais os seguintes valores:

Campo máximo: 1141,9 G
 Energia da partícula: 5,0 MeV
 Angulo do feixe: 45°
 Off set: 70 mm

A Figura 54 mostra o resultado da simulação com esse parâmetros.

Figura 54 – Resultado da simulação da trajetória do feixe de elétrons na presença do campo magnético do dipolo D5

A Tabela 11 resume os principais resultados das simulações com o programa TRACE, comparando com os valores. Podemos perceber que os resultados concordam, com boa aproximação, com os previstos anteriormente.

Dipolo	Campo previsto (G)	Campo simulado (G)	$\Delta\%$	Desvio total simulado (°)
D4	754	752	0,3	30
D5	1131	1141,9	1,0	45

Tabela 11 - Comparação entre os resultados simulados pelo programa TRACE e os calculados.

Comentários adicionais sobre o programa TRACE

O programa TRACE foi desenvolvido para resolver os problemas específicos dos ímãs do Laboratório, portanto não tem a intenção de ser um programa de domínio público. Prova disso é que os cálculos são baseados em matrizes específicas que são obtidas através do mapeamento magnético feito no laboratório. Isso não impede que um usuário utilize o programa gerando artificialmente uma matriz.

Não foi feita a simulação com os dados do *Switch Magnet* pelo fato desse eletroímã ter sido mapeado em uma linha, e não em uma área como é necessário. Mesmo que gerássemos uma matriz artificial baseada nos dados experimentais, esse programa, da maneira como foi escrito, só realiza a simulação de maneira correta para eletroímãs com ângulos agudos.

É possível rescrever o programa para realizar simulações com qualquer ângulo de curvatura, mas isso será feito à medida que eletroímãs mais complexos sejam construídos, como é o caso, por exemplo, dos eletroímãs de 180° do Microtron Principal.

Conclusão

O trabalho teve como objetivo o projeto, a construção e a caracterização dos eletroímãs dipolares da linha de transporte do feixe do Microtron do IFUSP.

Inicialmente foi feito um estudo da influência do campo de borda na curvatura de um feixe. Com isso foi possível estimar os parâmetros de construção de um eletroímã com boa precisão.

As simulações dos perfis foram úteis para determinar as dimensões dos eletroímãs, respeitando os limites de saturação do ferro. Também a determinação das seções retas das bobinas e a estimativa das componentes multipolares foram feitas, ainda que esses valores não sejam tão relevantes para a construção dos eletroímãs em questão, pois as contribuições dessas componentes são muito pequenas e facilmente compensadas com o uso de lentes quadrupolares.

Foram escritos dois programas para auxiliar na caracterização dos eletroímãs. Um para a automação das medidas (controle da mesa) e outro para a simulação da trajetória de partículas em campos magnéticos.

A automação da mesa facilitou em muito a caracterização de eletroímãs, por permitir maior liberdade de operação pelo simples fato de não ser necessário recorrer-se a uma lista de comandos ou manual.

Foram projetados todos os dipolos da linha de transporte. Desses foram construídos os dipolos de 30 e 45° e o eletroímã seletor. Recomenda-se especial atenção ao projeto mecânico dos dipolos de 90° pois 2 destes devem ser posicionados para deflexão no eixo Y e, além disso, o local onde esses dipolos serão colocados está relativamente distante do piso (o D6 está a 2,5 m).

Após a caracterização magnética, comprovamos que os dipolos tiveram um comportamento bem próximo do esperado com base nas hipóteses da extensão do campo de borda e de uniformidade de campo.

A geometria adotada para o *Switch Magnet* mostrou-se uma solução mecanicamente simples (envolvia poucas etapas de usinagem) e viável, uma vez que conseguimos construir um dipolo com dimensões e custos reduzidos. Para operação com energias mais altas (31 MeV) as bobinas projetadas para este dipolo se mostraram ineficientes do ponto de vista de dissipação térmica. É possível operar este eletroímã com estas bobinas com o feixe de 5 MeV. Acima disso, devemos substituir essas bobinas por outras (existem atualmente dois estudos para alternativas de bobinas: uma envolvendo fios chatos e bobinas em camadas e uma outra envolvendo fios refrigerados).

Este trabalho teve como objetivo ser um manual introdutório para o projeto de eletroímãs usados em aceleradores, para isso foram desenvolvidas uma série de ferramentas (tanto para o projeto como para a caracterização) as quais poderão auxiliar no aprimoramento de outros trabalhos como, por exemplo, a construção das lentes quadrupolares ou das bobinas de correção do feixe (steerings).

Referências

- [1] *The IFUSP racetrack microtron*, J. Takahashi, Y. Miyao, M.N. Martins, J.M. Machado, A.A. Malafronte, J.C.A. Alcon, J. Marini Jr., A. Bonini, em *Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference*, editado por H. Henke e P.J. Genaz, Editions Frontières, França, 1992, Vol. 1, páginas 429 a 431.
- [2] *Plunger frequency control of the side-coupled accelerating structure for the IFUSP Microtron*, em *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference*, <http://www.triumf.ca/pac97/papers/pdf/4P038.PDF>.
- [3] *The design of the IFUSP main racetrack microtron accelerator end magnets*, L.R.P. Kassab, J. Takahashi, M.N. Martins and P. Gouffon, em *Proceedings of the 1998 European Particle Accelerator Conference*, <http://www.cern.ch/accelconf/e98/papers/TUP45G.PDF>.
- [4] *Vacuum system for the accelerating structure of the IFUSP Microtron*, J. Takahashi, M.N. Martins, L. Portante, R. da R. Lima and F.T. Degasperi, em *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference*, em impressão.
- [5] *The Gun Control System of the IFUSP Microtron*, A.A. Malafronte, J. Takahashi, A.L. Bonini and M.N. Martins, *Nucl. Instrum. and Methods A390*, 423-425(1997).
- [6] *Magnetic Field Correction of the IFUSP RTM Booster-End Magnets*, L.R.P. Kassab, P. Gouffon and M.N. Martins. *Nucl. Instrum. and Methods A404*, 181-184(1998).
- [7] *The end magnets of the IFUSP race-track microtron booster*, L.R.P. Kassab, P. Gouffon, M.N. Martins and J. Takahashi, *Part. Accel.* 59, 75-92(1998).
- [8] *Design of the main racetrack microtron accelerator end magnets of the IFUSP*, L.R.P. Kassab, M.N. Martins, J. Takahashi, and P. Gouffon, *Phys. Rev. Special Topics - Accelerators and Beams* 2, 032401(1999).
- [9] M.N. Martins, *et al.*, "Tagged bremsstrahlung polarization: a Monte Carlo approach", *Nucl. Instrum. and Methods A390*(1997)375-382; e R. Guarino, "Adaptação e calibração do monocromador de fótons do LAL", Dissertação de Mestrado, IFUSP, 1998.
- [10] V.B. Gavrikov, *et al.*, "Features of spectral-angular distribution of coherent X-radiation", *Braz. J. Phys.* 29(1999)516-523.

