UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

Projeto do microtron principal do IFUSP

Mauricio de Lima Lopes

Tese apresentada
ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo
para obtenção do título de doutor em física.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins - IFUSP (orientador)
Dr. Pedro Tavares - LNLS
Dr. Celso Fuhrmann - CTA
Prof. Dr. Manfredo Harri Tabacniks - IFUSP
Prof. Dr. Vito Vanin - IFUSP

São Paulo
2005

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

Lopes, Mauricio de Lima

Projeto do Microtron do IFUSP.
São Paulo, 2005

Doutoramento (Tese) - Universidade de São Paulo
Instituto de Física - Depto. de Física Experimental

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

Unitermos:

1. Física Nuclear ;
2. Partículas Elementares;
3. Feixes;
4. Instrumentação (Física);
5. Física Experimental.

USP/IF/SBI-095/2005

Resumo

Neste trabalho apresentamos o projeto do microtron principal do IFUSP. Inicialmente são apresentados os fundamentos teóricos relativos à estabilidade do feixe em um microtron, bem como discussões sobre a ótica do feixe.

No trabalho são feitas basicamente 3 tipos de simulações distintas: simulação da dinâmica longitudinal e transversal da etapa síncrona, simulação da dinâmica transversal das linhas de transferência (inserção e extração) e a simulação relativa à otimização do projeto dos eletroímãs principais.

As simulações longitudinais mostraram que é possível reduzir a energia de entrada do microtron principal de 4,9 para 2,5 MeV, o que permitira a eliminação do primeiro estágio síncrono (microtron *booster*). A energia final do microtron principal passa a ser 38 MeV.

Foram realizados os projetos de duas linhas de inserção no principal para essas as duas energias (2,5 e 4,9 MeV) e foi feita uma análise comparativa desses dois projetos. O projeto da linha de extração também foi analisado levando em consideração duas energias de extração (5,8 e 38 MeV) para se mostrar a viabilidade dessa etapa.

Abstract

In this work we present the design of the IFUSP main microtron. Initially, the theoretical foundations for the beam stability in the microtron are presented as well as the beam optics is discussed.

Three different kinds of simulations were done: Longitudinal and transversal beam dynamics in the synchronous part of the machine, transversal beam dynamics concerning the transfer lines and simulations related to the design of the main magnets

The longitudinal simulations suggested that it is possible to reduce the initial energy of the main microtron from 4.9 to 2.5 MeV, this would permit the elimination of the first synchronous stage (booster microtron). The final energy of the main microtron will be 38 MeV.

The design of two insertion lines in the main microtron for the two different energies (2.5 and 4.9 MeV) was done and a comparative analysis between these two designs is presented. The design of the extraction line also takes into account two different extraction energies (5.8 and 38 MeV) in order to show the viability of this part.

Agradecimentos

Parafraseando, em parte, Isaac Newton “...estive sobre ombros de gigantes”. Os gigantes nesse caso são as pessoas que me apoiaram durante a realização desse trabalho, portanto essa tese não estaria completa sem que eu expressasse os meus agradecimentos às seguintes pessoas:

Ao Karl-Heinz Kaiser pela sua hospitalidade, mas acima de tudo, por todo o conhecimento sobre microtrons que me passou e possibilitou uma mudança essencial na visão desse trabalho;

Ao Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins pela orientação, pelo apoio e pela paciência despendida para a realização deste trabalho, mas, sobretudo, quando precisei de um amigo e não de um orientador;

Ao Prof. Dr. Manoel Tiago Freitas da Cruz pelo incentivo e apoio e pelos sempre úteis conselhos;

Ao Prof. Dr. Paulo Reginaldo Pascolati pelo incentivo e pelo apoio que sempre me deu e por ter me instigado a ir à Alemanha quando ainda era seu aluno de laboratório;

Ao Prof. Dr. Jiro Takahashi pelos inúmeros conselhos;

Ao Sr. Jack Tanabe pelos conselhos sobre as geometrias de eletroímãs e pelo apoio para terminar essa tese;

A Ursula Ludwig, por ter me ensinado a dar os primeiros passos com o OPERA-3D;

À Minha família: Rubens, Maria Leônia, Cassia, Paulo, Getúlio, Ane, Natalia, Vinicius e todo o resto da família e agregados, que num ato de insanidade coletiva, se reúnem uma vez ao ano para jogar bingo e me fazem “cantar” todas as pedras durante uma noite inteira (essa tese é a minha prenda pra vocês) e consequentemente me fazem rir a noite inteira;

A Andréa Rizzo, a pessoa mais corajosa que passou em minha vida, pelo carinho, amor e, acima de tudo, pela enorme paciência comigo;

Ao Paulo Beolchi Rios pelo inestimável apoio, por ter me contagiado com sua paixão por aceleradores, por ter me ensinado muito sobre eles (desde a primeira vez que o conheci) e, acima de tudo, pelas nossas “Pepsis” da tarde;

Ao Tiago Fiorini Silva, que para mim sempre será Tiaguinho, por ter me dado a oportunidade de vê-lo amadurecer profissionalmente e por me fazer um pouco responsável por isso e pelo apoio que me deu em horas difíceis;

Aos bolsistas, Hermes, Rodrigo e Giovanni.

Ao Diego Siviero pelo ótimo trabalho com o projeto mecânico dos dipolos principais.

A Katherin Shtejer Diaz, por ter me dado à oportunidade de ser o primeiro em ensiná-la a dirigir um carro e, por isso, me proporcionar ótimos momentos.

A Adriana Barioni por ter me deixado chorar em seus ombros algumas vezes e por permitir oferecer os meus a ela quando precisou;

Aos verdadeiros e únicos “Invencíveis”: Leandro “Guri”, Flavio e Arthur; somos inseparáveis até mesmo quando um oceano se põe entre nós;

À Ana Paula Zaneli, pessoa que vai e volta da minha vida, mas nunca deixei de amar, por todo apoio;

À Juliana, amiga especial que, mesmo a distância, nunca deixa de estar por perto;

À Guta, pois desde que a conheci me sinto menos só neste mundo cheio de “pessoas normais”;

A Silvia (Silvinha para mim) que me fez sentir muito bem me fazendo ver as coisas boas da minha natureza quando só o que via era as coisas ruins;

A Cely, companheira de várias épocas ligadas a USP, pela prometida amizade eterna;

Aos meus amigos do colégio São José que nunca esqueci e que um dia me deram um dos melhores momentos durante a realização deste trabalho;

Às maravilhosas pessoas que conheci no BM e por terem me proporcionado uma das mais valiosas experiências de vida que tive até então;

À Maria da Graça Woell e seu marido Wilfried, as primeiras pessoas verdadeiramente altruístas que conheci em minha vida, por toda a ajuda que me deram no período que estive na Alemanha;

Aos meus colegas da Alemanha que me proporcionaram momentos de alegria: Marco, Monika, Gwendolin e Sarah.

Aos meus novos amigos do projeto ALBA pelo apoio, em especial Antonio Falone por ter sido o primeiro usuário do pacote de ferramentas escritas para o MATLAB, pelo companheirismo e por me ensinar ótimos insultos em italiano que me proporcionaram muitos momentos de descontração;

A Montse Pont por ter me facilitado os cálculos de resfriamento das bobinas e pelo voto de confiança para o término desse trabalho.

Aos alunos de FAP 152 (2004) por terem me dado à honra de ter sido seu professor e tentar ensiná-los algo (espero ter conseguido);

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

Às secretárias do LAL: Sandra (1), Sandra (2) e Tereza pela paciência, por me fazerem rir e por me deixarem chorar;

Ao corpo técnico do projeto Microtron: Alexandre Malafronte, Roberto da Rocha Lima, Marcelo Lucena, Luciano Portante, Alfredo Bonini e ao pessoal da eletrônica: Carlos, Eduardo, Renato pela ajuda;

Ao Departamento de Intercâmbio Alemão – DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst), pelo apoio financeiro para o estágio na Alemanha;

À FAPESP pelo fundamental apoio financeiro;

Dedicado com todo o carinho do mundo aos meus pais:

Rubens e Maria

*“... as vezes eu penso que
a ignorância é um estado de graça...”*
(Prof. Alberto Luiz da Rocha Barros)

Índice

Tabela de notação	15
Introdução	17
Capítulo 1 Fundamentos	21
1.1 Introdução	21
1.2 Condições de estabilidade	22
1.3 Dinâmica de feixe	24
1.3.1 Dinâmica transversal	25
1.3.2 Dinâmica Longitudinal	30
1.4 Teorema de Liouville e a elipse de feixe	35
1.5 Elipse de aceitação longitudinal	37
Capítulo 2 Etapa síncrona	41
2.1 Introdução	41
2.2 Cálculos preliminares	41
2.2.1 Condições de estabilidade	41
2.2.2 Elipse de aceitação da máquina	43
2.2.3 Dinâmica transversal	43
2.3 Simulações da dinâmica longitudinal	44
2.3.1 Simulações com energia decrescente	45
2.3.2 Simulações com energia crescente	47
2.3.3 Tolerâncias para a dinâmica longitudinal	49
2.4 Simulação da dinâmica transversal	51
2.5 Sumário dos resultados da etapa síncrona	53
Capítulo 3 Projeto dos ímãs principais	55
3.1 Introdução	55
3.2 Pré-projeto dos eletroímãs	55
3.3 Projeto dos eletroímãs	58
3.3.1 Simulações em 2D	58
3.3.2 Simulação em 3D	62
3.4 Uso de <i>Clamps</i>	64
3.5 Projeto mecânico	65
3.6 Projeto da bobina	66
3.6.1 Projeto elétrico	66
3.6.2 Refrigeração	70
3.7 Outros problemas relacionados aos ímãs principais	71
Capítulo 4 Projeto das linhas de inserção e extração	73
4.1 Introdução	73
4.2 Linha de inserção a 2,5 MeV	73
4.3 Linha de inserção a 4,9 MeV	80

4.4	Extração	84
Capítulo 5	<i>Estudo de viabilidade dos imãs utilizados nas linhas de inserção e extração</i>	91
5.1	Introdução	91
5.2	Dipolos	91
5.2.1	DipCalc	91
5.2.2	Dipolos 45° para a linha de 2,5 MeV	92
5.2.3	Dipolos de 10° usados na inserção	93
5.2.4	Dipolos de 10° usados na extração	95
5.2.5	Dipolos de 25° e 35° usados na extração	97
5.2.6	Eletroímãs corretores	98
5.3	Quadrupolos	100
5.4	Solenóides	101
	Conclusões	103
	Apêndice A Arquivo de entrada do PTRACE	105
	Apêndice B Desenhos mecânicos do eletroímã principal	107
	Apêndice C Pacote de ferramentas de ótica de feixe para MATLAB®	127
	Apêndice D Arquivos de simulação das linhas de inserção e extração	161
	Apêndice E Manual do programa DipCalc	167
	Referências Bibliográficas	177

Tabela de notação

A, B, R_i	dimensões características de um condutor retangular com cantos arredondados
B	campo magnético
BR	rigidez magnética da partícula
c	velocidade da luz
D	distância entre magnetos principais
e	carga do elétron
E_o	energia de repouso do elétron
ΔE	tolerância do desvio na energia
f	foco
G	gradiente do quadrupolo
h	<i>gap</i> do eletroímã
I	corrente total
I_f	corrente elétrica da fonte de alimentação
J	densidade de corrente
K	vetor de onda
k	poder de focalização de uma lente
L	comprimento total da trajetória na etapa síncrona
Lb	perímetro médio da bobina
L_{ef}	comprimento efetivo
L_o	comprimento da trajetória da órbita inicial
L_T	comprimento total de cada circuito de refrigeração
ΔL	variação do comprimento da trajetória
M	matriz de transferência de um elemento
m	elementos da matriz de transferência
M_D	matriz de transferência de um dipolo
M_f	matriz de focalização
M_L	matriz de transferência de um espaço livre
M_Q	matriz de transferência de um quadrupolo
M_{QTL}	matriz de transferência de um quadrupolo - aproximação de lentes finas
M_{rot}	matriz de rotação
M_{sol}	matriz de transferência de um solenóide
M_{twiss}	matriz de Twiss
n	número de condutores em cada dimensão
N	número total de espiras
P	potência dissipada por bobina
p	momento da partícula
Δp	acréscimo do momento da partícula
P_f	potência elétrica da fonte de alimentação

ρ	resistividade do material
R_e	resistência elétrica
R_o	raio da órbita inicial
S	área da secção reta de cobre do condutor
Se, Co	$\text{sen}(kL_{ef}), \cos(kL_{ef})$
T	matrix de transferência de Courant-Snyder
v	velocidade de escoamento do fluido
V_f	tensão da fonte de alimentação
W	energia final
W_o	energia inicial
ΔW	ganho de energia por volta
X	vetor de um feixe
x, y	direção horizontal, vertical
x', y'	divergências transversais do feixe
z	direção longitudinal
z_l	posição do pacote com relação ao máximo do campo acelerador
α, β, γ	parâmetros de Courant-Snyder
α_{in} e α_{out}	ângulos de entrada e saída do feixe em relação à normal da face polar
β_E, γ_E	parâmetros relativísticos da partícula
$\Delta\phi$	tolerância do desvio na fase
ΔP_r	queda de pressão
ε	emitância
ε^*	emitância normalizada
γ_o	amplitude máxima do ganho de energia em unidades de energia de repouso da partícula
$\Delta\gamma$	ganho de energia em cada volta em função da fase do campo acelerador
ΔT	incremento máximo de temperatura
φ	fase do campo acelerador em relação ao feixe
φ_s	fase do campo acelerador em relação à partícula guia
λ	comprimento de onda da radiofrequência
ν	número inteiro de períodos da radiofrequência correspondente às órbitas consecutivas
μ_o	permeabilidade magnética do vácuo
μ	número inteiro de períodos da radiofrequência correspondente à primeira órbita
$\varnothing$	dimensão do orifício do condutor vazado
θ	ângulo de desvio total em um dipolo

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 [1]. O novo acelerador, recirculado tipo microtron *race-track*, será do tipo onda contínua (CW) e energia máxima (inicialmente prevista) de 31 MeV. Esse acelerador possui dois estágios de aceleração. O primeiro (de 5 voltas), chamado de microtron *booster*, tem como objetivo elevar a energia do feixe, preparando-o para o segundo estágio, chamado de microtron principal.

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 [2-3] (*photon tagger*), capaz de produzir feixes de fótons monocromáticos com energias entre 2 e 27 MeV.

As características principais (iniciais) 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 bremsstrahlung coerente [4].

Canhão de elétrons		
Energia de saída	100 keV (±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)	±2,7	±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 µA	
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 µA	
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 (±0,1%)	
Corrente máxima	50 µA	
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

Descrição do trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal definir os parâmetros do projeto da etapa principal de aceleração (chamada de microtron principal). Devido às novas características do microtron *booster*, descritas em [5], foram necessárias correções em alguns dos parâmetros de operação do principal, entre os quais se destaca o ganho de energia por volta.

Como será mostrado mais adiante, também foi possível introduzir algumas melhorias em relação ao projeto inicial. Uma delas refere-se à energia final que passou de 31 para 38 MeV. Além disso, as simulações realizadas permitiram que a energia de entrada fosse reduzida de 4,94 para 2,5 MeV, podendo, em princípio, ser operado sem a utilização do microtron *booster*.

Este trabalho foi dividido, basicamente, em 4 partes: etapa síncrona, linha de inserção, linha de extração e o projeto dos ímãs principais.

O Capítulo 1 é dedicado aos fundamentos teóricos que regem um acelerador de partículas e, em especial, um microtron do tipo *race-track*. São abordadas as condições de estabilidade da etapa recirculada e também a dinâmica de feixe usando notação matricial.

As simulações do feixe na etapa síncrona são apresentadas no Capítulo 2, que aborda a dinâmica longitudinal e transversal do feixe, além de definir os parâmetros ótimos de operação (como energia, distância entre eletroímãs, ganho de energia por volta e energia de entrada) do microtron e suas tolerâncias.

Um dos aspectos importantes de um microtron é o desenho dos ímãs principais. Para o microtron proposto nesse trabalho, deverão ser construídos magnetos com uma área útil de aproximadamente $2 \times 1 \text{ m}^2$, onde a uniformidade do campo magnético deve ser da ordem de 10^{-4} , com uma massa estimada de 14 toneladas cada. Além disso, é necessária a introdução de bobinas auxiliares com campos reversos (chamados de *clamps*) para corrigir os problemas de desfocalização vertical causados pelo campo de borda dos ímãs. Todos esses problemas são abordados no Capítulo 3.

O Capítulo 4 descreve os projetos de inserção e extração do feixe no principal. Em particular, são feitas duas análises para o projeto de inserção, uma a 4,9 e outra a 2,5 MeV. Para o projeto de extração é feita uma análise de como se extrai o feixe em qualquer uma das órbitas, selecionando, assim, a energia do feixe que será usado no experimento.

O Capítulo 5 é dedicado ao estudo de viabilidade dos ímãs que compõem as linhas de inserção e extração.

Encerra-se este trabalho com as considerações finais, referências e apêndices onde podem ser encontrados demonstrações matemáticas, desenhos mecânicos e arquivos de simulação.

Capítulo 1

Fundamentos

1.1 Introdução

O microtron foi proposto por V. I. Veksler em 1944 [6], chamado inicialmente de “ciclotron de elétrons”. A idéia inicial era contornar os problemas de sincronização que ocorriam em ciclotrons de frequência fixa por causa do aumento relativístico da massa com o aumento da energia. Este efeito aumenta o período de revolução fazendo com que as partículas se atrasem com relação à fase do potencial acelerador [7]. Em um microtron, isto é feito de tal maneira que o ganho de energia por volta seja constante. O resultado é que o atraso no tempo é fixado em um único valor, sendo esse um múltiplo inteiro do período da frequência de oscilação do potencial acelerador (às vezes chamado de oscilador). A diferença entre períodos de órbitas sucessivas deve ser, então, um múltiplo do período do oscilador.

O microtron convencional (ou clássico) consiste de um magneto com campo uniforme e de uma única cavidade aceleradora, com as órbitas sendo tangentes ao eixo principal da cavidade como pode ser visto na figura 1.1. O primeiro acelerador desse tipo foi realizado por H. R. Froelich e E. Brannen [8] na *University of Western Ontario*.

figura 1.1- Microtron convencional

No entanto, o microtron convencional possui limitações com respeito à energia final, devido, basicamente, à relação entre o baixo ganho de energia da cavidade aceleradora e o tamanho do ímã. Para contornar o problema da limitação de energia final, pensou-se em uma nova configuração onde basicamente o ímã é dividido em duas partes, fazendo com que as órbitas sejam semelhantes a uma pista de corrida (*race-track*), como pode ser exemplificado na figura 1.2. Essa idéia descende da proposta de L. I. Schiff, apresentada em artigo publicado em 1946 [9]. Dessa forma é possível colocar um acelerador linear entre os ímãs (ao invés de uma única cavidade) aumentando, assim, o ganho de energia por volta.

figura 1.2 - Microtron do tipo *race-track*

1.2 Condições de estabilidade

Como dito anteriormente, a recirculação de elétrons em um microtron deve seguir as condições de aceleração síncrona. São elas [10]:

1. O período da primeira órbita deve ser um número inteiro (μ) de períodos da radiofrequência (RF) do campo elétrico acelerador.
2. O acréscimo do período em cada órbita deve ser um número inteiro (ν) de períodos de RF.

Matematicamente essas duas condições podem ser obtidas a partir do cálculo do comprimento da trajetória (de uma órbita qualquer) de um elétron em um microtron:

$$L = 2\pi R + 2D$$

eq 1.1

onde L é o comprimento total da trajetória, R é o raio da trajetória dentro do magneto e D é a distância que separa esses magnetos. Substituindo R pela equação tradicional da trajetória de uma partícula carregada sob a ação de um campo magnético [7], teremos:

$$R = \frac{p}{eB} \Rightarrow L = 2\pi \frac{p}{eB} + 2D$$

eq 1.2

onde p é o momento da partícula, e a carga e B o campo magnético. Diferenciando a equação acima:

$$dL = \frac{2\pi}{eB} dp.$$

eq 1.3

Portanto, a uma variação Δp no momento do elétron, corresponderá uma variação no comprimento de sua trajetória:

$$\Delta L = \frac{2\pi}{eB} \Delta p .$$

eq 1.4

Igualando-se então a um número inteiro (ν) de comprimentos de onda (λ), teremos:

$$\Delta L = \frac{2\pi}{eB} \Delta p = \nu \lambda$$

eq 1.5

reescrevendo a equação acima, isolando ν teremos:

$$\nu = \frac{2\pi}{eB} \frac{\Delta p}{\lambda} .$$

eq 1.6

Da mesma forma, escrevemos a trajetória do elétron na primeira órbita:

$$L_o = 2\pi R_o + 2D ,$$

eq 1.7

onde R_o e L_o são o raio e o comprimento total da trajetória da órbita inicial respectivamente. Igualando isso a um número inteiro de comprimentos de onda:

$$2\pi R_o + 2D = \mu \lambda .$$

eq 1.8

A eq 1.6 também é chamada de condição de coerência dinâmica, assim como a eq 1.8 é conhecida como condição de coerência estática [11]. Lembrando que estamos considerando o elétron ultra-relativístico, tal que:

$$cp = \beta_E E ,$$

eq 1.9

a eq 1.6 pode ser escrita como:

$$\nu = \frac{2\pi}{eB} \frac{\beta_E \Delta E}{c \lambda} ,$$

eq 1.10

onde c é a velocidade da luz, β_E a relação clássica de Einstein para a velocidade da partícula ($\beta_E = v/c$) e E é a energia da partícula. Considerando $\beta_E = 1$, podemos reescrever a eq 1.10:

$$\nu = \frac{2\pi}{c} \frac{\Delta W}{\lambda B} ,$$

eq 1.11

onde ΔW é o ganho de energia por volta dado em eV (unidade mais adequada em física de aceleradores). Em geral toma-se $\nu=1$, pois dessa forma a distância entre as órbitas será a menor possível.

Também podemos simplificar a expressão para a condição de coerência estática:

$$\mu = \frac{2\pi R_o + 2D}{\lambda} \quad \text{eq 1.12}$$

$$R_o = \frac{p_o}{eB} = \frac{W_o}{cB} \quad \text{eq 1.13}$$

onde W_o é a energia inicial do elétron em eV. Substituindo as equações, teremos:

$$\mu = \frac{2\pi W_o}{c\lambda B} + \frac{2D}{\lambda}. \quad \text{eq 1.14}$$

1.3 Dinâmica de feixe

O movimento das partículas de um feixe é, em geral, definido segundo o centróide desse feixe. Determina-se um sistema de coordenadas com a origem localizada no centróide e o eixo z na direção do movimento. Os eixos x e y são perpendiculares ao movimento e usualmente associa-se x à direção horizontal e y à vertical. O movimento de uma partícula do feixe é determinado por um vetor:

$$\begin{bmatrix} x \\ p_x \\ y \\ p_y \\ z \\ p_z \end{bmatrix}$$

onde z é o comprimento longitudinal do feixe (comprimento do pacote de elétrons) e p_x , p_y e p_z são as componentes do momento da partícula nas direções correspondentes. Em geral, ao invés de se utilizar p_x e p_y , utiliza-se x' e y' , definidos por:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{p_x}{p_z} \\ y' &= \frac{p_y}{p_z} \end{aligned} \quad \text{eq 1.15}$$

Tipicamente x e y são dados em mm e x' e y' em mrad. Para a parte longitudinal, tomam-se outras grandezas equivalentes a z e p_z , como veremos mais adiante.

O estudo da dinâmica do feixe pode ser feito separando-se o movimento transversal do longitudinal.

1.3.1 Dinâmica transversal

Como vimos, uma partícula do feixe é determinada por um vetor, que para a dinâmica transversal, resume-se em:

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \end{bmatrix}$$

As transformações que uma partícula sofrerá saindo de uma posição inicial (0) até uma posição qualquer (1), passando por um dado elemento da linha de transporte, são determinadas adotando-se um formalismo matricial [12]:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x'_1 \\ y_1 \\ y'_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_o \\ x'_o \\ y_o \\ y'_o \end{bmatrix}$$

eq 1.16

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$

eq 1.17

A matriz M é chamada de matriz de transferência e assume uma forma específica para cada tipo de elemento em uma linha de transporte de feixe. A seguir serão apresentadas as matrizes (em primeira ordem) dos principais elementos de um acelerador [13].

- Espaço livre

O espaço livre é o elemento mais simples de uma linha de transporte e é definido como:

$$M_L = \begin{bmatrix} 1 & l & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

eq 1.18

onde l é o comprimento do espaço livre.

- Quadrupolo

A matriz de um quadrupolo é definida como:

$$M_Q = \begin{bmatrix} \cos(kL_{ef}) & \frac{\sin(kL_{ef})}{k} & 0 & 0 \\ -k \sin(kL_{ef}) & \cos(kL_{ef}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(kL_{ef}) & \frac{\sinh(kL_{ef})}{k} \\ 0 & 0 & k \sinh(kL_{ef}) & \cosh(kL_{ef}) \end{bmatrix}$$

eq 1.19

onde L_{ef} é o comprimento efetivo que, para o caso de um quadrupolo, é dado pela expressão

$$L_{ef} = \frac{\int G(z) dz}{G_o},$$

eq 1.20

(onde $G(z)$ é o gradiente do quadrupolo ao longo da direção longitudinal z e G_o é o gradiente nominal); k é o poder de focalização dado pela expressão

$$k^2 = G \left(\frac{1}{BR} \right)$$

eq 1.21

com

$$BR = \frac{p}{e}$$

eq 1.22

onde BR é a rigidez magnética da partícula.

É conveniente lembrar que um quadrupolo não focaliza um feixe em ambos os planos ao mesmo tempo. A matriz apresentada é para um quadrupolo que focaliza no plano horizontal. Este elemento é equivalente às lentes cilíndricas em ótica geométrica.

- Aproximação de quadrupolos por lentes finas

A aproximação de quadrupolos por lentes finas pode ser usada quando $k^{-1} \gg L_{ef}$ e a matriz M_Q pode então ser aproximada por:

$$M_{Q_{fl}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -k \operatorname{sen}(kL_{ef}) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & k \operatorname{senh}(kL_{ef}) & 1 \end{bmatrix}.$$

eq 1.23

Usualmente se define o foco (f) dessa lente sendo:

$$\frac{1}{f} = k \operatorname{sen}(kL_{ef})$$

eq 1.24

- Dipolo

A matriz de um dipolo é definida como:

$$M_{dip} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & R \operatorname{sen}(\theta) & 0 & 0 \\ -\frac{\operatorname{sen}(\theta)}{R} & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

eq 1.25

onde θ é o ângulo de desvio do feixe e R é o raio de curvatura desse desvio.

A matriz apresentada é para um dipolo que realiza o desvio do feixe no plano horizontal. Além disso, essa matriz considera a incidência do feixe perpendicular às faces polares do magneto. Para uma incidência não perpendicular devemos introduzir duas matrizes adicionais (uma para a entrada do feixe, M_{in} , e outra para a saída, M_{out}):

$$M_{in} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\operatorname{tg}(\alpha_{in})}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\operatorname{tg}(\alpha_{in})}{R} & 1 \end{bmatrix},$$

eq 1.26

$$M_{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\text{tg}(\alpha_{out})}{R} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\text{tg}(\alpha_{out})}{R} & 1 \end{bmatrix},$$

eq 1.27

onde α_{in} e α_{out} são, respectivamente, os ângulos de entrada e saída do feixe com relação à normal à face polar. O sinal desses ângulos será positivo se a normal da face polar se encontra na parte externa do feixe em relação ao raio de curvatura, como visto na figura 1.3.

figura 1.3 - Parâmetros de um dipolo

A matriz de transferência mais geral de um dipolo é dada, portanto, por:

$$M_D = M_{out} M_{dip} M_{in}$$

eq 1.28

- Solenóide

A matriz de um solenóide é definida como:

$$M_{sol} = \begin{bmatrix} Co^2 & \frac{SeCo}{k} & SeCo & \frac{Se^2}{k} \\ -kSeCo & Co^2 & -kSe^2 & SeCo \\ -SeCo & -\frac{Se^2}{k} & Co^2 & \frac{SeCo}{k} \\ kSe^2 & -SeCo & -kSeCo & Co^2 \end{bmatrix},$$

eq 1.29

onde $Co=\cos(kL_{ef})$, $Se=\sin(kL_{ef})$, L_{ef} é o comprimento efetivo do solenóide, que é definido como:

$$L_{ef} = \frac{\int B_z(z) dz}{B_{zo}}$$

onde $B_z(z)$ é a componente longitudinal do campo ao longo do eixo do solenóide e B_{zo} é a componente do campo longitudinal na posição central; e k é o poder de focalização, que para o solenóide é dado por:

$$k = \frac{B_{zo}}{2BR},$$

eq 1.30

Um solenóide é utilizado para focalizar o feixe, mas, ao contrário de um quadrupolo, um solenóide focaliza nos dois planos simultaneamente. Além disso, um solenóide proporciona ao feixe uma rotação de kL_{ef} ao redor do eixo de propagação. Assim sendo, é possível decompor a matriz de um solenóide em duas matrizes: uma responsável pela focalização (M_f) e outra pela rotação (M_{rot}):

$$M_f = \begin{bmatrix} Co & \frac{Se}{k} & 0 & 0 \\ -kSe & Co & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Co & \frac{Se}{k} \\ 0 & 0 & -kSe & Co \end{bmatrix}$$

eq 1.31

$$M_{rot} = \begin{bmatrix} Co & 0 & Se & 0 \\ 0 & Co & 0 & Se \\ -Se & 0 & Co & 0 \\ 0 & -Se & 0 & Co \end{bmatrix}$$

eq 1.32

$$M_{sol} = M_f M_{rot}$$

eq 1.33

Deve-se notar que a matriz de um solenóide possui todos os seus elementos diferentes de zero. Isso se deve ao fato de que a rotação provocada por esse elemento (devido à simetria azimutal do campo) produz uma correlação entre os planos vertical e horizontal.