- [11] D.C. Carey, K.L. Brown, and F. Rothacker, SLAC-R-95-462, 1995.
- [12] J.J. Livingood, The optics of dipole Magnets, Academic Press, 1969
- [13] N. Marks, Conventional Magnets – I, General Accelerator Physics Course, Jyväskylä, Finland, 1992 - Ed. by Turner, Stuart - CERN, Geneva, 1994
- [14] J. T. Taromaru, Projeto e construção da linha de transporte do injetor ao booster do microtron, Monografia de fim de curso apresentada à Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2000
- [15] H. Wiedemann, Particle accelerator physics :basic principles and linear beam dynamics, Springer, 1993
- [16] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [17] N. Ida and J. Bastos, Electromagnetics and Calculation of Fields, Springer-Verlag, 1997
- [18] L. M. Young and J.H. Billen, LANL POISSON/Superfish codes for the PC, 1996.
- [19] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, 2001
- [20] J. Tanabe, Comunicação Pessoal
- [21] J. Tanabe, Accelerator Magnets Engineering, US Particle Accelerator School, Texas, 2001
- [22] M. J. Berger and S. M. Seltzer, NBS Internal Report 82-2550-A, 1982
- [23] M. H. Hablanian, High-vacuum technology: a practical guide, Marcel Dekker Inc., 1997
- [24] D. Hanselman, B. Littlefield, MATLAB, The Student Edition, The MatWorks, Inc., 1997

Anexos

Anexo A

Listagem do novo programa de controle da mesa XY


```
// *****
// *
// *      Programa Controlador da Mesa X-Y      *
// *      Autor: Mauricio Lopes                  *
// *      Versao 2.0 - out/00 - LAL              *
// *      Compilador: Borland c 4.5              *
// *
// *****
```

```
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <graphics.h>
#include <time.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <dos.h>
```

```
void desenhabela (void);          /* Prototipo da funcao
de desenho de tela */
void posicao(int x, int y);        /* Prototipo da funcao
de mostra de posicao do carro */
void ponto (int x, int y, int t); /* Prototipo da funcao
de pontos */
void defarmap(void);              /* Prototipo da funcao
de def da area de mapeamento */
int XTELA (int x);                /* Prototipo da funcao
de determinacao de coordena da tela (X) */
int YTELA (int y);                /* Prototipo da funcao
de determinacao de coordena da tela (Y) */
void map (int passo, int o);      /* Prototipo da funcao
de mapeamento */
int minvec ( int V[]);            /* Prototipo da funcao
de procura de valor max de um vetor */
int maxvec (int V[]);             /* Prototipo da funcao
de procura de valor min de um vetor */
void mostraarmap (void);          /* Prototipo da funcao
de mostra de ponto pre-existentes */
void salvaar(void);               /* Prototipo da funcao
de salvar area de mapeamento em arquivo */
void InicializaADC(void);          /* Prototipo da funcao
de Inicializacao do ADC */
int Leadc2(int ncanal);           /* Prototipo da funcao de
Leitura do ADC */
void movercarrox (int x, int y); /* Prototipo da funcao de
movimentacao do carro em x */
```



```

clrscr();
textcolor(15);
cprintf("
*****\r\n");
cprintf("
*\r\n");
cprintf("          *          Programa Controlador da
Mesa X-Y      *\r\n");
cprintf("          *          Versao 2.0
*\r\n");
cprintf("
*\r\n");
cprintf("
*****\r\n\r\n\r\n\r\n\r\n\r\n");
printf("\t");
do{
gotoxy(12,12);
cprintf("Nome do arquivo de saida: ");
scanf ("%s",nomearq);
strcpy(AMC,nomearq);
strcat (AMC,".amc");
if ((fopen ( AMC , "r" ))==NULL) {
fc=fopen (AMC,"w");
ch=0;
}
else{
sound(1000);
delay(100);
nosound();
gotoxy(12,13);
textcolor(12);
printf("\t");
cprintf("O Arquivo %s ja existe!",AMC);
printf("\n\t\t");
cprintf("Deseja continuar com este assim mesmo?
");
do{
ch=getch();
}while ((ch!=27) && (ch!=115) && (ch!=83) &&
(ch!=110) && (ch!=78));
if (ch==27) {
textcolor(15);
exit(EXIT_SUCCESS);
}
gotoxy(12,13);
printf("
\n");
printf("
\n");
textcolor(15);

```

```

        if ((ch==115) || (ch==83)) fc = fopen( AMC,"w");
    }
}while ((ch==110) || (ch==78));

    novopre:
    ;

    textcolor(15);
    gotoxy(12,15);
    cprintf("Deseja utilizar um arquivo de area de
mapeamento");
    gotoxy(12,16);
    cprintf("[n]ovo ou um [p]re-existente? ");

    do{
        decisao=getch();
    }while ((decisao!=27)    &&    (decisao!=112)    &&
(decisao!=80) && (decisao!=110) && (decisao!=78));
    if (decisao==27) {
        closegraph();
        restorecrtmode();
        exit(EXIT_SUCCESS);
    }
    gotoxy(12,18);
    cprintf("Nome do arquivo: ");
    scanf ("%s",nomearq);
    strcpy(AAM,nomearq);
    strcat (AAM,".aam");

    if ((decisao==112)    ||    (decisao==80))    {
//pre-existente
        if ((fopen ( AAM , "r" ))==NULL) {
            textcolor(12);
            sound(1000);
            delay(100);
            nosound();
            gotoxy(12,19);
            cprintf("O Arquivo %s nao existe!",AAM);
            getch();
            gotoxy(12,19);
            printf("
");
            gotoxy(12,18);
            printf("
");

            textcolor(15);
            goto novopre;
        }
    }

```



```

        if ((decisao==110) || (decisao==78)) { //NOVO
            if ((fopen ( AAM , "r" ))!=NULL) {
                sound(1000);
                delay(100);
                nosound();
                textcolor(12);
                gotoxy(12,19);
                cprintf("O Arquivo %s ja existe!",AAM);
                gotoxy(12,20);
                cprintf("Deseja continuar com este assim
mesmo? ");
                do{
                    ch=getch();
                }while ((ch!=115) && (ch!=83) && (ch!=110)
&& (ch!=78));
                gotoxy(12,19);
                printf("
");
                gotoxy(12,20);
                printf("
");
                gotoxy(12,18);
                printf("
");
                textcolor(15);
                if ((ch==110) || (ch==78)) goto novopre;
            }
        }

        if ((decisao==110) || (decisao==78)) { //NOVO
            fa=fopen (AAM,"w");
            do{
                desenhabela();
                defarmap();
                if (ch==27) break;
                ch=getch();
            }while ((ch==78) || (ch==110));
            salvaar();
            fclose(fa);
        }
        else { //PRE-EXISTENTE
            fa=fopen (AAM,"r");
            for (i=0;i<=50;i++){
                fscanf (fa,"\\t%d\\t%d",&XD[i],&YD[i]);
                if (feof(fa)) {
                    i=i-1;
                    break;
                }
            }

            mostraarmap();

```

```

        setcolor(10);
        outtextxy(2,315,"Esta correto <S/N>?          ");
        do{
            ch=getch();
        } while ((ch!=27) && (ch!=115) && (ch!=83) &&
(ch!=110) && (ch!=78) );
        if (ch==27) {
            restorecrtmode();
            exit(EXIT_SUCCESS);
        }
        if ((ch==110) || (ch==78)) {
            restorecrtmode();
            goto novopre;
        }
    }

```

```

restorecrtmode();
textcolor(15);
gotoxy(12,10);
cprintf("Qual a orientacao da ponta de prova <X/Y> ? ");

```

```

do{
    ch=getch();
}while ((ch!=27) && (ch!=120) && (ch!=88) && (ch!=121)
&& (ch!=89) );

```

```

    if (ch==27) {
        restorecrtmode();
        exit(EXIT_SUCCESS);
    }
    if ((ch==120) || (ch==88)) {
        orient=1;
        printf("\n\t\tOrientacao X");
    }
    else{
        orient=0;
        printf("\n\t\tOrientacao Y");
    }
}

```

```

gotoxy(12,13);
cprintf("Qual o tamanho do passo (em mm)? ");
scanf("%f",&pasaux);
passo=pasaux/(0.63);
gotoxy(12,14);
if (passo<=0) passo=1;
printf("Tamanho do passo utilizado: %4.2f mm.
", (0.63)*passo);

```

```

gotoxy(12,16);

```

```

cprintf("Qual o fundo de escala do gaussimetro? ");
scanf("%f",&FundoEscala);

gotoxy(12,18);
cprintf("Quantos mapeamentos? ");
scanf("%d",&nmap);
textcolor(12);
gotoxy(9,21);
cprintf("<< DESLIGUE O CONTROLE DOS MOTORES DE PASSO E
POSICIONE >>");
gotoxy(19,22);
cprintf("<< MANUALMENTE OS CARROS NA ORIGEM >>");
gotoxy(14,23);
cprintf("<< LIGUE O CONTROLE DOS MOTORES DE PASSO E
>>");
gotoxy(13,24);
cprintf("<< PRESSIONE UMA TECLA PARA INICAR MAPEAMENTO
>>");
getch();
InicializaADC();
lt=time(NULL);

fprintf(fc,ctime(&lt));
fprintf(fc,"\n\n Arquivo de area de mapeamento utilizado:
%s",AAM);
if (orient==0) fprintf(fc,"\n Orientacao da ponta de
prova no eixo Y");
if (orient==1) fprintf(fc,"\n Orientacao da ponta de
prova no eixo X");
fprintf(fc,"\n\n Tamanho do passo utilizado: %4.2f
mm",passo*(0.63));
fprintf(fc,"\n\n Numero total de mapeamentos:
%d\n\n\n",nmap);

XATUAL=0;
YATUAL=0;

for(j=0;j<nmap;j++){
    mostraarmap();
    fprintf( fc, "\n\tMapeamento # %d\n\n",j+1);
    fprintf( fc, "\t X(mm)\t Y(mm)\tCampo(G)\n");
    setcolor(15);
    outtextxy(5,311,"Mapeamento # ");
    gotoxy(15,23);
    printf("%d",j+1);
    map (passo,orient);
    fprintf( fc, "\n **** Fim do mapeamento # %d ****
\n\n\n\n",j+1);
}
fprintf( fc, "\n **** Fim de arquivo ****\n\n");
lt=time(NULL);

```

```

    fprintf(fc,ctime(&lt));
    clrscr();
    restorecrtmode();
    textcolor(2);
    gotoxy(27,12);
    cprintf("<< FIM DO MAPEAMENTO >>");
    gotoxy(20,13);
    cprintf("<< PRESSIONE UMA TECLA PARA SAIR >>");
    getch();
}

```

```

/*****                                                    FIM
*****/

```

```

/*****
*****/
/*                                FUNCAO:                mostraarmap()
*/
/* DESCRICAO: Mostra a area de mapeamento a aprtir de uma
lista de */
/*                                pontos                    pre-existentes.
*/
/*****
*****/

```

```

void mostraarmap (void){
int j, k;
    if (ch!=27){
        xant=0;
        yant=0;
        xant=XTELA(xant);
        yant=YTELA(yant);
        desenhabela();
        k=i;
        i=0;
        for(j=0;j<k;j++){
            ponto (XD[j],YD[j],1);
            i++;
        }
        ponto (XD[k],YD[k],1);
        i=i-1;
        ponto (XD[k],YD[k],2);
        i=i+1;
    }
}

```

```

    }
}

```

```

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          map          (passo,orientacao)
*/
/* DESCRICAO: Faz o mapeamento do campo a partir de uma
area pre- */
/* definida. Faz a distincao entre uma orientacao X ou Y.
*/
/*****
*****/

```

```

void map (int passo, int o){
    int npx, npy, j, jmin, jmax, k, kmin, kmax, cdj, cdk;
    float xm, ym, l, cp, carac, valor;
    float aux, campo;
    delay(1000);
    if (o==0) {                                //orientacao y
        jmax=maxvec(XD);
        jmin=minvec(XD);
        kmax=maxvec(YD);
        kmin=minvec(YD);
        cdj=3;
        cdk=6;
    }
    if (o==1) {                                //orientacao x
        jmax=maxvec(YD);
        jmin=minvec(YD);
        kmax=maxvec(XD);
        kmin=minvec(XD);
        cdj=6;
        cdk=3;
    }

    for(j=jmin; j<=(jmax*cdj); j=j+(passo)){
        for (k=kmin; k<=(kmax*cdk); k=k+(passo)){
            if (o==0) {
                xm=XTELA (j/3);
                ym=YTELA (k/6);
            }
            if (o==1) {
                xm=XTELA (k/3);
                ym=YTELA (j/6);
            }
            cp=getpixel(xm,ym);
            if (cp!=3){
                carac=kbhit();
            }
        }
    }
}