1.3.2 Dinâmica Longitudinal

No estudo da dinâmica longitudinal é possível fazermos uma analogia com os elementos da dinâmica transversal. Para isso, é mais conveniente utilizarmos uma notação diferente daquela adotada anteriormente.

Inicialmente, definiremos a amplitude máxima do ganho de energia em unidades de energia de repouso da partícula [15]:

$$\gamma_o = \frac{\Delta W}{E_o},$$

eq 1.34

onde ΔW é o ganho máximo de energia (tal como descrito na eq 1.11) e E_o é a energia de repouso do elétron.

Definiremos também uma variável que represente a fase do campo acelerador em relação ao feixe de acordo com a figura 1.4

figura 1.4 - campo acelerador

$$\varphi = Kz_l,$$

eq 1.35

onde K é o vetor de onda, definido como

$$K = \frac{2\pi}{\lambda};$$

eq 1.36

e z_l é a posição do pacote de elétrons com relação ao máximo do campo acelerador.

Um microtron, do ponto de vista longitudinal, é composto basicamente do acelerador linear (linac) e dos eletroímãs principais. A seguir, serão apresentadas as análises de cada um desses elementos em separado e, ao final, será apresentada o modelo do microtron como um todo.

- Linac

Em um linac, o ganho de energia do elétron síncrono (partícula guia), dependerá de sua fase com relação à fase do campo acelerador:

$$\Delta\gamma = \gamma_o \cos \varphi_s . \quad \text{eq 1.37}$$

No exemplo da figura 1.4, o ganho de energia do pacote localizado em uma posição qualquer z_{l1} , é dado pela seguinte relação:

$$\Delta\gamma_1 = \gamma_o \cos Kz_{l1} . \quad \text{eq 1.38}$$

O pacote, ao passar pelo linac, não sofre alteração de sua posição com relação ao máximo do campo acelerador (assumindo que o pacote está ultra-relativístico), logo podemos escrever que

$$z_{l1} = z_{l2} \quad \text{eq 1.39}$$

O ganho de energia, por sua vez, deverá levar em conta não apenas o ganho de energia na posição central (z_{l1}) mas também a variação da posição dos elétrons do pacote com relação a esse ponto. Portanto:

$$\Delta\gamma_2 = \frac{d\Delta\gamma}{dz} z_{l1} + \Delta\gamma_1 \quad \text{eq 1.40}$$

$$\Delta\gamma_2 = -\gamma_o K \sin Kz_{l1} + \Delta\gamma_1 \quad \text{eq 1.41}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} z_{l2} \\ \Delta\gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\gamma_o K \sin \varphi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{l1} \\ \Delta\gamma_1 \end{bmatrix} \quad \text{eq 1.42}$$

Comparando essa matriz com aquelas definidas para a ótica transversal, um linac é equivalente a um quadrupolo na aproximação de lentes finas (considerando-se apenas a parte focalizadora), onde:

$$f^{-1} = \gamma_o K \sin \varphi . \quad \text{eq 1.43}$$

Portanto um linac focaliza o feixe longitudinalmente.

- Eletroímãs principais

O pacote ao passar pelos eletroímãs principais, mantém a variação que tinha anteriormente

$$\Delta\gamma_2 = \Delta\gamma_1.$$

eq 1.44

Por outro lado, o pacote ao passar por esses elementos, terá a sua posição central alterada por conta da variação de energias das partículas do pacote. Assim, respeitando as condições de coerência do microtron, podemos escrever que para um ímã:

$$z_{l2} = z_{l1} + \frac{v\lambda}{\gamma_o \cos \varphi} \Delta\gamma_1.$$

eq 1.45

Logo:

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} z_2 \\ \Delta\gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{v\lambda}{\gamma_o \cos \varphi} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ \Delta\gamma_1 \end{bmatrix}$$

eq 1.46

Comparando essa matriz com a que definimos para as matrizes da ótica transversal, um dipolo é equivalente a um espaço livre na dinâmica longitudinal, onde:

$$l = \frac{v\lambda}{\gamma_o \cos \varphi}$$

eq 1.47

- Modelo longitudinal de um microtron

Como vimos anteriormente, é possível associarmos esses elementos de forma a obter uma matriz de transferência única. Assim, utilizamos os elementos equivalentes da dinâmica transversal para representar a dinâmica longitudinal de um microtron, como pode ser visto na figura 1.5:

figura 1.5 - Representação dos elementos da dinâmica longitudinal com elementos equivalentes da dinâmica transversal

Expressando de forma matemática:

$$\begin{bmatrix} 1 & l/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l/2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} 1 - \frac{l}{2f} & l - \frac{l^2}{4f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l}{2f} \end{bmatrix} = M_T$$

eq 1.48

Devemos lembrar que esse arranjo é periódico em um microtron. Sendo assim, podemos calcular quais devem ser os elementos dessa matriz a fim de obtermos uma solução estável para todo o conjunto. Para isso lançamos mão dos resultados fornecidos das soluções da equação de Hill e da matriz de Twiss. Assim temos que, para uma dada matriz representando um sistema periódico [14]:

$$M_T = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix},$$

eq 1.49

essa matriz terá uma solução estável se [14]:

$$\left| \frac{\text{Tr}(M_T)}{2} \right| \leq 1.$$

eq 1.50

Portanto, podemos determinar os limites da estabilidade:

$$\frac{a+d}{2} = 1$$

eq 1.51

ou

$$\frac{a+d}{2} = -1.$$

eq 1.52

- Resolvendo inicialmente a eq 1.51:

$$1 - \frac{l}{2f} = 1$$

$$-\frac{l}{2f} = 0$$

$$\frac{l}{f} = 0$$

$$\Rightarrow f^{-1} = 0$$

pois $(l \neq 0)$,

reescrevendo com o uso dos parâmetros da dinâmica longitudinal:

$$\begin{aligned} f^{-1} &= \gamma_o K \sin \varphi = 0 \\ \Rightarrow \sin \varphi &= 0 \end{aligned} \quad \text{eq 1.53}$$

Se restringirmos φ ao 1º quadrante, então:

$$\varphi = 0. \quad \text{eq 1.54}$$

- Resolvendo a eq 1.52:

$$\begin{aligned} 1 - \frac{l}{2f} &= -1 \\ -\frac{l}{2f} &= -2 \\ \frac{l}{f} &= 4 \\ lf^{-1} &= 4 \\ \Rightarrow \frac{\nu\lambda}{\gamma_o \cos \varphi} \gamma_o K \sin \varphi &= 4 \end{aligned} \quad \text{eq 1.55}$$

e lembrando que $K = \frac{2\pi}{\lambda}$, podemos reescrever a eq 1.55:

$$\begin{aligned} \nu\pi \tan \varphi &= 2 \\ \varphi &= \arctg\left(\frac{2}{\nu\pi}\right). \end{aligned} \quad \text{eq 1.56}$$

Portanto, para que o microtron esteja numa situação estável, o pacote de elétrons deve estar entre:

$$0 \leq \varphi \leq \arctg\left(\frac{2}{\nu\pi}\right). \quad \text{eq 1.57}$$

É importante lembrar que, em geral, adota-se o valor de $\nu = 1$ para microtrons, logo:

$$0 \leq \varphi \leq 32,48^\circ \quad \text{eq 1.58}$$

1.4 Teorema de Liouville e a elipse de feixe

O ponto fundamental em dinâmica de feixe é observar os efeitos do coletivo das partículas ao invés de uma única. Para tal, vamos introduzir agora o conceito de elipse do feixe.

Um feixe de partículas pode ser representado por uma elipse no chamado espaço de fase. A figura 1.6 mostra o exemplo mais geral da elipse de feixe. A maioria das partículas do feixe estará contida nessa elipse.

figura 1.6 - Elipse do espaço de fase

Na figura 1.6, α , β , γ e ϵ são os parâmetros que descrevem essa elipse segundo a relação:

$$\gamma u^2 + 2\alpha u u' + \beta u'^2 = \epsilon$$

eq 1.59

sendo que a área é igual a $\epsilon\pi$.

Dizemos que ϵ é a emitância de um feixe. O conceito de emitância é muito importante em física de aceleradores, pois muitos dos parâmetros de feixe são calculados a partir dessa grandeza, como veremos mais adiante.

Qualquer que seja a distribuição das partículas de um feixe em um acelerador ela obedecerá a uma lei de conservação chamada de teorema de Liouville [12]. O teorema de Liouville diz que a área da elipse no espaço de fase é conservada, sejam quais forem as transformações que este feixe venha a enfrentar ao longo do acelerador (espaços livres, dipolos, quadrupolos, etc.). Para os eixos horizontal e vertical a emitância é dada geralmente em [mm.mrad]. Para o eixo longitudinal utilizaremos, nesse trabalho, [eV.graus].

A área do feixe só não é conservada quando existe aceleração das partículas. Neste caso a emitância do feixe diminui. Essa nova emitância (ϵ^*) pode ser determinada como:

$$\epsilon^* = (\gamma_E \beta_E) \epsilon$$

eq 1.60

onde β_E (já descrita anteriormente) e γ_E são as relações da relatividade especial:

$$\gamma_E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_E^2}} ; \beta_E = \frac{v}{c}$$

eq 1.61

Observação: Essa aparente violação do teorema de Liouville ocorre apenas porque usualmente não utilizamos variáveis canônicas para determinar o espaço de fase. Lembrando que x' é a razão do momento na direção x (p_x) com o momento na direção de propagação (p_z) e, como p_z está aumentando devido à aceleração, x' torna-se menor, diminuindo, portanto, a emitância horizontal (análogo para a emitância vertical).

No item 1.3.1, considerávamos a dinâmica de uma única partícula dentro do feixe. É possível utilizarmos o conceito de elipse do feixe para explorar a evolução de todas as partículas do feixe simultaneamente. Para isso, utilizamos a notação de Courant-Snyder [12]. Por simplicidade, será demonstrada a funcionalidade dessa notação apenas para o plano horizontal. Tomemos o vetor X , definido como:

$$X = \begin{bmatrix} x \\ x' \end{bmatrix}$$

eq 1.62

Podemos escrever a matriz T a partir dos parâmetros da elipse do feixe:

$$T = \begin{bmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{bmatrix}$$

eq 1.63

com $\text{Det}(T) = 1$. A equação da elipse (conhecida como invariância de Courant-Snyder) é então gerada por:

$$X'^T T^{-1} X = \varepsilon$$

eq 1.64

logo

$$\beta\gamma - \alpha^2 = 1$$

eq 1.65

A transformação dos parâmetros da elipse de uma posição 1 para uma posição 2 é dada por:

$$T_2 = M T_1 M^t ,$$

eq 1.66

onde M é a matriz do elemento (espaço livre, quadrupolo, solenóide, etc.) ou da resultante da associação desses elementos.

1.5 Elipse de aceitação longitudinal

No item 1.3.2, mostramos que, do ponto de vista da dinâmica longitudinal do feixe, um microtron pode ser considerado um sistema periódico cujos elementos podem ser representados por elementos equivalentes aos da dinâmica transversal. Assim, pudemos determinar qual é a fase referente ao potencial acelerador que permite às partículas serem aceleradas adequadamente.

Um outro conceito importante é o de elipse de aceitação da máquina, que nos dá informações sobre os limites das dimensões do pacote de elétrons que podem ser acelerados pelo microtron. Essas dimensões são as dispersões em fase e energia desse pacote.

Para calcularmos isso, partirmos da matriz de Twiss, que é definida como [14]:

$$M_{Twiss} = \begin{bmatrix} \cos \psi + \alpha \sin \psi & \beta \sin \psi \\ -\gamma \sin \psi & \cos \psi - \alpha \sin \psi \end{bmatrix} \quad \text{eq 1.67}$$

onde ψ é a rotação sofrida pela elipse ao longo da órbita na máquina. Igualando-se essa matriz àquela obtida no item 1.3.2 para o sistema periódico:

$$\begin{bmatrix} \cos \psi + \alpha \sin \psi & \beta \sin \psi \\ -\gamma \sin \psi & \cos \psi - \alpha \sin \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{l}{2f} & l - \frac{l^2}{4f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{l}{2f} \end{bmatrix} \quad \text{eq 1.68}$$

e, tomando por simplificação que $\alpha = 0$ (portanto assume-se uma elipse onde $\theta = 0$), teremos:

$$\begin{aligned} l &= \frac{v\lambda}{\gamma_o \cos \varphi} \\ \frac{1}{f} &= \gamma_o K \sin \varphi \\ \cos \psi &= 1 - \frac{1}{2} \frac{v\lambda}{\gamma_o \cos \varphi} \gamma_o \frac{2\pi}{\lambda} \sin \varphi \\ \cos \psi &= 1 - v\pi \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned}$$

eq 1.69

portanto

$$\psi = \arccos(1 - v\pi \operatorname{tg} \varphi)$$

eq 1.70

Por outro lado, como

$$\gamma = \frac{1}{\beta}$$

eq 1.71

para $\alpha = 0$, então

$$\gamma \sin \psi = \gamma_o \frac{2\pi}{\lambda} \sin \varphi$$

eq 1.72

$$\gamma = \gamma_o \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\sin \varphi}{\sin \psi}$$

eq 1.73

Dessa maneira, é possível calcularmos qual é a emitância de uma determinada configuração de máquina. Vejamos um exemplo numérico do microtron RTM1 do laboratório MAMI (*Mainzer Mikrotron* – Mainz, Alemanha) [15]:

$$\varepsilon = 1,2 \text{ keV.graus}$$

$$\varphi = 22^\circ$$

$$\Delta W = 0,598 \text{ MeV}$$

$$\lambda = 122,4 \text{ mm}$$

$$\nu = 1$$

Observações: A emitância longitudinal ε desse exemplo é obtida através da medida da dispersão de energia do feixe no linac que precede esse microtron. Portanto é necessário normalizá-la pela energia de repouso do elétron ($E_o = 511 \text{ keV}$). Além disso, pode ser mais conveniente convertermos a emitância para unidades da dinâmica transversal:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{E_o} \frac{\lambda}{360^\circ} = \frac{1,2 \text{ keV}}{511 \text{ keV}} \frac{1^\circ}{360^\circ} 122,4 \text{ mm} = 8 \times 10^{-4} \text{ mm.mrad}$$

$$\gamma_o = \frac{\frac{\Delta W}{\cos \varphi}}{E_o} = \frac{\frac{0,598}{\cos(22^\circ)}}{0,511} = 1,3$$

$$\psi = \arccos(1 - \pi \operatorname{tg}(22^\circ)) = 106^\circ$$

Com esses valores e utilizando a eq 1.73 é possível determinarmos as dimensões da elipse de aceitação da máquina de Mainz:

$$\gamma = \gamma_o \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = 1,3 \frac{2\pi}{122,4 \text{ mm}} \frac{\sin(22^\circ)}{\sin(106^\circ)} = 0,026 \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = \frac{1}{\gamma} = 38,5 \text{ mm}$$

$$a = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\beta} = 0,18 \text{ mm} \rightarrow 0,18 \text{ mm} \frac{360^\circ}{122,4 \text{ mm}} = 0,53^\circ$$

$$b = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\beta}} \right) E_o = 4,6 \times 10^{-3} \cdot 511 \text{ keV} = 2,4 \text{ keV}$$

Somente partículas que estejam contidas nessa elipse, serão aceleradas adequadamente pela máquina.

No próximo capítulo apresentamos os cálculos para o microtron do IFUSP juntamente com simulações realizadas em computador.

Capítulo 2

Etapa síncrona

2.1 Introdução

Neste capítulo são feitos os estudos do feixe na etapa síncrona, ou seja, na etapa onde os pacotes de elétrons são acelerados de tal forma a obedecer as duas condições de coerência descritas no capítulo anterior.

Um microtron na etapa síncrona pode ser esquematizado na figura 2.1. Como vimos, o microtron do tipo *race track* é composto de dois ímãs onde os elétrons realizam curvas de 180° em cada um (o desenvolvimento desses ímãs é feito, com mais detalhes, no capítulo seguinte). Vemos também a estrutura aceleradora que, no caso do microtron do IFUSP, opera a uma frequência de 2,45 GHz ($\lambda=12,24$ cm) e com ganho máximo de energia de 1,5 MeV [16]. A estrutura do IFUSP tem um comprimento de 104 cm.

figura 2.1 – Modelo simplificado do microtron na etapa síncrona

2.2 Cálculos preliminares

2.2.1 Condições de estabilidade

Como dito anteriormente, a circulação de elétrons em um microtron deve seguir as condições de aceleração síncrona:

$$\nu = \frac{2\pi}{c} \frac{\Delta W}{\lambda B}$$

eq 2.1

$$\mu = \frac{2\pi W_o}{c \lambda B} + \frac{2D}{\lambda}$$

eq 2.2

As equações acima formam um sistema linear de equações com as incógnitas sendo ΔW , D e B , uma vez que podemos assumir que a energia

inicial W_o está definida e que ν e μ devem assumir valores inteiros positivos. Como vimos no capítulo anterior, toma-se $\nu = 1$. Se supormos, inicialmente, que a distância D de separação dos eletroímãs é também um múltiplo inteiro de comprimentos de onda e, como μ pode assumir qualquer valor inteiro, podemos simplificar a eq 2.2:

$$\mu = \frac{2\pi R_o}{\lambda}$$

eq 2.3

onde R_o é o raio de curvatura na inserção e é dado como

$$R_o = \frac{W_o}{cB}$$

eq 2.4

Assumindo que a energia inicial seja 4,94 MeV (energia final do *booster* [5]) e atribuindo valores inteiros para μ , obtêm-se valores para R_o e conseqüentemente para B ; A tabela 2.1 apresenta esses valores:

μ	R_o (cm)	B (T)
3	5,8	0,2818
4	7,8	0,2113
5	9,7	0,1691
6	11,7	0,1409

tabela 2.1 – valores de raio inicial e campo magnético para diversos valores de μ

Com os valores da tabela acima e utilizando a eq 1.11, obtemos o valor do ganho de energia em função das outras variáveis:

μ	B (T)	ΔW (MeV por volta)
3	0,2818	1,66
4	0,2113	1,24
5	0,1691	0,99
6	0,1409	0,82

tabela 2.2 – valores de ganho de energia para diversos valores de B (com $\nu = 1$)

A escolha do modo de operação, isto é, a escolha do ganho de energia e do campo magnético é feita ponderando-se sobre a potência de RF necessária para executá-lo. O acelerador como um todo é alimentado por uma única válvula *Klystron* de potência nominal 50 kW. Inicialmente, o microtron principal foi projetado para ter um consumo de 13 kW para um ganho de energia de 0,9 MeV por volta e 28 voltas [17]. No total todos os dispositivos de RF consomem 42 kW. No entanto, recentes problemas causados no vácuo dessa válvula *Klystron* [18] reduziram a potência disponível para algo como 44 kW. Dessa forma, é mais conveniente adotarmos uma solução que tenha, em princípio, um consumo menor de potência de microondas para se adequar à presente realidade.

Assim adotamos que o ganho de energia na fase ressonante será de 0,82 MeV por volta e o campo magnético dos eletroímãs principais será de 0,1409 T.

2.2.2 Elipse de aceitação da máquina

Ao final do capítulo 1, apresentamos o conceito de elipse de aceitação do feixe. A seguir são apresentados os cálculos para o caso da etapa principal do microtron do IFUSP. Como visto no capítulo anterior, a fim de se obter uma solução estável, as partículas ao entrarem na estrutura aceleradora devem ter um atraso em fase, que no nosso caso, deve ser entre 0° e $32,48^\circ$ (para $\nu = 1$). Para esta primeira estimativa, utilizaremos a mesma fase de Mainz ($\varphi = 22^\circ$).

$$\varepsilon = 1 \text{ keV.graus}$$

$$\varphi = 22^\circ$$

$$\Delta W = 0,82 \text{ MeV}$$

$$\lambda = 122,4 \text{ mm}$$

$$\nu = 1$$

figura 2.2 - Elipse de aceitação longitudinal (teórica)

Dessa forma, vemos que o máximo desvio em fase admissível para uma partícula a ser acelerada com relação àquela com a fase nominal será de $\pm 0,41^\circ$ assim como o desvio máximo em energia será de $\pm 2,5 \text{ keV}$.

2.2.3 Dinâmica transversal

Na dinâmica transversal devemos cuidar para que o feixe de elétrons mantenha dimensões muito menores do que o diâmetro interno do tubo que transporta esse feixe. Nos capítulos 4 e 5 trataremos dos cálculos das linhas de transferência (inserção e extração) do microtron. Diferentemente do que ocorre em uma linha de transferência, onde existe uma relativa liberdade para se colocar lentes de forma a focalizar o feixe, em um microtron isso é muito restrito por causa de sua geometria hermética (a distância que separa dois canos de órbitas consecutivas dificulta a colocação de lentes corretoras).

A solução mais usada é a de se colocar dois dubletos de lentes quadrupolares na mesma linha da estrutura aceleradora, como mostrado na figura 2.1.

Um dubleto é definido como um par de quadrupolos idênticos, rotacionados de 90° um em relação ao outro (significa que um é focalizador e o outro desfocalizador para o mesmo plano), separados de uma distância l como mostrado na figura 2.3.

figura 2.3 - Esquema de um dubleto

Assim, utilizando a notação de matrizes abordada no capítulo anterior, podemos deduzir a matriz equivalente para um dubleto (por simplicidade demonstramos o cálculo apenas para um plano):

$$M_{Q1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 0 \end{pmatrix} \quad M_L = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_{Q2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 0 \end{pmatrix}$$

eq 2.5

$$Q_D = M_{Q2} M_L M_{Q1}$$

eq 2.6

$$Q_D = \begin{pmatrix} 1 - \frac{l}{f_1} & 0 \\ -\frac{1}{f_2} + \frac{l}{f_1 \cdot f_2} & 0 \end{pmatrix}$$

eq 2.7

Se os focos dessas lentes seguirem a relação $f_1 = -f_2 = f$ e se a distância focal for muito maior do que a distância l que as separa ($f \gg l$), então podemos escrever:

$$Q_D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 0 \end{pmatrix}$$

eq 2.8

Normalmente, ajustam-se os dubletos para que eles tenham uma distância focal de aproximadamente um quarto do comprimento da trajetória da primeira órbita [11].

2.3 Simulações da dinâmica longitudinal

Durante os cálculos preliminares assumimos, por simplicidade, que a distância entre eletroímãs era um múltiplo inteiro de comprimentos de onda. Em realidade, no entanto, deve-se ter em mente que os ímãs não possuem campos ideais e que uma parte da trajetória é feita fora dos limites físicos dos dipolos na presença dos campos de borda. Isso altera ligeiramente a distância

percorrida pelos elétrons em relação à trajetória ideal. Esse efeito é mais acentuado para os elétrons de energia mais baixa (por penetrarem menos nos eletroímãs), mas existe uma maneira de se minimizar esse efeito que será analisada no próximo capítulo. Assim, devem ser feitas simulações que levem em conta esse efeito do campo de borda, a fim de se otimizar a distância entre eletroímãs de tal forma a se obter uma solução estável.

Para essas simulações foi utilizado o programa PTRACE [19]. Esse programa foi desenvolvido especificamente para a simulação de trajetórias de elétrons em aceleradores do tipo microtron recirculado utilizando campos magnéticos realistas. Uma descrição detalhada sobre a estrutura do PTRACE pode ser encontrada em [5]. Basicamente, no PTRACE, devem-se descrever os parâmetros de cada elemento do microtron através de um arquivo texto. Além disso, é necessário descrever o estado inicial das partículas. O Apêndice A contém um arquivo de entrada do PTRACE, como exemplo.

2.3.1 Simulações com energia decrescente

Nas considerações sobre a estabilidade da máquina apresentadas no Capítulo 1, consideramos $\beta_E = 1$. Essa aproximação pode não ser necessariamente verdade, sobretudo nas primeiras voltas onde a energia é baixa. Dessa forma, obter uma solução estável pode ser muito difícil. Uma forma de sobrepujar esse problema é supor um ganho de energia negativo para o sistema (-0,820 MeV) e que a energia inicial (do ponto de vista das simulações) seja por volta de 38 MeV. Assim, partimos da energia máxima desejada e fazemos uma simulação de forma a descobrir a energia mínima na qual o sistema ainda se mantém estável (em geral quando a condição $\beta_E = 1$ deixa de ser satisfeita).

A figura 2.4 mostra o ganho de energia em função das voltas (para uma partícula localizada no centróide do feixe) rodando-se o PTRACE com a energia decrescente, após as otimizações necessárias. Na mesma figura é possível verificar que o ganho de energia deixa de ser linear a partir da volta de número 43. Isso também pode ser verificado na figura 2.5, que mostra a evolução da fase da partícula (com relação à fase da RF da estrutura) com as voltas. Nota-se que, a partir da volta 43, a fase assume um valor muito diferente da média (que esta por volta de 22°). O mesmo efeito pode ser observado na figura 2.6 que apresenta o ganho de energia em cada volta. Observe que a partir da volta 43 o ganho de energia assume um valor positivo [20].

figura 2.4 - Ganho de energia reverso em função das voltas

figura 2.5 - Fase da partícula em função das voltas

figura 2.6 - Ganho de energia em função das voltas

Um resultado importante dessa simulação reside no fato de que a energia da volta 43 é 2,5 MeV. Isso implica que a energia inicial do microtron poderia ser reduzida de 4,9 para 2,5 MeV sem que haja perda da estabilidade longitudinal.

No entanto, reduzir a energia de entrada em um microtron, se traduz na redução do raio inicial na volta de inserção (R_o). Deve se atentar para o fato de que a distância do eixo central da estrutura à primeira órbita não deve ser inferior a 10 cm (já considerando a tolerância para o tubo do feixe), ou seja, R_o não pode ser inferior a 5 cm ($2R_o > SO$), como pode ser visto esquematicamente na figura 2.7.

figura 2.7 - Esquema da volta de inserção

Se calcularmos o raio descrito por um elétron de 2,5 MeV submetido a um campo de 0,1409 T temos que $R_o = 5,9$ cm. O raio médio calculado pelo PTRACE (que leva em consideração o campo de borda) é $R_o = 6,14$ cm.

Portanto esse raio é suficiente para que essa opção possa ser implementada. A dificuldade, no entanto, é o projeto da linha de transferência para o microtron principal já que será necessário o desenho de um eletroímã com uma dimensão transversal próxima a SO . As discussões referentes aos projetos dessa linha e desse eletroímã são encontradas, respectivamente, nos capítulos 4 e 5.

2.3.2 Simulações com energia crescente

Ao simularmos no PTRACE o decréscimo de energia do feixe, isso nos determinou quais as condições iniciais que o feixe deve apresentar de forma a ser acelerado adequadamente. O próximo passo é a simulação do caso real, onde o feixe ganha energia. A figura 2.8 mostra a evolução da energia em função das voltas.

figura 2.8 - Energia do feixe em função das voltas

Como dito anteriormente, a fase da partícula com respeito à da RF deve estar entre 0 e $32,5^\circ$ para que se tenha uma solução estável. No entanto, para que seja possível acelerarmos o feixe no microtron principal a partir da energia de 2,5 MeV, devemos injetar o feixe com uma fase negativa (-60°), como pode ser visto na figura 2.9. Essa aparente discrepância pode ser explicada pelo fato de que o feixe injetado no principal não está ainda ultra-relativístico. No entanto, podemos notar que a partir da volta de número 5 (quando a energia do feixe alcança 6,6 MeV) o feixe entra em regime estável, com fase média de $21,4 \pm 2,4^\circ$.

figura 2.9 - Fase da partícula com relação à da RF em função das voltas

A figura 2.10 mostra o ganho de energia do feixe em cada volta. Note que, pelo mesmo motivo explicado anteriormente, o feixe ganha pouca energia na primeira volta (0,671 MeV) e, a partir da volta de número 5, entra em regime estável com ganho médio de energia de $0,825 \pm 0,013$ MeV.

figura 2.10 - Ganho de energia em cada volta

2.3.3 Tolerâncias para a dinâmica longitudinal

Utilizamos o PTRACE para levantar, empiricamente, a elipse de aceitação do microtron nessa nova configuração. Com isso objetivamos realizar o ajuste fino dos parâmetros do feixe de entrada (energia e fase) e também conhecer as tolerâncias, ou seja, quais os valores máximos permitidos de desvios na fase ($\Delta\phi$) e na energia (ΔE) para que possamos utilizar o feixe nessa nova configuração.