```

```

        if (carac!=0){
            ch=getch();
            if (ch==27){
                restorecrtmode();
                exit(EXIT_SUCCESS);
            }
        }
        if (o==0) {
            movecarroy (j,k);
            posicao (j,k);
        }
        if (o==1) {
            movecarrox (k,j);
            posicao(k,j);
        }
        campo=0;
        for (l=0;l<100;l++){
            valor=Leadc2(3);
            aux = valor;
            aux          =          aux*10/4095.0;
// (x10) transforma valor em tensao
            aux          =          aux          -          5.0;
// acerta a tensao p/a modo bipolar
            campo          =
campo+(aux*(10*FundoEscala)/5.0); // O x10 e em virtude da
ponta de prova
        }
        campo = campo/100; // media

        setcolor(15);
        outtextxy(220,311,"Campo: ");
        gotoxy(35,23);
        printf("%4.1f",campo);

        if (o==0) {
            fprintf(fc, "\t\t\t %4.2f\t\t\t\n", j*0.63, k*0.63, campo);
        }
        if (o==1) {
            fprintf(fc, "\t\t\t %4.2f\t\t\t\n", k*0.63, j*0.63, campo);
        }
        putpixel(xm,ym,2);
    }
}

```

```

/*****
*****/
/*
                                FUNCAO:                defarmap()
*/
/* DESCRICAO: Define area de mapeamento utilizando o
teclado para */
/*
                                movimentar                o                carro.
*/
/*****
*****/

void defarmap(void){
    int  x, y, j,k;
    x=0;
    y=0;
    xant=XTELA(x);
    yant=YTELA(y);
    i=0;
    vac=3;
    setcolor(15);
    outtextxy(2,295,"[Setas]                movimento rapido do
carro");
    outtextxy(2,305,"[Alt]+[Setas]          movimento lento do
carro");
    outtextxy(2,315,"[espace]                marca ponto");
    outtextxy(2,325,"[F]                    marca ponto final");
    ponto (x,y,0);
    do{
        posicao (x*3,y*6);
        ch=getch();

        if (ch==32){

            if (i!=0){
                if ( (x!=XD[(i-1)]) || (y!=YD[(i-1)]) ){
                    XD[i]=x;
                    YD[i]=y;
                    ponto (x,y,1);
                    i=i+1;
                }
            }
            else{
                XD[i]=x;
                YD[i]=y;
                ponto (x,y,1);
                i=1;
            }
        }

        if ( (ch==102) || (ch==70) ){

```

```

        if (i>1){
            XD[i]=x;
            YD[i]=y;
            ponto (x,y,1);
            ponto (x,y,2);
        }
        else{
            sound(1000);
            delay(300);
            nosound();
            ch=0;
        }
    }

    // setas

    if (ch==72) {
        if (y<252){
            y=y+2;
            for (k=0;k<12;k++){
                outportb(0x378,15);
                outportb(0x378,7);
                delay(25);
                outportb(0x378,15);
            }
        }
        if (y>252) y=252;
        ponto (x,y,0);
    }
    if (ch==80) {
        if (y>0){
            y=y-2;
            for (k=0;k<12;k++){
                outportb(0x378,11);
                outportb(0x378,3);
                delay(25);
                outportb(0x378,11);
            }
        }
        if (y<0) y=0;
        ponto (x,y,0);
    }
    if (ch==77) {
        if (x<817) {
            x=x+4;
            for (k=0;k<12;k++){
                outportb(0x378,14);
                outportb(0x378,12);
                delay(25);
            }
        }
    }

```



```

        outportb(0x378,14);
    }
}
if (x>817) x=817;
ponto (x,y,0);
}
if (ch==75) {
    if (x>0){
        x=x-4;
        for(k=0;k<12;k++){
            outportb(0x378,15);
            outportb(0x378,13);
            delay(25);
            outportb(0x378,15);
        }
    }
    if (x<0) x=0;
    ponto (x,y,0);
}

// ALT+setas

if (ch==152) {
    if (y<252){
        y=y+1;
        for (k=0;k<6;k++){
            outportb(0x378,15);
            outportb(0x378,7);
            delay(25);
            outportb(0x378,15);
        }
    }
    ponto (x,y,0);
}
if (ch==160) {
    if (y>0){
        y=y-1;
        for (k=0;k<6;k++){
            outportb(0x378,11);
            outportb(0x378,3);
            delay(25);
            outportb(0x378,11);
        }
    }
    ponto (x,y,0);
}
if (ch==157) {
    if (x<817){
        x=x+1;

```

```

        for (k=0;k<3;k++){
            outportb(0x378,14);
            outportb(0x378,12);
            delay(25);
            outportb(0x378,14);
        }
    }
    ponto (x,y,0);
}
if (ch==155) {
    if (x>0){
        x=x-1;
        for (k=0;k<3;k++){
            outportb(0x378,15);
            outportb(0x378,13);
            delay(25);
            outportb(0x378,15);
        }
    }
    ponto (x,y,0);
}

XATUAL=x;
YATUAL=y;
}while ((ch!=70) && (ch!=102) && (ch!=27));
if (ch!=27) {
    setcolor(1);
    outtextxy(2,295,"[Setas]          movimento rapido do
carro");
    outtextxy(2,305,"[Alt]+[Setas]    movimento lento do
carro");
    outtextxy(2,315,"[espace]         marca ponto");
    outtextxy(2,325,"[F]              marca ponto final");
    setcolor(10);
    outtextxy(4,315,"Esta correto <S/N>?          ");
}
else{
    closegraph();
    restorecrtmode();
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
}
}

```

```

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          desenhatala()
*/

```

```

/* DESCRICAO: Rotina da parte grafica. Define area de
mapeamento, */
/* e da janela do menu. Escreve tb. que [ESC] aborta o
programa. */
/*****
*****/

```

```

void desenhatala (void)
{
    gdriver=VGA;
    gmode=VGAMED;
    initgraph(&gdriver,&gmode,"c:\\borlandc\\bgi");
    setbkcolor(BLUE);
    setpalette(3,BLACK);
    setcolor(14);
    moveto(0,290);
    lineto(640,290);
    moveto(14,227);
    outtext("Y");
    moveto(73,272);
    outtext("X");
    moveto (18,237);
    lineto(18,275);
    lineto(68,275);
    setfillstyle(SOLID_FILL,3);
    floodfill(1,1,14);
    setcolor(2);
    outtextxy(255,35,"Area de mapeamento");
    moveto(0,290);
    setcolor(15);
    lineto(640,290);
    setcolor(12);
    moveto(225,340);
    outtext("[ESC] Aborta o programa");
}

```

```

/*****
*****/
/*
FUNCAO: posicao(x,y)
*/
/* DESCRICAO: Escreve na tela a posicao do carro
*/
/*
*/
/*****
*****/