O PTRACE possui uma limitação de que apenas 10 partículas podem ser passadas em cada simulação. Dessas 10 partículas, apenas 9 são usadas para se calcular os desvios de fase, pois a primeira partícula é usada como guia e o cálculo de todas as outras é referenciado ao cálculo da primeira.

Dessa forma, usamos as partículas restantes para tentar encontrar os valores máximos dos desvios. Isso é feito observando a evolução dessas partículas com o passar das voltas, como pode ser visto na figura 2.11. Note que, neste exemplo, algumas dessas partículas não chegaram a ser aceleradas corretamente até à última volta.

figura 2.11 – Exemplo de evolução das partículas com desvios na fase e energia

Após muitas interações chegamos a um valor final para a elipse do feixe. Nessa nova configuração (que pode ser vista na figura 2.12) temos que os desvios máximos são ± 5 keV para a energia e $\pm 1,2^\circ$ para a fase. Os valores obtidos são, portanto, menos restritivos dos que aqueles estimados no item 2.2.2.

figura 2.12 - Elipse de aceitação do microtron principal

2.4 Simulação da dinâmica transversal

Como mencionado no item 2.2.3, de forma a garantir que o feixe mantenha suas características transversais, devemos dotar o microtron de lentes quadrupolares dispostas em forma de dubletos.

Nas simulações do PTRACE foi usada a abordagem de lentes finas para descrever esses elementos. O valor adotado para a distância focal f das lentes foi de 120 cm (o PTRACE usa todas as unidades de comprimento em cm).

Da mesma forma que nas simulações de dinâmica longitudinal, apenas 9 partículas (além da partícula guia) podem ser passadas por vez. Assim, devemos formar a elipse de aceitação simulando um quadrante por vez. As simulações indicam que o microtron principal pode aceitar um feixe de dimensões transversais 1 mm por 1 mrad como mostrado na figura 2.13.

figura 2.13 - Elipse de aceitação transversal do microtron principal

A figura 2.14 mostra a evolução das dimensões transversais do feixe (registradas sempre no espaço livre de retorno das partículas) com o passar das voltas.

Pode ser observado na mesma figura o efeito da perda do poder de focalização vertical do dubleto com o aumento da energia (isso é mostrado pelo aumento da amplitude das oscilações em y). Além disso, pode ser observada a diminuição da emitância com o aumento da energia. Para isso devemos comparar a diminuição das amplitudes de oscilações de x' e y' frente às amplitudes de x e y . A diminuição de x' e y' é muito mais acentuada que o aumento das amplitudes de x e y .

figura 2.14 - Dinâmica transversal do microtron principal em função das voltas

2.5 Sumário dos resultados da etapa síncrona

A tabela 2.3 resume os parâmetros principais, discutidos nesse capítulo.

Modo de operação: condição de coerência dinâmica – ν	1
Modo de operação: condição de coerência estática – μ	6
Distância entre eletroímãs (face a face) – L [cm]	256,65
Campo magnético dos ímãs – B [T]	0,1410
Ganho de energia nominal – ΔW [MeV]	0,82
Fase ótima de aceleração – φ (°)	22
Energia inicial – W_o [MeV]	2,498
Energia final – W [MeV]	38,02

tabela 2.3 - resumo dos parâmetros de operação do microtron principal

A tabela 2.4 mostra a fase, a energia, o ganho de energia, o raio de curvatura e a separação entre órbitas do feixe em função das voltas.

Volta	fase (graus)	ΔW (MeV)	Energia (MeV)	Raio (cm)	Separação entre órbitas (cm)
0	-59,9	-	2,498	6,14	-
1	-13,0	0,671	3,169	7,91	3,53
2	3,1	0,883	4,052	10,15	4,49
3	7,4	0,868	4,920	12,31	4,32
4	10,2	0,863	5,784	14,43	4,23
5	16,4	0,859	6,643	16,52	4,18
6	19,5	0,835	7,478	18,54	4,04
7	16,1	0,822	8,300	20,51	3,96
8	16,9	0,843	9,144	22,54	4,05
9	22,1	0,841	9,985	24,55	4,03
10	20,4	0,814	10,799	26,50	3,89
11	17,4	0,825	11,624	28,47	3,94
12	21,0	0,843	12,467	30,48	4,02
13	23,4	0,824	13,291	32,44	3,93
14	18,8	0,810	14,101	34,37	3,86
15	19,4	0,838	14,938	36,36	3,98
16	24,2	0,835	15,773	38,35	3,97
17	21,1	0,807	16,580	40,26	3,83
18	18,7	0,826	17,407	42,23	3,93
19	22,9	0,840	18,247	44,22	3,99
20	23,5	0,816	19,063	46,16	3,88
21	19,0	0,813	19,875	48,09	3,86
22	20,9	0,839	20,714	50,08	3,98
23	24,8	0,829	21,543	52,04	3,93
24	20,4	0,805	22,348	53,95	3,82
25	19,4	0,832	23,180	55,92	3,94
26	24,3	0,837	24,017	57,91	3,97
27	22,6	0,809	24,826	59,83	3,84
28	19,1	0,819	25,646	61,77	3,88
29	22,4	0,839	26,485	63,76	3,98
30	24,6	0,821	27,306	65,70	3,89
31	19,7	0,808	28,114	67,62	3,83
32	20,4	0,836	28,950	69,60	3,96
33	25,0	0,833	29,783	71,57	3,95
34	21,4	0,805	30,588	73,48	3,81
35	19,3	0,827	31,415	75,44	3,92
36	23,8	0,839	32,254	77,42	3,97
37	23,6	0,813	33,067	79,35	3,85
38	19,3	0,814	33,881	81,28	3,86
39	21,7	0,839	34,719	83,26	3,97
40	25,1	0,826	35,545	85,22	3,91
41	20,3	0,805	36,350	87,12	3,81
42	20,0	0,834	37,184	89,10	3,95
43	24,9	0,836	38,019	91,08	3,96

tabela 2.4 – Fase, energia, ganho de energia, raio de curvatura e separação entre órbitas em função das voltas

Capítulo 3

Projeto dos ímãs principais

3.1 Introdução

A construção do microtron principal envolve a produção de 6 famílias de eletroímãs dipolares:

- 1A/1B - Magnetos para extração da linha de 4,9 (ou 2,5) MeV e inserção no microtron principal (15°);
- 2A/2B - Magnetos principais do microtron (180°);
- 3A/3B - Steerings de correção horizontal ($\sim 3^\circ$);
- 4 - Magneto de extração I (10°);
- 5 - Magneto de extração II (25°);
- 6 - Magneto de inserção na linha principal (35°).

A figura 3.1 mostra esquematicamente a localização desses elementos.

figura 3.1 - Magnetos que compõem o microtron principal

Este capítulo é dedicado à descrição do desenvolvimento do projeto dos eletroímãs principais. Os outros eletroímãs, destinados à inserção e à extração do feixe no microtron principal, são descritos no capítulo 5.

3.2 Pré-projeto dos eletroímãs

Ao longo do desenvolvimento do acelerador microtron do IFUSP, foi feito um pré-projeto dos ímãs principais, que é descrito no artigo da Dra. L. R. P. Kassab [22]. Nesse artigo é descrito o projeto de eletroímãs cuja operação se dava para um feixe de energia inicial 5,1 MeV e com ganho de energia por volta de 0,93 MeV. Nessas condições, era necessário que o feixe

figura 3.3 - Modificações no pré-projeto principal. No detalhe as faces polares não paralelas.

A figura 3.4 mostra a comparação da distribuição de campo entre os dois ímãs (note que a escala das ordenadas corresponde a uma variação de apenas 1,5%). Podemos notar que houve uma sensível melhora na uniformidade de campo nesse novo modelo.

figura 3.4 - Comparação da distribuição de campo entre o ímã antigo e o novo. O campo magnético aparece de forma normalizada e a linha vertical verde indica o limite da face polar.

3.3 Projeto dos eletroímãs

3.3.1 Simulações em 2D

Devido à redução da energia de inserção no microtron principal [5] segundo o projeto original [1], o ganho de energia por volta também foi reduzido a fim de respeitar as condições de estabilidade descritas no capítulo 1. Na atual configuração, ao final de 28 voltas (como era previsto inicialmente) a energia final do feixe ficaria em torno de 28 MeV. Era desejado, pela comunidade de usuários do acelerador, aumentar a energia final. No entanto, aumentar a energia final significa aumentar o magneto.

Como vimos no capítulo anterior, para uma energia final de 38 MeV, os elétrons descrevem uma trajetória no interior do magneto com raio de 92 cm aproximadamente. Vale ressaltar que a linha de feixe, posterior ao principal, tem capacidade de trabalhar com esse feixe mais energético.

Com base no pré-projeto descrito no item anterior, e novamente com a ajuda do programa FEMM, fizemos as modificações necessárias para que o magneto tivesse as características descritas acima. Algumas outras modificações foram introduzidas na geometria do eletroímã visando melhorar ainda mais a uniformidade de campo ou solucionar problemas de saturação magnética em algumas regiões do eletroímã.

O *gap* desse eletroímã foi definido de tal forma a permitir a colocação de uma câmara de vácuo cujas paredes (feitas de um material não-magnético, preferencialmente de uma liga de alumínio tipo Dural) devem ser relativamente grossas, a fim de suportar a pressão atmosférica com o mínimo de deformação das tampas superior e inferior, garantindo um espaço adequado para a passagem do feixe.

A figura 3.5 mostra a geometria do novo magneto e as figura 3.6a-d mostram a distribuição de campo desse magneto. Ressaltamos que esse magneto possui uma uniformidade de campo de 10^{-3} [24].

figura 3.5 - Geometria do novo magneto (cotas em cm)

figura 3.6 - Distribuição de campo magnético do eletroímã principal. (a) em toda a geometria, (b) campo de borda, (c) região das faces polares e (d) região das faces polares em detalhe.

O efeito da não uniformidade de campo no feixe de elétrons é muito importante e pode ser avaliado a partir da condição de coerência dinâmica:

$$\nu = \frac{2\pi}{c} \frac{\Delta W}{\lambda B}$$

eq 3.1

Dessa forma, pode-se ver que a não uniformidade de campo provoca a perda da proporcionalidade entre o período de revolução e o ganho de energia. Podemos escrever uma expressão que relaciona a variação do comprimento da trajetória ΔL com a variação do campo magnético ao longo do ímã ΔB . Sabe-se que o comprimento da trajetória do feixe em um ímã de 180° , no caso ideal, ou seja, sem campo de borda, é dado por $L = \pi R$, onde o raio descrito é função do campo magnético em cada ponto, ou seja:

$$\frac{dL}{dB} = \pi \frac{dR}{dB}$$

eq 3.2

$$\Delta L = \pi \frac{dR}{dB} \Delta B$$

eq 3.3

Podemos reescrever a derivada da equação eq 3.3, utilizando a expressão que relaciona o raio de uma partícula carregada sob a ação de um campo magnético:

$$R = \frac{p}{eB}$$

eq 3.4

$$\frac{dR}{dB} = -\frac{p}{eB^2} = -\frac{R}{B}$$

eq 3.5

substituindo na eq 3.3

$$\Delta L = -\frac{\pi R}{B} \Delta B$$

eq 3.6

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\Delta L}{\pi R} = -\frac{\Delta L}{L}.$$

eq 3.7

Podemos relacionar o comprimento da trajetória com o comprimento de onda da RF:

$$\frac{L}{\theta_{RF}} = \frac{n\lambda}{360^\circ},$$

eq 3.8

onde θ_{RF} é a fase equivalente da RF. Dessa forma, podemos escrever a variação da trajetória ΔL em termos da variação de fase $\Delta\theta_{RF}$:

$$\frac{\Delta L}{\Delta \theta_{RF}} = \frac{\lambda}{360^\circ},$$

eq 3.9

substituindo na eq 3.7

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\lambda_{RF}}{\pi R} \frac{\Delta \theta_{RF}}{360^\circ}.$$

eq 3.10

A eq 3.10 nos dá, portanto, a relação entre a uniformidade do campo magnético $\left(\frac{\Delta B}{B}\right)$ e o desvio máximo da fase em relação à fase da microondas $\Delta \theta_{RF}$. Além disso, pode-se observar que a qualidade de campo deve ser tanto melhor quanto maior for o raio da trajetória. Assim sendo, podemos calcular, para o microtron do IFUSP, qual deve ser a qualidade de campo:

$$\left[\begin{array}{l} \lambda = 122,4 \text{ mm} \\ R = 92 \text{ cm} \\ \Delta \theta_{RF} = 2^\circ \end{array} \right] \frac{\Delta B}{B} \approx 2 \times 10^{-4}.$$

Como visto na figura 3.6, a qualidade de campo desse eletroímã é de aproximadamente 10^{-3} . Em uma primeira avaliação poderíamos pensar que o ímã desenhado não atende às especificações de qualidade de campo. No entanto, a qualidade de campo necessária pode ser atingida utilizando-se bobinas corretoras, como é descrito em [25]. Naquele trabalho conseguiu-se uma qualidade de campo de 4×10^{-5} , em uma área de $\sim 0,2 \text{ m}^2$.

A figura 3.7 mostra a distribuição do campo magnético no interior do eletroímã. Podemos ver que dentro do eletroímã o módulo do campo se mantém menor que 2,2 T, abaixo, portanto, do ponto de saturação do material.

figura 3.7 - Distribuição do campo magnético no interior do eletroímã

3.3.2 Simulação em 3D

Como descrito no item anterior, a uniformidade de campo nesse magneto é extremamente importante e tem influência direta nas condições de estabilidade longitudinal do feixe. Assim sendo, é necessário levar em consideração a uniformidade de campo em todas as direções, realizando o cálculo do campo magnético gerado por esse ímã em 3D.

Existem várias ferramentas para a realização desse tipo de cálculo. Em sua maioria são programas comerciais muito caros. O Instituto de Física da Universidade de São Paulo não tem nenhuma licença disponível para os programas comerciais. Uma solução seria utilizarmos o RADIA [26] que é um código de licença livre que roda dentro do ambiente do Mathematica[®] [27].

O problema com o RADIA é a limitação em termos da precisão de cálculo, sobre tudo para um ímã grande como é o caso dos ímãs do principal. Além disso, para se obter uma precisão razoável com RADIA, seria necessário um número muito grande de subdivisões desse ímã e isto acaba sendo limitado pela quantidade de memória disponível. O uso do RADIA é recomendado quando se está trabalhando com ímãs permanentes (caso dos dispositivos como os onduladores) ou com ímãs relativamente pequenos. Ainda assim o Radia tem uma precisão de cálculo de 10^{-3} .

Com a colaboração do grupo da Universidade Johannes Guttenberg de Mainz, Alemanha, foi possível realizar a simulação desse magneto em 3D utilizando o programa comercial OPERA 3D[®] [28].

A figura 3.8 mostra a distribuição do módulo do campo magnético na região do ferro, simulado com o OPERA 3D. Note que esse eletroímã não apresenta nenhum ponto de saturação, estando, portanto, adequado à operação.

figura 3.8 - Magneto principal modelo com o OPERA 3D

A figura 3.9 mostra a distribuição da componente B_y do campo magnético na região de interesse no plano médio desse eletroímã.

figura 3.9 – Resultado da simulação em 3D para a componente B_y do campo magnético na região de interesse

Como pode ser visto na figura 3.9, a extensão da região de interesse na direção z vai de -100 a 100 cm, sendo que o campo ao longo desse eixo possui uma uniformidade de 2×10^{-3} como pode ser visto, com mais detalhes, na figura 3.10. Deve-se lembrar que essa uniformidade é sem o uso das bobinas corretoras descritas anteriormente. Sendo assim, com base nesse resultado obtido com o OPERA 3D, esse ímã pode ser considerado bastante adequado para a operação do acelerador.

figura 3.10 - Detalhe da distribuição da componente B_y do campo magnético (normalizado) ao longo do eixo z para diversas posições de x .

3.4 Uso de *Clamps*

No capítulo 1 foram mostradas as condições de coerência visando à estabilidade da máquina. No entanto, todos os cálculos feitos levam em consideração que o ímã não possui campo de borda, seguindo uma distribuição de campo ideal, como visto na figura 3.11.

Uma maneira de minimizar esse problema, proposta inicialmente por H. Babić e M. Sedlaček em 1967 [29], é a introdução de pólos auxiliares com campos reversos, chamados de *clamps*. A idéia por trás do uso de *clamps* é minimizar a integral de campo ao longo da trajetória das partículas na região do campo de borda. Para isso é introduzida uma pequena região onde o campo é negativo, de tal forma que a soma dessa área com a área do campo de borda do eletroímã se cancela, aproximando-se da distribuição ideal. A figura 3.12 mostra exemplos de trajetórias de um elétron em um ímã que não possui *clamps*, com *clamps* e, finalmente, a trajetória de um elétron em um campo ideal.

figura 3.11 - Distribuição de campo com e sem *clamp* e no caso de um ímã ideal

figura 3.12 - Exemplos de trajetórias no plano xz de um ímã: 1) sem o uso de *clamps* 2) com o uso de *clamps* e 3) trajetória de um ímã ideal [29]

Em termos práticos, os campos dos *clamps* podem ser ajustados, durante a operação da máquina, para corrigir eventuais erros da distância D entre os ímãs, cometidos durante o posicionamento desses no suporte.

3.5 Projeto mecânico

A massa estimada do eletroímã projetado é de aproximadamente 14 toneladas. O Laboratório do Acelerador Linear não tem infra-estrutura para movimentar massas e volumes relativamente grandes. A ponte rolante existente no prédio onde estará localizado o microtron, tem uma carga máxima de operação 2 t. Assim, o projeto mecânico dos ímãs deve levar em conta essas dificuldades de transporte dentro do prédio.

A solução encontrada foi a de dividir o eletroímã em diversas “fatias” de 214 cm de comprimento com largura e altura variáveis, de tal forma que cada “fatia” tenha uma massa máxima de 1 tonelada. Assim é possível transportar individualmente cada parte e montar o eletroímã em seu suporte. A figura 3.13 mostra essa divisão.

figura 3.13 - Divisão mecânica do magneto

É importante salientar que a região da face polar é feita em uma única peça que deverá ter sua face voltada à região de interesse retificada minimizando, assim, a não uniformidade de campo devido a imperfeições na etapa de usinagem. A figura 3.14 mostra uma visão artística do magneto montado.

figura 3.14 – Visão artística do magneto montado

No Apêndice B são encontrados os desenhos mecânicos detalhados referentes a este magneto.

3.6 Projeto da bobina

Um dos aspectos importantes para o correto funcionamento deste dipolo é o projeto das bobinas. O projeto deve contemplar não apenas os aspectos elétricos, mas também aqueles referentes à refrigeração das mesmas.

3.6.1 Projeto elétrico

Esse ímã funcionará com dois pares de bobinas “gêmeas”: 1 par para o ímã em si e outro para os *clamps*. As áreas adotadas nas simulações (que são mostradas na figura 3.15) correspondem ao espaço máximo disponível para os condutores, levando em consideração também a isolação.

figura 3.15 - Secções retas das bobinas utilizadas nas simulações (unidades em mm)

Optamos por fazer essas bobinas com condutores vazados, que são normalmente utilizados quando se deseja fazer refrigeração a água. Tal escolha é justificada pela geometria do ímã, que encobre uma grande parte da bobina, tornando-a inacessível do ponto de vista da troca de calor. Além disso, com refrigeração a água, pode-se utilizar densidades de correntes mais elevadas quando comparadas com condutores usados convencionalmente em, por exemplo, transformadores, onde a densidade de corrente máxima recomendada é de aproximadamente 2 A/mm^2 .

Diferentemente dos condutores convencionais, que normalmente possuem uma camada de esmalte isolante, os condutores vazados não têm qualquer isolamento. Sendo assim, é necessário providenciar esse isolamento no momento de construção dessas bobinas. O esquema de isolamento desses condutores pode ser visto na figura 3.16.

figura 3.16 - Esquema de isolamento de condutores vazados

A isolamento é feita em duas etapas: um conjunto de cintas de material plástico envolve cada condutor com espessura total de 0,5 mm (indicado na figura 3.16 em azul) e ao final, uma camada de material epóxi com 1 mm de espessura, que tem por finalidade reforçar a isolamento e dar resistência mecânica à bobina (indicada em verde na mesma figura).

Por causa da isolamento, a área útil de uma bobina tem cada uma das dimensões reduzidas que depende basicamente da quantidade de condutores nessas direções. Em adição a isso, devemos reduzir 1 mm de cada lado (na direção horizontal) para a instalação da bobina no magneto

Os condutores vazados geralmente são feitos sob encomenda. Portanto, em princípio, pode-se obter qualquer medida para as dimensões dos condutores e, conseqüentemente, qualquer número de espiras n . No entanto n deve ser escolhido de forma cuidadosa, de tal forma a fornecer um número razoável de condutores em cada. A escolha final pode ser feita levando em consideração outros aspectos, como facilidade de refrigeração ou característica elétrica da fonte de alimentação. A tabela 3.1 apresenta as dimensões dos condutores em função do número de espiras, considerando o esquema de isolamento descrito acima.

Dimensões dos condutores				
n	V	H	V	H
2	35,5	22,0	23,0	9,5
3	23,3	14,3	15,0	6,0
4	17,3	10,5	11,0	4,3
5	13,6	8,2	8,6	3,2
6	11,2	6,7	7,0	2,5
7	9,4	5,6	5,9	2,0
8	8,1	4,8	5,0	1,6

tabela 3.1 – Dimensões dos condutores em função do número de espiras (medidas em mm)

Como mencionado anteriormente, os condutores podem ser fabricados sob medida. No entanto, existem algumas empresas que possuem valores pré-definidos. Como exemplo, vamos dimensionar as bobinas para os condutores com as dimensões pré-definidas da empresa Outokumpu Poricopper Oy [30]. Arbitrariamente, escolheram-se condutores cujas dimensões principais são ilustradas pela figura 3.17:

Bobina	A	B	Ø	R _i
Principal	11,0	8,0	4	2
Clamp	7,0	6,0	4	1

tabela 3.2 - Dimensões dos condutores escolhidos (medidas em mm)

figura 3.17 - Dimensões dos condutores

Isso implica que cada uma das bobinas principais (inferior e superior) terá 5 condutores no sentido horizontal e 6 no vertical. Ao invés de uma única bobina com 6 espiras no sentido vertical, serão construídas 2 bobinas com 3 espiras cada. Assim é possível realizar a instalação dessas bobinas com o magneto montado, passando a bobina por entre as faces polares. Já as bobinas do *clamp* podem ser construídas em um único bloco com 3 no sentido horizontal por 6 no vertical.

A secção de cobre desses condutores é dada por:

$$S = A.B + R_i^2(\pi - 4) - \frac{\pi}{4} \frac{\pi}{4}$$

eq 3.11

portanto, cada condutor escolhido terá uma secção de:

$$\begin{aligned} S_{\text{Principal}} &= 72,0 \text{ mm}^2 \\ S_{\text{Clamp}} &= 28,6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

A densidade de corrente é dada por:

$$J = \frac{(I/2N)}{S}$$

eq 3.12

onde I é a corrente total definida por [12]:

$$I = \frac{Bh}{\mu_o}$$

eq 3.13

sendo B é o campo magnético desejado, h é a distância entre as faces polares (também chamado de *gap*) e μ_o é a permeabilidade magnética do ar, cujo valor no SI é $4\pi \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$.

Teremos as seguinte densidades de corrente:

Bobina	$I/2$ (A)	J (A/mm ²)
Principal	4500	2,1
Clamp	2350	4,6

tabela 3.3 - Densidade de corrente das bobinas

Com base nos valores calculados até agora, pode-se dimensionar a fonte necessária para alimentar cada uma das bobinas. A resistência elétrica de cada bobina (R_e), a corrente (I_f) a tensão (V_f) e a potência (P_f) são definidas como:

$$R_e = N \frac{\rho L_b}{S}$$

eq 3.14

$$I_f = \frac{I/2}{N}$$

eq 3.15

$$V_f = 2.R.I_f$$

eq 3.16

$$P_f = V_f.I_f$$

eq 3.17

onde L_b é o perímetro médio da bobina, N é o número total de espiras em cada bobina, S é a área da secção reta de cobre do condutor e ρ é a resistividade do material (para o cobre temos $\rho_{cu} = 1,725 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ a 27°C [31]). As equações 3.15 e 3.16 assumem que as bobinas superior e inferior de cada tipo estão conectadas em série. A tabela 3.4 resume as principais características elétricas dessas bobinas.

	Bobinas principais	Bobinas do <i>clamp</i>
R_e (mΩ)	(2x) 46,3	(2x) 47,9
I_f (A)	150,0	130,6
V_f (V)	13,9	12,5
P_f (W)	2083	1634

tabela 3.4 – Resumo das características elétricas das bobinas

3.6.2 Refrigeração

Como dito anteriormente, para garantir um bom funcionamento desse magneto, as bobinas serão refrigeradas a água. Faz-se necessário, portanto, calcular os aspectos hidráulicos [32] envolvidos na sua operação. Inicialmente calculamos a vazão (q) necessária para o resfriamento das bobinas:

$$q[\text{l/s}] = \frac{0.24 \times 10^{-3}}{N_c} \frac{P[\text{W}]}{\Delta T[^\circ\text{C}]}$$

eq 3.18

onde P é a potência dissipada por tipo de bobina (principal ou *clamp*), ΔT é o incremento máximo de temperatura permitida (considerou-se um incremento de 15 °C, o que é razoável do ponto de vista de operação desse magneto) e N_c é o número de circuitos (4 para as bobinas principais e 2 para as bobinas do *clamp*). A velocidade de escoamento do fluido é dada por:

$$v[\text{m/s}] = \frac{q[\text{l/s}]}{\left(\frac{\pi}{4} (\varnothing[\text{mm}])^2\right)} 10^3$$

eq 3.19

onde $\varnothing$ é o diâmetro do furo do condutor. A queda de pressão necessária para a refrigeração é dada por [32]:

$$\Delta P_r[\text{bar}] = 7,65 \cdot 10^{-5} \frac{(v[\text{l/s}] \cdot 10^{-3})^{1,75}}{(\varnothing[\text{mm}] \cdot 10^{-3})^{4,75}} L_T[\text{m}]$$

eq 3.20

onde L_T é o comprimento total de cada circuito de refrigeração. A tabela 3.5 resume os resultados desses cálculos para cada tipo de bobina.

	Bobinas principais	Bobinas do <i>clamp</i>
Número de circuitos	4	2
Comprimento de cada circuito [m]	96,6	79,4
ΔT de operação [°C]	15	15
Vazão de cada circuito [(10 ⁻³)l/s]	8,3	13,1
Vazão total [l/min]	2,0	1,6
Velocidade de escoamento [m/s]	0,7	1,0
Queda de pressão [bar]	2,3	4,2

tabela 3.5 – Resumo dos cálculos referentes à refrigeração

A queda de pressão para a bobina do *clamp* é um pouco grande para os padrões do sistema de refrigeração já instalado no prédio do acelerador. É desejável ter uma queda de pressão por volta de 2,5 bar. Para se resolver esse problema, podemos aumentar o diâmetro do orifício do condutor (partindo para

a opção de um fio fabricado sob medida). Assim, se aumentarmos o diâmetros de 4 mm para 5 mm temos que a queda de pressão é por volta de 2,4 bar.

A escolha final das dimensões dos condutores deverá ser feita levando-se em consideração os custos de fabricação das bobinas contra o preço das fontes de corrente, uma vez que, se aumentarmos o diâmetro do furo a fim de se diminuir a queda de pressão, a densidade de corrente aumenta, aumentando, portanto, a corrente.

3.7 Outros problemas relacionados aos ímãs principais

Como dito anteriormente, os ímãs principais foram divididos em camadas, de tal forma a minimizar os problemas com transporte dentro do prédio do acelerador.

Um outro detalhe importante é o posicionamento dos dipolos dentro do prédio. Originalmente os magnetos eram posicionados em um lugar diferente do que foi apresentado nesse trabalho. Situavam-se mais perto da válvula *Klystron*. A mudança de posição sugerida nesse trabalho tem duas finalidades: a) espaço livre entre a válvula *Klystron* e o magneto a fim de permitir uma melhor circulação de pessoal e equipamento; b) melhor estrutura física do prédio para agüentar o peso desses magnetos. Para esse último, em particular, foi feita uma consulta com o departamento de construção civil da USP, que constatou que os magnetos, por causa de sua massa (14 toneladas cada) não podem ser sustentados pelo piso, podendo causar sérios problemas estruturais ao prédio. Por causa disso, os ímãs deverão ter seus suportes instalados sobre vigas de aço (com cerca de 70 cm de largura e 4 m de comprimento) que estarão apoiadas sobre as vigas de concreto do próprio prédio.