```

```

void posicao (int x, int y){

```

```

float xa,ya;
    char xout[5],yout[5];
    setcolor(7);
    xa=x*.63;
    ya=y*.63;
    outtextxy(415,311,"X=          mm    Y=          mm");
    gotoxy(55,23);
    printf(" %4.1f ",xa);
    gotoxy(71,23);
    printf("%4.1f ",ya);

}

```

```

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          ponto          (x,y,          tipo)
*/
/* DESCRICAO: Desenha um ponto na tela. Liga os ponto e
pinta a          */
/*          area          de          mapeamento.
*/
/*****
*****/

```

```

void ponto (int x, int y, int t)
{
    int xa, ya, j, k, cor;

    x= XTELA(x);
    y= YTELA(y);

    if (t==0){                                // Ponto livre
        putpixel(xant,yant,vac);
        vac=getpixel(x,y);
        putpixel(x,y,15);
        xant=x;
        yant=y;
    }

    if (t==1){                                // Ponto fixo
        xa=XTELA(XD[(i-1)]);
        ya=YTELA(YD[(i-1)]);
        putpixel(x,y,12);
        if (i!=0){
            moveto (xa,ya);
            setcolor(12);
            lineto(x,y);
        }
    }
}

```

```

        xant=0;
        yant=0;
    }

    if (t==2){ // Ponto final
        xa=XTELA(XD[0]);
        ya=YTELA(YD[0]);
        setcolor(12);
        moveto (xa,ya);
        lineto(x,y);
        xa=XTELA(((XD[0]+XD[1]+XD[i])/3)+1);
        ya=YTELA(((YD[0]+YD[1]+YD[i])/3)+1);
        setfillstyle(SOLID_FILL,1);
        floodfill(xa, ya, 12);
        xant=0;
        yant=0;
    }
}

/*****
*****/
/*
FUNCAO: Variavel=XTELA(X)
*/
/* DESCRICAO: Converte a posicao X para uma corresponde da
tela em */
/* uma resolucao de 640x350.
*/
/*****
*****/

int XTELA (int x){
    x=(x/2)+120;
    return(x);
}

/*****
*****/
/*
FUNCAO: Variavel=YTELA(Y)
*/
/* DESCRICAO: Converte a posicao Y para uma corresponde da
tela em */
/* uma resolucao de 640x350.
*/
/*****
*****/

int YTELA (int y){

```

```

y=230-(y/2);
return(y);
}

```

```

/*****
***** /
/*          FUNCAO:          Variavel=maxvec(Vetor[])
*/
/* DESCRICAO: Retorna o valor maximo de um vetor de dados.
*/
/*
*/
/*****
***** /

```

```

int maxvec (int V[]){
    int j, max;
    max=0;
    j=0;
    do{
        if (V[j]>max) max=V[j];
        j=j+1;
    }while (j<(i+1));

    return (max);
}

```

```

/*****
***** /
/*          FUNCAO:          Variavel=minvec(Vetor[])
*/
/* DESCRICAO: Retorna o valor minimo de um vetor de dados.
*/
/*
*/
/*****
***** /

```

```

int minvec (int V[]){
    int j, min;
    min=0;
    j=0;
    do{
        if (V[j]<min) min=V[j];
        j=j+1;
    }

```

```

        }while (j<(i+1));

    return (min);
}

```

```

/*****
*****/
/*
FUNCAO:                                salvar()
*/
/* DESCRICAO: Salva a area de mapeamento em um arquivo.
*/
/*
*/
/*****
*****/

```

```

void salvar (void){
    int j;
    for (j=0;j<=i;j++){
        fprintf( fa, "\t%d\t%d\n",XD[j],YD[j]);
    }
}

```

```

/*****
*****/
/*
FUNCAO:                                InicializaADC()
*/
/* DESCRICAO: Inicializa a placa ADC
*/
/*
*/
/*****
*****/

```

```

void InicializaADC(void)
{
    endbase2 = 0x220;
    outportb(endbase2+11,1);
    outportb(endbase2+9,0);           //Gain Control = ganho 1
}

```

```

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          valor=Leadc2(3)
*/
/*  DESCRICAO:  Le o ADC no canal 3.OBS: Deve ser
necessariamente */
/*  colocado no canal 3 por causa do cabo
*/
/*****
*****/

```

```

int Leadc2(int ncanal)
{
    unsigned int Status;
    unsigned int low,high;

    outportb(endbase2+10,ncanal);    // Mux Control -
    seleciono o canal                                // 0

    ganho ja foi setado na inicializacao
    outportb(endbase2+12,1);        // Software Trigger,
    inicia a aquisicao

    do{
        Status = inportb(endbase2+5); // high byte + data
        ready
        Status = Status & 0x10;        // separo o data
        ready bit
    }while(Status != 0);                //vide pag 26 do
    manual Advantech

    high = inp(endbase2+5);
    low = inp(endbase2+4);              //Qdo e lido o low byte, o
    data ready bit muda p/a 1

    return((high*0x100)+low);           //retorna os 12
    bits lidos
}

```

```

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          movecarrox          (x,y)
*/
/*  DESCRICAO:  Movimenta os carros durante o mapeamento. X
primeiro */
/*
*/

```



```

/*****
*****/

void movercarrox (int x, int y){
    int j, Xpas, Ypas, bitu, bitd;

    // motor 1 (x)

    Xpas=XATUAL-x;
    if (Xpas<0) {
        Xpas=Xpas*(-1);
        bitu=14;
        bitd=12;
    }
    else{
        bitu=15;
        bitd=13;
    }
    if (Xpas!=0){
        outportb(0x378,bitu);
//inicial
        for (j=0;j<Xpas;j++){
            outportb(0x378,bitu);
            delay(25);
            outportb(0x378,bitd);
        }
        //pulsos

    }

    // motor 2 (y)

    Ypas=YATUAL-y;
    if (Ypas<0) {
        Ypas=Ypas*(-1);
        bitu=15;
        bitd=7;
    }
    else{
        bitu=11;
        bitd=3;
    }
    if (Ypas!=0){
        outportb(0x378,bitu);
        for (j=0;j<Ypas;j++){
            outportb(0x378,bitd);
            delay(25);
            outportb(0x378,bitu);
        }
        //inicial
        //pulsos
    }
    delay(1000);
}
delay(500); // espera 500 ms para estabilizar ponta Hall
XATUAL=x;