Numa etapa posterior, quando o microtron já estiver em operação, um estudo sobre os efeitos das vibrações dos magnetos no feixe deve merecer especial atenção. As vibrações provêm de muitas fontes: ar-condicionado do edifício, movimentos do solo, tráfego de carros e caminhões nas ruas próximas ao acelerador, obras civis e fontes de alimentação. No acelerador de Mainz era possível observar nos monitores de posição, instalados em um de seus estágios, vibrações (na casa dos 50 Hz) suficientemente grandes para perturbar a qualidade do feixe. A solução encontrada foi de instalar placas de ferro lateralmente aos ímãs e fixadas ao solo, de tal maneira a mudar os modos de vibração desses magnetos. Essa solução, em princípio simples, amortizou bastante bem essas vibrações.

Outro ponto importante é quanto ao alinhamento dos magnetos. O suporte dos magnetos deverá, além de sustentar a massa de 14 toneladas, permitir que se faça o alinhamento de cada um dos magnetos com 6 graus de liberdade (3 translacionais e 3 rotacionais).

Capítulo 4

Projeto das linhas de inserção e extração

4.1 Introdução

Neste capítulo, apresentamos os projetos óticos para as linhas de inserção e extração do microtron principal. São apresentados dois projetos para a inserção: um para a nova energia de entrada de 2,5 MeV e um outro para 4,9 MeV.

Os projetos dessas linhas foram realizados utilizando o formalismo matricial apresentado no capítulo 1. Para isso, optou-se por desenvolver um pacote de ferramentas e funções especiais escritas em linguagem MATLAB® [33]. Diferentemente da maioria dos programas de ótica de feixe que utilizam o conceito de envelope (tais como TRANSPORT [34] ou MAD [35]), essas ferramentas desenvolvidas para MATLAB trabalham diretamente com a elipse de feixe segundo os parâmetros de Courant-Snyder. Dessa forma, é possível ter uma noção mais completa dos efeitos que os elementos da linha provocam no feixe, comparando as elipses de feixe (reconstruídas a partir dos coeficientes) ponto a ponto. A descrição desse pacote bem como as listagens de cada uma das ferramentas e funções são apresentadas no apêndice C.

4.2 Linha de inserção a 2,5 MeV

Como vimos no capítulo 2, o microtron principal pode ser operado partindo de um feixe com energia igual a 2,5 MeV. Essa solução permite eliminarmos o microtron *booster*, facilitando a operação da máquina como um todo. Para que essa nova configuração seja viável, é necessário utilizarmos a estrutura do *booster* como uma terceira estrutura a compor o injetor. Assim, a energia do feixe, que ao final da segunda estrutura está por volta de 1,8 MeV, passaria aos 2,5 MeV necessários ao final da terceira estrutura. Utilizando-se o código PARMELA [36], foi simulado novamente o injetor nessa nova configuração. Não fazem parte desse trabalho as simulações relativas ao injetor. No entanto, deve-se esclarecer que, por segurança, utilizou-se como emitância inicial no catodo o valor de 4 mm.mrad [37]. Esse valor é muito maior do que as emitâncias típicas de catodos termiônicos, que estão por volta de 2 mm.mrad [38].

Assim, o ponto de partida para o projeto da linha de inserção do feixe no microtron principal é o feixe logo após a saída da terceira estrutura. A figura 4.1 mostra, no formato típico do PARMELA, o resultado da simulação nesse ponto. Nessa figura, os números representam a quantidade de partículas (de um total que é escolhido pelo usuário do programa) com as mesmas características de

dimensão transversal (eixo das abscissas com a escala superior) e divergência (eixo das ordenadas com a escala da esquerda). Pode-se perceber, portanto, que o feixe tem a maioria de suas partículas concentradas numa elipse de $\pm 0,3 \text{ mm} \times \pm 0,5 \text{ mrad}$ (tanto na horizontal, x , como na vertical, y). No entanto, por segurança, para as simulações e projeto da linha de inserção no principal adotamos um feixe inicial de dimensões máximas $0,8 \text{ mm} \times 0,8 \text{ mrad}$.

figura 4.1 – Dados de saída do PARMELA após a terceira estrutura

Usando o pacote de ferramentas criadas para o MATLAB projetamos a linha de inserção vista na figura 4.2, tomando o cuidado de manter o feixe com dimensões transversais menores do que o tubo de transporte do feixe (que tem raio de 7 mm). Nessa mesma figura pode ser visto um símbolo (2 círculos concêntricos) que representa um dos pontos de referência usados no alinhamento das partes do acelerador. Também pode ser vista a estrutura aceleradora do *booster* sendo usada como parte do acelerador linear.

A tabela 4.1 mostra a lista dos elementos que compõem a linha de inserção no microtron principal. A lista, bem como os valores dos parâmetros de cada elemento, foram extraídos do arquivo usado para simular essa linha no MATLAB. A listagem desse arquivo encontra-se no apêndice D.

Número do elemento	Tipo de elemento ¹	ID MATLAB	Comprimento ² (m)	Distância focal (m)	Campo magnético (T)	Ângulo de curvatura (°)	Raio de curvatura (m)	Ângulo de entrada (°)	Ângulo de saída (°)
1	L	L1	1,0000	-	-	-	-	-	-
2	Q	Q1	0,1000	5,0	-	-	-	-	-
3	L	L2	0,3000	-	-	-	-	-	-
4	D	D	-	-	-	45	0,1637	0	0
5	L	LD	0,1000	-	-	-	-	-	-
6	Q	QD1	0,0500	-3,5	-	-	-	-	-
7	L	LD	0,1000	-	-	-	-	-	-
8	D	D	-	-	-	45	0,1637	0	0
9	L	L3	0,1380	-	-	-	-	-	-
10	Q	Q2	0,1000	2,7	-	-	-	-	-
11	L	L4	0,2000	-	-	-	-	-	-
12	Q	Q3	0,1000	3,0	-	-	-	-	-
13	L	L4	0,2000	-	-	-	-	-	-
14	Q	Q4	0,1000	-5,5	-	-	-	-	-
15	L	L3	0,1380	-	-	-	-	-	-
16	D	D	-	-	-	45	0,1637	0	0
17	L	LD	0,1000	-	-	-	-	-	-
18	Q	QD2	0,0500	-3,5	-	-	-	-	-
19	L	LD	0,1000	-	-	-	-	-	-
20	D	D	-	-	-	45	0,1637	0	0
21	L	L5	0,3000	-	-	-	-	-	-
22	Q	Q5	0,1000	2,0	-	-	-	-	-
23	L	L6	0,2000	-	-	-	-	-	-
24	Q	Q6	0,1000	-2,6	-	-	-	-	-
25	L	L7	0,2000	-	-	-	-	-	-
26	Q	Q7	0,1000	-4,0	-	-	-	-	-
27	L	L8	0,3000	-	-	-	-	-	-
28	Q	Q8	0,1000	4,0	-	-	-	-	-
29	L	L9	0,5000	-	-	-	-	-	-
30	S	S1	0,3000	-	0,052	-	-	-	-
31	L	L10	1,0000	-	-	-	-	-	-
32	S	S2	0,3000	-	-0,052	-	-	-	-
33	L	L11	1,0000	-	-	-	-	-	-
34	Q	Q9	0,1000	6,0	-	-	-	-	-
35	L	L12	0,2286	-	-	-	-	-	-
36	D	D3	-	-	-	-10	0,573	10	10
37	L	L13	0,4934	-	-	-	-	-	-
38	Q	Q10	0,1000	6,0	-	-	-	-	-
39	L	L14	0,4934	-	-	-	-	-	-
40	S	S3	0,3000	-	0,04	-	-	-	-
41	L	L15	0,4934	-	-	-	-	-	-
42	S	S4	0,3000	-	-0,04	-	-	-	-
43	L	L16	0,4934	-	-	-	-	-	-
44	S	S5	0,3000	-	0,04	-	-	-	-
45	L	L17	0,4934	-	-	-	-	-	-
46	S	S6	0,3000	-	-0,04	-	-	-	-
47	L	L18	1,2868	-	-	-	-	-	-
48	D	D4	-	-	-	-160	0,061405	-10	-10
49	L	L19	0,3477	-	-	-	-	-	-
50	D	D5	-	-	-	-10	0,573	10	10
51	L	L20	0,3000	-	-	-	-	-	-
52	S	S8	0,3000	-	0,051	-	-	-	-
53	L	L21	1,0000	-	-	-	-	-	-
54	S	S9	0,3000	-	-0,03	-	-	-	-
55	L	L22	0,7249	-	-	-	-	-	-
56	D	D6	-	-	-	-180	0,061405	0	0
57	L	LRPA	0,4843	-	-	-	-	-	-
58	Q	QRPA	0,0500	-2,9	-	-	-	-	-
59	L	LRPB	0,2000	-	-	-	-	-	-
60	Q	QRPB	0,0500	2,6	-	-	-	-	-
61	L	LRPC	0,2000	-	-	-	-	-	-

tabela 4.1 – Lista de elementos que compõem a linha de inserção (E=2,5 MeV) no microtron principal

¹ L= espaço livre, D=dipolo, Q=quadrupolo, S=solenóide

² comprimentos efetivos para solenóides e quadrupolo

Por causa da baixa energia do feixe, o emprego de solenóides para focalização é eficiente, diminuindo, assim, os custos da construção da linha. Tomou-se um cuidado especial no emprego destes solenóides no sentido de manter o desacoplamento dos planos horizontal e vertical através das rotações provocadas no feixe. Assim, os solenóides foram utilizados sempre aos pares, com campos opostos um ao outro, de tal forma que a rotação que é provocada num sentido no primeiro solenóide e feita no sentido oposto no segundo.

A inserção propriamente dita foi feita em um ângulo de 10° . Dessa forma minimizam-se as perturbações na divergência do feixe provocadas pelo raio de curvatura pequeno. Além disso, uma entrada a 10° disponibiliza mais espaço para a inserção do eletroímã que torna o feixe paralelo às órbitas (na tabela 4.1 identificado como D5).

Como já discutimos anteriormente, o pacote de funções desenvolvidas para o MATLAB realiza os cálculos usando os parâmetros de Courant-Snyder. Assim, é fácil obter a função envelope a partir dos dados da simulação. A amplitude do envelope do feixe é definida como sendo [39]:

$$Envelope = \sqrt{\beta \epsilon}$$

eq 4.1

onde β é o parâmetro de Courant-Snyder e ϵ é a emitância do feixe, já definidos no capítulo 1. Os envelopes são apresentados na figura 4.3.

figura 4.3 - Envelopes da linha de feixe de inserção ($E=2,5$ MeV)

Como pode ser visto na figura 4.3, o feixe possui uma amplitude máxima de envelope menor que 3 mm, adequado, portanto, ao tubo de transporte do feixe.

A simulação dessa linha de feixe incluiu também os quadrupolos da linha de retorno do microtron. No entanto os quadrupolos adotados no capítulo 2 eram extremamente fortes para o feixe proveniente da linha de inserção, tornado essa linha inviável. Assim, os quadrupolos tiveram que ter seus valores

modificados de tal forma permitir, por um lado, que o resultado da linha de inserção fosse um feixe com características parecidas àquelas da elipse de aceitação transversal obtidas no capítulo 2 e, por outro, que esses quadrupolos fossem adequados à estabilidade transversal na etapa síncrona. Isso foi feito de modo interativo, ou seja, modificavam-se os valores dos quadrupolos no Matlab e o resultado dessas simulações, alimentava o PTRACE (também com seus valores de quadrupolos alterados) e verificava-se a estabilidade transversal.

A elipse de entrada do PTRACE (último elemento da linha de inserção no programa do Matlab) é apresentada na figura 4.4. Os novos valores adotados para a distância focal dos quadrupolos, passaram de 120 cm para 260 cm e -290 cm.

figura 4.4 - Elipses de feixe na entrada da etapa síncrona (último elemento da linha de inserção) para $W=2,5$ MeV

Como se pode ver, as elipses do feixe estão, em princípio, um pouco diferentes das elipses de aceitação da etapa síncrona levantadas no capítulo 2. No entanto, ao usarmos essas elipses nessa nova configuração (ou seja, alterando os valores dos quadrupolos) ainda resultam em uma solução estável, como pode ser visto na figura 4.5.

figura 4.5 - Simulação do plano transversal com o PTRACE na etapa síncrona com o feixe resultante da linha de inserção de 2,5 MeV

Deve-se lembrar que o feixe considerado na entrada da linha de inserção (feixe inicial considerado para as simulações com o MATLAB) foi um feixe muito maior que o esperado na prática. Portanto, os resultados obtidos com essa linha podem ser considerados bastante satisfatórios. No entanto, uma nova simulação foi realizada com um feixe de 0,3 mm x 0,5 mrad (tanto na horizontal como na vertical) com o objetivo de demonstrar o comportamento dessa linha com um feixe de melhores características transversais. Esse resultado é mostrado na figura 4.6.

figura 4.6 – Elipses de feixe na entrada da etapa síncrona (último elemento da linha de inserção) para $W=2,5$ MeV utilizando um feixe inicial de 0,3 mm x 0,5 mrad.

4.3 Linha de inserção a 4,9 MeV

A linha de inserção a 4,9 MeV é aquela considerando o microtron *booster*. Então, como ponto de partida, tomamos as elipses de feixe imediatamente após a saída do *booster* após a quinta volta. Esses dados são apresentados na figura 4.7 [5].

figura 4.7 – Dados de saída do PTRACE ao final da quinta volta do *booster*

Como pode ser visto na figura 4.7, as elipses no espaço de fase, logo após a saída do *booster*, se apresentam bastante inadequadas para o transporte, sobretudo quando observamos o plano vertical, onde as dimensões do feixe beiram os limites físicos do tubo. Nessas condições é praticamente impossível transportar o feixe pela linha de inserção, em especial no trecho entre os dois eletroímãs principais, onde o espaço para correções é pequeno e as perturbações causadas no feixe, logo após a passagem pelo primeiro eletroímã (a 160° com ângulos de entra e saída de -10°), são muito grandes.

Portanto, para que o transporte do feixe seja feito de maneira correta, devemos introduzir colimadores de tal forma a obter um feixe com dimensões máximas iguais a 1,0 mm x 0,7 mrad tanto na horizontal quanto na vertical.