```

```

    YATUAL=y;
}

/*****
*****/
/*          FUNCAO:          movecarroy          (x,y)
*/
/* DESCRICAO: Movimenta os carros durante o mapeamento. Y
primeiro */
/*
*/
/*****
*****/

void movecarroy (int x, int y){
    int j, Xpas, Ypas, bitu,bitd;

    // motor 1 (x)

    // motor 2 (y)

    Ypas=YATUAL-y;
    if (Ypas<0) {
        Ypas=Ypas*(-1);
        bitu=15;
        bitd=7;
    }
    else{
        bitu=11;
        bitd=3;
    }
    if (Ypas!=0){
        outportb(0x378,bitu);
        for (j=0;j<Ypas;j++){
            outportb(0x378,bitd);
            delay(25);
            outportb(0x378,bitu);
        }
    }
    Xpas=XATUAL-x;
    if (Xpas<0) {
        Xpas=Xpas*(-1);
        bitu=14;
        bitd=12;
    }
    else{
        bitu=15;
        bitd=13;
    }
    if (Xpas!=0){

```

```

        outportb(0x378,bitu);
//inicial
        for (j=0;j<Xpas;j++){
            outportb(0x378,bitu);
            delay(25);
            outportb(0x378,bitd);
        }
        delay(1000);
    }
    delay(500); // espera 500 ms para estabilizar ponta Hall
    XATUAL=x;
    YATUAL=y;
}

```


Anexo B

Listagem dos arquivos de entrada do Poisson

Dipolo tipo C fechado curvatura de (30 e 45)º
Mauricio de Lima Lopes - 2000
Modificado em fevereiro de 2001

```
&reg kprob=0, mat=1, mode=-1,  
nbslo=1, nbsup=0, nbslf=0, nbsrt=0,  
xmin=-11.0000, xmax= 4.000,  
ymin= 0.0000, ymax= 10.000,  
xreg1=-7.0, xreg2=-1.5, xreg3=2.5,  
kreg1=10, kreg2=30, kreg3=80, kmax=100,  
yreg1=1.2,  
lreg1=40, lmax=80,  
ktype=2, nterm=12, nptc=180, rint=1, angle=180, rnorm=1, anglz=0 &
```

```
&po x=-11.0000, y= 0.0000 & ; Toda a região  
&po x= 4.0000, y= 0.0000 &  
&po x= 4.0000, y= 10.0000 &  
&po x=-11.0000, y= 10.0000 &  
&po x=-11.0000, y= 0.0000 &
```

```
&reg mat=2 & ; Ferro  
&po x=-11.0000 , y= 0.0000 &  
&po x= -7.0000 , y= 0.0000 &  
&po x= -7.0000 , y= 3.0000 &  
&po x= -1.5000 , y= 3.0000 &  
&po x= -1.5000 , y= 1.2000 &  
&po x= 2.5000 , y= 1.2000 &  
&po x= 2.5000 , y= 6.0000 &  
&po x=-11.0000 , y= 6.0000 &  
&po x=-11.0000 , y= 0.0000 &
```

```
&reg mat=1, current=1400 & ; Bobina  
&po x= -7.0000 , y= 0.0000 &  
&po x= -3.0000 , y= 0.0000 & ; x=7 (originalmente)  
&po x= -3.0000 , y= 2.5000 &  
&po x= -7.0000 , y= 2.5000 &  
&po x= -7.0000 , y= 0.0000 &
```

Dipolo tipo C curvatura 90o
Maurício de Lima Lopes - 2001

```
&reg Kprob=0,mode=0,mat=1,  
xmin=-33,ymin=-13.,xmax=10.,ymax=13.,  
nbslo=0,nbsup=0,nbslf=0,nbsrt=0,  
yminf=0,ymaxf=1.2,xminf=-25.,xmaxf=+5,  
xreg1=-25,xreg2=-15.,xreg3=-5.,xreg4=5.  
kreg1=20,kreg2=30,kreg3=50,kreg4=80,kmax=90,  
ktype=1,nterm=9,nptc=41,rint=1.5,angle=360,rnorm=1.5 &
```

```
&po x= -33., y=-13. & ; Região de contorno  
&po x= 10., y=-13. &  
&po x= 10., y=13. &  
&po x= -33., y=13. &  
&po x= -33., y=-13. &
```

```
&reg mat=2 &  
&po x=-25.,y=-13. & ; Geometria e ferro  
&po x=-25.,y=13. &  
&po x= 5., y=13 &  
&po x= 5., y=1.2 &  
&po x=-5., y=1.2 &  
&po x=-5., y=6. &  
&po x=-15., y=6. &  
&po x=-15., y=-6. &  
&po x=-5., y=-6. &  
&po x=-5., y=-1.2 &  
&po x=5., y=-1.2 &  
&po x=5., y=-13 &  
&po x=-25., y=-13. &
```

```
&reg mat=1,cur=12000 & ; Bobina  
&po x=-14.5,y=-5 &  
&po x=-14.5,y=5&  
&po x=-6.5,y=5&  
&po x=-6.5,y=-5 &  
&po x=-14.5,y=-5 &
```

```
&reg mat=1,cur=-12000 & ; Bobina  
&po x=-25.5,y=-5 &  
&po x=-25.5,y=5&  
&po x=-33.,y=5&  
&po x=-33.,y=-5 &  
&po x=-25.5,y=-5 &
```


SW mag

Usando tabela interna p/ aco 1010

Mauricio de Lima Lopes - 2001

```
&reg kprob=0,mode=0,mat=2,  
xmin=-40.0,ymin=-21.2,xmax=40.0,ymax=21.2,  
nbslo=0,nbsup=0,nbslf=0,nbsrt=0,  
yminf=0,ymaxf=1.2,xminf=-30.0,xmaxf=30.0,  
ktype=1,nterm=9,nptc=41,rint=2.0,angle=360,rnorm=2.0,  
xreg1=-28.0,xreg2=-11.0,xreg3=11.0,xreg4=28.0,  
kreg1=10,kreg2=40,kreg3=85,kreg4=110,kmax=120,  
yreg1=-10.2,yreg2=-1.2,yreg3=1.2,yreg4=10.2,  
lreg1=5,lreg2=25,lreg3=45,lreg4=65,lmax=70 &
```

```
&po x=-40.0,y=-21.2 & ; Inicialmente, toda a geometria e ferro  
&po x=40.0,y=-21.2 &  
&po x=40.0,y=21.2 &  
&po x=-40.0,y=21.2 &  
&po x=-40.0,y=-21.2 &
```

```
&reg mat=1 & ; Regiao do entre-ferro  
&po x=-28.0,y=-10.2 &  
&po x=-11.0,y=-10.2 &  
&po x=-11.0,y=-1.2 &  
&po x=11.0,y=-1.2 &  
&po x=11.0,y=-10.2 &  
&po x=28.0,y=-10.2 &  
&po x=28.0,y=10.2 &  
&po x=11.0,y=10.2 &  
&po x=11.0,y=1.2 &  
&po x=-11.0,y=1.2 &  
&po x=-11.0,y=10.2 &  
&po x=-28.0,y=10.2 &  
&po x=-28.0,y=-10.2 &
```

```
&reg mat=1,cur=-11000 & ; Bobina inferior esquerda  
&po x=-26.5,y=-8.2 &  
&po x=-11.5,y=-8.2 &  
&po x=-11.5,y=-1.2 &  
&po x=-26.5,y=-1.2 &  
&po x=-26.5,y=-8.2 &
```

® mat=1,cur=-11000 & ; Bobina superior esquerda
&po x=-26.5,y=8.2 &
&po x=-11.5,y=8.2 &
&po x=-11.5,y=1.2 &
&po x=-26.5,y=1.2 &
&po x=-26.5,y=8.2 &

® mat=1,cur=11000 & ; Bobina inferior direita
&po x=26.5,y=-8.2 &
&po x=11.5,y=-8.2 &
&po x=11.5,y=-1.2 &
&po x=26.5,y=-1.2 &
&po x=26.5,y=-8.2 &

® mat=1,cur=11000 & ; Bobina inferior esquerda
&po x=26.5,y=8.2 &
&po x=11.5,y=8.2 &
&po x=11.5,y=1.2 &
&po x=26.5,y=1.2 &
&po x=26.5,y=8.2 &

Anexos C

Desenhos Mecânicos

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
		PESSOA P/ CONTATO <i>Roberto</i>		RAMAL <i>6813</i>	
TITULO <i>PARTE SUPERIOR DO DIPOLO DE 300</i>				OFICINA MECÂNICA	
				REQ N.	
PROJ. <i>Marcos/Maurício/Ana</i>	QUANT. <i>1 unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>	DATA ENT. <i>/ /</i>		VISTO
DES. <i>Ana Carolina/Maurício</i>	MAT. <i>FERRO 1008</i>	DATA <i>29 / 08 / 00</i>	DATA SAÍDA		VISTO
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>6/ escala</i>	DES. <i>N. 01 DE 01</i>	<i>/ /</i>		
OBS.					

VISTA SUPERIOR

VISTA LATERAL

VISTA FRONTAL

OS 3 FURDS SÃO Ø8MM

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO Roberto RAMAL 6813	
TÍTULO PARTE INFERIOR DO DIPLO DE 300				OFICINA MECÂNICA	
				REQ. N.	
PROJ. <i>Marcos/Maurício/Ana</i>		QUANT. 1 <i>unidade(s)</i>	DIMENSÕES milímetros		DATA ENT. / /
<i>Ana Carolina/Maurício</i>		MAT. FERRO 1008	DATA 29 /08 /00		DATA SAÍDA
VERIF. <i>Roberto</i>		ESCALA <i>s/ escala</i>	DES. N. Ø1 DE Ø1		VISTO / /

OBS.: OS 3 FUROS SÃO DE $\varnothing 8\text{MM}$

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR	
		PESSOA P/ CONTATO Roberto		RAMAL 6813	
TÍTULO				OFICINA MECÂNICA	
PARTE INFERIOR DO DIPOLO DE 45°				REQ N.	
N.					
PROJ. Marcos/Maurício/Thiago	QUANT. 1 unidade(s)	DIMENSÕES Milímetros		DATA ENT. / /	VISTO
DES. THIAGO/MAURICIO	MAT. Ferro 1008	DATA 25 / 08 / 00		DATA SAIDA	VISTO
VERIF. Roberto	ESCALA s/ escala	DES. N. 01 DE 01		/ /	
OBS.

OBS.: OS 3 FUROS SÃO IGUAIS.

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR	
				PESSOA P/ CONTATO Roberto RAMAL 6813	
TITULO PARTE SUPERIOR DO DIPOLO DE 45°					OFICINA MECÂNICA
N.					REQ N.
PROJ. Marcos/Mauricio/Thiago	QUANT. 1 unidade(s)	DIMENSÕES Mm/metros		DATA ENT. / /	VISTO
DES. THIAGO/MAURICIO	MAT. Ferro 1008	DATA 25 /08 /00		DATA SADA	VISTO
VERIF. Roberto	ESCALA 6/ escola	DES. N. Ø1 DE Ø1		/ /	
OBS.

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO <i>Roberto</i> RAMAL <i>6813</i>	
TÍTULO ESPACADOR DO DIPOLO DE 30° E 45° N.				OFICINA MECÂNICA	
				REQ N.	
PROJ. <i>Marcos/Mauricio/Thiago</i>	QUANT. <i>2 unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT. <i>/ /</i>	VISTO
DES. <i>THIAGO/MAURICIO</i>	MAT. <i>Ferro 1008</i>	DATA <i>25 /08 /00</i>		DATA SADA	VISTO
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>5/ escola</i>	DES. <i>N. Ø1 DE Ø1</i>		<i>/ /</i>	
OBS.

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO <i>Roberto</i> RAMAL <i>6813</i>	
TÍTULO <i>PEÇA P/ ENROLAR AS BOBINAS DOS DIPOLOS DE 30° E 45°</i>				OFICINA MECÂNICA	
				REQ N.	
PROJ. <i>Marcos/Maurício/Thiago</i>	QUANT. <i>1 unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT. <i>/ /</i>	VISTO
DES. <i>THIAGO/MAURICIO</i>	MAT. <i>Al ou Fe</i>	DATA <i>25 / 08 / 00</i>		DATA SAÍDA	VISTO
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>s/ escala</i>	DES. N. 01 DE 01		<i>/ /</i>	
OBS.

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>		
				PESSOA P/ CONTATO		
TÍTULO Modelo para bobina do dipolo de 90° N.					OFICINA MECÂNICA	
					REQ N.	
PROJ. <i>Maurício / Tiago</i>	QUANT. <i>unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT.	VISTO	
DES. <i>Tiago</i>	MAT. <i>Ferro</i>	DATA <i>27/08/2001</i>		<i>/ /</i>		
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>1 : 5</i>	DES. <i>N. 01 DE 01</i>		DATA SAÍDA	VISTO	
				<i>/ /</i>		
OBS.

Vista Superior

Corte A-A'

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO <i>Maurício - 3818-7045</i>	
TÍTULO <i>SWMAG - Peça polar</i>				OFICINA MECÂNICA	
				REQ N.	
PROJ. <i>Maurício</i>	QUANT. <i>2 unidades</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT. <i>/ /</i>	VISTO
DES. <i>Maurício</i>	MAT. <i>Ferro 1010</i>	DATA <i>18/05/2001</i>		DATA SAÍDA <i>/ /</i>	VISTO
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>1:5</i>	DES. <i>N. 01 DE 01</i>			
OBS. <i>Tolerância 0.1</i>

Vista Superior

Corte A-A'

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>		
				PESSOA P/ CONTATO <i>Maurício Ramal 7045</i>		
TÍTULO <i>SWMAG - Anel espaçador</i>					OFICINA MECÂNICA	
					REQ N.	
PROJ. <i>Maurício</i>	QUANT. <i>1 unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT. <i>/ /</i>		
DES. <i>Maurício</i>	MAT. <i>Ferro 1010</i>	DATA <i>18/05/2001</i>		DATA SAÍDA <i>/ /</i>		
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>1:5</i>	DES. <i>N. Ø1 DE Ø1</i>		VISTO		
OBS. <i>Tolerância 0,1</i>

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO <i>Maurício - 3818-7045</i>	
TÍTULO <i>Tubo para flange do SWMAG</i>				OFICINA MECÂNICA	
				REQ N.	
PROJ. <i>Maurício</i>		QUANT. <i>4 unidades</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		N.
DES. <i>Maurício</i>		MAT. <i>Aço inox</i>	DATA <i>01/06/2001</i>		DATA ENT. <i>/ /</i>
VERIF. <i>Roberto</i>		ESCALA <i>sem escala</i>	DES. <i>N. Ø1 DE Ø1</i>		DATA SAÍDA <i>/ /</i>
OBS. <i>Tolerância 0,1</i>

DEPTO. FÍSICA EXPERIMENTAL		IFUSP		SETOR <i>LABORATORIO DO ACELERADOR LINEAR</i>	
				PESSOA P/ CONTATO <i>Maurício - 3818-7045</i>	
TÍTULO <i>Tampa para camera de vacuo do SWMAG</i>				OFICINA MECÂNICA	
				REQ. N.	
PROJ. <i>Maurício</i>	QUANT. <i>2 unidade(s)</i>	DIMENSÕES <i>milímetros</i>		DATA ENT.	VISTO
DES. <i>Maurício</i>	MAT. <i>Latao</i>	DATA <i>16/07/2001</i>		<i>/ /</i>	
VERIF. <i>Roberto</i>	ESCALA <i>1:5</i>	DES. <i>N. 01 DE 01</i>		DATA SAÍDA	VISTO
				<i>/ /</i>	
OBS. <i>Tolerância 0.1</i>					

Anexo D

Listagem do programa TRACE


```
[a,i]=max(max(mzi')); % Acha a posicao de maximo da
matriz
[a,j]=max(max(mzi));
```

```
n=size(mzi,1); % Acha as dimensoes da
matriz
m=size(mzi,2);
```

```
clear XRe YRe XRs YRs XT YT;
```

```
campo=input('Qual o campo maximo (em G)? ');
if isempty(campo)==1
    campo=campor;
end;
E=input('Qual a energia da particula (em MeV)? ');
if isempty(E)==1
    E=Er;
end;
AT=input('Qual o angulo do feixe (em graus)? ');
if isempty(AT)==1
    AT=ATr;
end;
OS=input('Qual o off set do tubo (em mm)? ');
if isempty(OS)==1
    OS=OSr;
end;
```

```
valor=(tan((AT/4)*pi/180))*((xei(m)-xei(1))/2);
B=mzi*campo;
```

```
offset=floor(OS/passoi);
```

```
%xei=xei-min (xei);
%yei=yei-min (yei);
```

```
figure(1);
colormap('default');
xlabel('Z(mm)');
ylabel('X(mm)');
hold on;
axis equal;
grid off;
contour(xei,yei,mzi); % Curva de nivel
```

```
iy=0;
```

```
i=i+floor(valor/passoi)+floor(offset/passoi);
```

```

indx=1;
if i>n
    indx=indx+floor((i-n)*abs(tan(AT/2)));
    i=n;
end;

X=x(i(indx));           %X inicial
Y=(i)*passoi+yei(1);    %Y inicial
Yo=Y;
thetas=-(AT/2)*pi/180;  %Angulo inicial

ind=indx;

while ind < m
    YT(ind)=Y;
    XT(ind)=X;
    R(ind)=radius(E,.511,1,1,B(i+iy,ind)); %i+iy
    theta(ind)=atan((passoi/10)/(R(ind)));
    thetas=thetas+theta(ind);
    Y=Y+passoi*tan(thetas);
    X=X+passoi;

    %incluir posição da partícula
    if (Yo-Y)>passoi
        Yo=Y;
        iy=iy-1;
    end

    if (Y-Yo)>passoi
        Yo=Y;
        iy=iy+1;
    end

    ind=ind+1;

    if iy+i>n
        ind=m+1; %força a saída do laço
    end;

end % fim do laço

%retira os zeros dos vetores XT e YT

mt=size(XT,2);
indaux2=1;
for indaux1=1:mt;
    if (XT(indaux1) ~= 0)

```

```

        XTaux(indaux2)=XT(indaux1);
        YTaux(indaux2)=YT(indaux1);
        indaux2=indaux2+1;
    end;
end;

clear XT;
clear YT;
XT=XTaux;
YT=YTaux;
clear XTaux;
clear YTaux;

%

%respostas uteis

Angulo=sum(theta)*180/pi      %Angulo total do desvio
Raio=radius(E,.511,1,1,campo)*10  %Raio da trajetoria na regio uniforme em
mm

% reta "artificial"

XRe=linspace(XT(1)-(cos((AT/2)*pi/180)*100),XT(1),10);
YRe=linspace(YT(1)+(sin((AT/2)*pi/180)*100),YT(1),10);
plot (XRe,YRe,'r');

mt=size(XT,2);
XRslinspace(XT(mt),XT(mt)+(cos((Angulo/2)*pi/180)*100),10);
YRs=linspace(YT(mt),YT(mt)+(sin((Angulo/2)*pi/180)*100),10);
plot (XRsl,YRs,'r');

%traca a trajetoria
plot (XT,YT,'g');

campor=campo;
Er=E;
ATr=AT;
OSr=OS;

clear a valor thetas theta offset n m mt i* j Y Yo X R OS B AT ans;

```

```
% RADIUS (E,Eo,Z,A,B)
% Calcula o raio de curvatura de uma partícula de carga Z e A nucleons com
energia cinética E e energia de repouso Eo
% sob a ação de um campo magnético de intensidade B.
%
%
%OBS: E,Eo dados em MeV e B dado em kilo Gauss.
%      radius devolve em cm.
%
```

```
function r = radius (E,Eo,Z,A,B)
B=abs(B);

$$r = (A / (0.2998 * Z)) * \sqrt{(E/A)^2 + (2 * E * Eo / A)} / B;$$

```