Assumindo esse feixe, seguimos a mesma filosofia de inserção no principal com 2,5 MeV, ou seja, uma inserção com um ângulo de 10° (pelos mesmos motivos apresentados anteriormente). No entanto, pelo fato da energia do feixe ser praticamente o dobro da anterior, os solenóides tiveram que ser substituídos por quadrupolos, pois o poder focalizador deste elemento é muito maior do que o de um solenóide de mesmo comprimento efetivo. A desvantagem de se utilizar quadrupolos é principalmente econômica, pois envolvem a construção de um maior número de bobinas, usinagem do núcleo de ferro e a construção de um suporte com 3 ou mais graus de liberdade para a sustentação e alinhamento do elemento.

A figura 4.8 mostra o desenho final da linha de inserção a 4,9 MeV e a tabela 4.2 mostra a lista dos elementos que compõem essa linha.

figura 4.8 – Linha de inserção no principal à energia de 4,9 MeV
(unidades em mm)

Número do elemento	Tipo de elemento ¹	ID MATLAB	Comprimento ² (m)	Distância focal (m)	Campo magnético (T)	Ângulo de curvatura (°)	Raio de curvatura (m)	Ângulo de entrada (°)	Ângulo de saída (°)
1	L	L10	0,8382	-	-	-	-	-	-
2	Q	Q1	0,1000	-3,7	-	-	-	-	-
3	L	L11	1,0000	-	-	-	-	-	-
4	Q	Q2	0,1000	3,0	-	-	-	-	-
5	L	L12	0,2286	-	-	-	-	-	-
6	D	D3	-	-	-	-10	0,5730	0	0
7	L	L13	0,4934	-	-	-	-	-	-
8	Q	Q3	0,1000	-3,6	-	-	-	-	-
9	L	L14	0,5934	-	-	-	-	-	-
10	Q	Q4	0,1000	4,5	-	-	-	-	-
11	L	L15	0,6934	-	-	-	-	-	-
12	Q	Q5	0,1000	-3,6	-	-	-	-	-
13	L	L16	0,6934	-	-	-	-	-	-
14	Q	Q6	0,1000	3,0	-	-	-	-	-
15	L	L17	0,6934	-	-	-	-	-	-
16	Q	Q7	0,1000	-3,5	-	-	-	-	-
17	L	L18	1,3865	-	-	-	-	-	-
18	D	D4	-	-	-	-160	0,1231	-10	-10
19	L	L19	0,3477	-	-	-	-	-	-
20	D	D5	-	-	-	-10	0,5730	0	0
21	L	L20	0,2000	-	-	-	-	-	-
22	Q	QE1	0,6000	2,5	-	-	-	-	-
23	L	L21	0,3000	-	-	-	-	-	-
24	Q	QE2	0,1000	-2,0	-	-	-	-	-
25	L	L22	0,3000	-	-	-	-	-	-
26	Q	QE3	0,1000	2,1	-	-	-	-	-
27	L	L23	1,0249	-	-	-	-	-	-
28	D	D6	-	-	-	-180	0,1231	0	0
29	L	LRPA	0,2343	-	-	-	-	-	-
30	Q	QRPA	0,0500	-2,9	-	-	-	-	-
31	L	LRPB	0,2000	-	-	-	-	-	-
32	Q	QRPB	0,0500	2,6	-	-	-	-	-
33	L	LRPC	0,2000	-	-	-	-	-	-

tabela 4.2 – Lista de elementos que compõem a linha de inserção ($E=4,92$ MeV) no microtron principal

¹ L= espaço livre, D=dipolo, Q=quadrupolo, S=solenóide

² comprimentos efetivos para solenóides e quadrupolos

Na figura 4.8 pode ser visto o emprego de “mini-quadrupolos”, listados na tabela 4.2 como QE1, QE2 e QE3. A razão pela qual não se pode utilizar solenóides como na solução para 2,5 MeV é a mesma explicada anteriormente: por causa da alta energia do feixe, para que um solenóide tivesse o poder de focalização necessário, deveria ser muito longo e, nesse trecho em particular, não há espaço suficiente.

No próximo capítulo mostramos o projeto magnético desses quadrupolos especiais (feito por meio de simulações com o FEMM) e discutimos sua viabilidade.

A figura 4.9 mostra os envelopes do feixe ao longo dos elementos dessa linha. Como pode ser visto, o feixe mantém características adequadas ao longo de todo o trajeto, com dimensões transversais não superiores que 5 mm.

figura 4.9 - Envelopes da linha de feixe de inserção ($W=4,9$ MeV)

A elipse de entrada do PTRACE (último elemento da linha de inserção) é apresentada na figura 4.10. O arquivo de entrada do PTRACE foi mantido com a mesma configuração de quadrupolos adotados no item anterior (distâncias focais de 260 cm e -290 cm). A figura 4.11 mostra a evolução desse feixe ao longo das voltas na etapa síncrona.

figura 4.10 - Elipses de feixe na entrada da etapa síncrona (último elemento da linha de inserção) para $W=4,9$ MeV

figura 4.11 - Simulação do plano transversal com o PTRACE na etapa síncrona com o feixe resultante da linha de inserção de 4,9 MeV

Novamente podemos perceber que se obtém uma solução bastante boa, sobretudo no plano vertical, onde as dimensões são menores que 2 mm. No entanto, devemos reforçar que essa solução só é possível desde que utilizemos colimadores logo após a saída do *booster*. Por outro lado, o uso de colimadores nessa posição ocasionaria uma redução do número de partículas em aproximadamente 82%. Isso se traduz na redução da corrente de feixe da mesma proporção.

4.4 Extração

Independentemente de qual seja a energia de entrada no microtron, o sistema de extração foi pensado para selecionar a energia de saída, de acordo com a energia em cada órbita. Para isso o feixe deve sofrer um pequeno desvio na órbita correspondente à energia desejada.

Para que esse sistema funcione o desvio deve ser pequeno, pois o feixe não pode ultrapassar os limites físicos do tubo. Por outro lado, é desejado um desvio grande de tal forma que o feixe extraído tenha uma separação suficientemente grande ao final da volta no ímã principal para que ele se destaque dos demais com energia mais baixa.

A solução adotada é de estender a câmara de vácuo de um dos ímãs principais de tal forma que o desvio sofrido pelo feixe seja suficientemente grande para haver a separação e, por outro lado, o desvio não fique limitado às

dimensões do cano. A figura 4.12 mostra esquematicamente o sistema de extração.

figura 4.12 - Esquema do sistema de extração

As linhas azuis pontilhadas mostram as dimensões da câmara de vácuo que se estendem por cerca de 25 cm além dos limites da face polar do eletroímã

Norte. Junto a ela posiciona-se o eletroímã extrator, que provocará um pequeno desvio no feixe. Esse desvio de 10° faz com que o feixe tenha uma separação de 5 cm com relação à trajetória normal na entrada do eletroímã. Entrando no principal, o feixe fará uma curvatura total de 160° e sairá com um desvio de 10° e separado da linha da estrutura aceleradora de 5 cm no ponto imediatamente após a saída do eletroímã principal. No entanto uma saída a 10° não é suficiente para que o feixe extraído tenha o caminho livre dos elementos da linha de inserção (em qualquer das opções), como pode ser visto com mais detalhes na figura 4.13. Assim, após a saída do principal, um segundo eletroímã de 25° deve ser introduzido, de tal forma que a trajetória passe por entre dois solenóides ou dois quadрупolos (dependendo da solução adotada para a inserção).

Ao final, um eletroímã de 35° deve ser colocado para que o feixe seja redirecionado à linha que leva à sala experimental.

figura 4.13 - Detalhe do esquema de extração

Os desvios provocados no feixe em toda a extração introduzem-lhe perturbações muito grandes, tornando-o inadequado para a linha experimental. Essas perturbações vêm principalmente da curva realizada no eletroímã principal quando o feixe é extraído nas energias mais baixas (portanto com raios de curvatura menores). Devemos assim introduzir um par de quadrupolos de tal forma a corrigir esse problema. A posição desses quadrupolos foi escolhida de tal forma a manter um espaço livre com relação aos demais elementos da linha de inserção e da etapa síncrona.

Da mesma forma que para as linhas de inserção, procedemos ao cálculo matricial dessa linha de extração em duas situações extremas: energia baixa (a energia escolhida foi a de 5,78 MeV que seria a 1ª volta da linha de 4,9 MeV ou a 4ª da linha de 2,5 MeV) e 38 MeV (energia final do microtron). O feixe de partida para essa linha deve ser extraído da etapa síncrona na região central entre os dois eletroímãs principais na linha de retorno.

A tabela 4.3 mostra as dimensões transversais do feixe e o raio de curvatura no ímã principal para as duas energias escolhidas para a simulação. Como se pode ver, à energia mais alta o feixe tem uma emitância muito menor que na energia mais baixa, em virtude da aceleração.

E (MeV)	R (m)	x (mm)	x' (mrad)	y (mm)	y' (mrad)
5,784	0,1443	1,6	0,3	0,4	0,1
38,019	0,9108	1,6	0,04	0,4	0,01

tabela 4.3 – Parâmetros do feixe para as duas energias simuladas

Por segurança, nas duas simulações utilizamos como dimensões transversais as mesmas do feixe de 5,78 MeV, tomando o cuidado de apenas mudar o raio de curvatura e, obviamente, a energia do feixe (note que as divergências horizontal e vertical para a energia de 38 MeV são 10 vezes menores que para a energia de 5,8 MeV).

As figuras 4.13 e 4.14 mostram os envelopes do feixe para cada uma das situações. Nas duas situações, o feixe ao final da linha de extração é adequado à linha que leva à sala experimental de acordo com o projeto anterior da linha de transporte [5].

figura 4.14 – Envelope do feixe na extração à energia de 5,78 MeV

figura 4.15 – Envelope do feixe na extração à energia de 38 MeV

A tabela 4.4 mostra a lista dos elementos que compõem a linha de extração do principal. O elemento nomeado QE1 apresenta dois valores para a distância focal, correspondendo às linhas de baixa e alta energia respectivamente. Portanto, esse quadrupolo deve ter seu campo ajustado, podendo passar de um quadrupolo focalizador a um desfocalizador dependendo da energia de extração desejada.

Número do elemento	Tipo de elemento ¹	ID MATLAB	Comprimento ² (m)	Distância focal (m)	Ângulo de curvatura (°)	Raio de curvatura (m)	Ângulo de entrada (°)	Ângulo de saída (°)
1	D	DE1	-	-	-10	0,2865	0	0
2	L	LE1	0,2589	-	-	-	-	-
3	D	DP	-	-	-160	0,1443	-10	-10
4	L	LE2	0,3274	-	-	-	-	-
5	D	DE2	-	-	25	0,2292	0	0
6	L	LE3a	0,1666	-	-	-	-	-
7	Q	QE1	0,1000	1,7/-1,7	-	-	-	-
8	L	LE3b	0,4579	-	-	-	-	-
9	Q	QE2	0,1000	-2,4	-	-	-	-
10	L	LE3c	0,4629	-	-	-	-	-
11	D	DLEx	-	-	-35	0,3274	0	0
12	L	LEx	0,3000	-	-	-	-	-

tabela 4.4 – Lista de elementos que compõem a linha de extração do microtron principal

¹ L= espaço livre, D=dipolo, Q=quadrupolo, S=solenóide

² comprimentos efetivos para solenóides e quadrupolos

No próximo capítulo serão apresentados os projetos dos eletroímãs necessários para compor as linhas inserção e extração.

Capítulo 5

Estudo de viabilidade dos ímãs utilizados nas linhas de inserção e extração

5.1 Introdução

Uma das maiores dificuldades para a implementação das linhas de feixe são as severas restrições de espaço para a colocação dos componentes óticos (dipolos, quadrupolos e solenóides), sobretudo na região interna entre os dois ímãs principais, onde a proximidade dos tubos limita enormemente o espaço livre.

Ao contrário do que foi feito no capítulo 3 para os ímãs principais, não foram feitos estudos aprofundados, como dimensionamento elétrico das bobinas ou o estudo do campo em 3D. Esse capítulo dedica-se apenas a estudar a viabilidade desses componentes sob as restrições descritas acima.

5.2 Dipolos

5.2.1 *DipCalc*

Para os dipolos, foi desenvolvido um programa em linguagem visual chamado DipCalc. Esse programa realiza de maneira rápida os cálculos de ângulo de curvatura, comprimento do arco, raio de curvatura e campo magnético a partir de dois desses mesmos parâmetros e também da energia e do tipo de partícula utilizada. Esse programa pode realizar também as correções necessárias nesses parâmetros tal como são descritas em [40], além de estimar a secção transversal das bobinas necessárias para produção do campo magnético desejado. A figura 5.1 mostra uma tela típica desse programa. O manual desse programa (em língua inglesa) e as instruções de como obtê-lo (o programa é distribuído gratuitamente) encontram-se disponíveis no apêndice E.

figura 5.1 – Tela típica do DipCalc

5.2.2 Dipolos 45° para a linha de 2,5 MeV

Para a linha de 2,5 MeV são necessários 4 dipolos de 45° cada. Esses dipolos são idênticos àqueles desenvolvidos em [40]. Portanto seria necessária a construção de mais 3 desses modelos para a implementação dessa linha. A figura 5.2 mostra o perfil transversal e a tabela 5.1 resume os parâmetros desse dipolo.

Ângulo de curvatura	45°
Ângulo de construção	35°
Raio de curvatura	163,7 mm
Campo magnético (a 2,5 MeV)	0,078 T
Gap	24 mm
Corrente total	1490 A.voltas

tabela 5.1 –parâmetros do dipolo de 45°

figura 5.2 - Secção dos dipolos de 45° (medidas em mm)

5.2.3 Dipolos de 10° usados na inserção

Os ímãs usados na inserção têm uma séria restrição de espaço como vimos no capítulo anterior. A largura máxima transversal não pode ultrapassar 100 mm. No entanto, pelo fato do ímã trabalhar a energias relativamente baixas, os campos necessários são baixos, tornando viável a construção desse eletroímã com essas dimensões diminutas. Usando o DipCalc obtemos os parâmetros desse dipolo que são apresentados na tabela 5.2.

Ângulo de curvatura	10°
Ângulo de construção	7,5°
Raio de curvatura	573 mm
Campo Magnético (a 2,5 MeV)	0,017 T
Campo Magnético (a 4,9 MeV)	0,031 T
Gap	24 mm
Corrente total máxima	592 A.voltas

tabela 5.2 - parâmetros do dipolo de 10°

Usando os dados da tabela 5.2 simulamos o dipolo usando o FEMM. A secção da bobina foi projetada de tal forma a manter uma densidade de corrente de 2 A/mm², que é um valor típico para enrolamentos sem refrigeração forçada. As simulações sugerem que os requisitos obtidos nos cálculos com o DipCalc, em termos de valores absolutos, foram alcançados ($B_{\max}=0,031$ T). O FEMM nos permitiu também verificar a indução magnética no ferro e identificar se existe algum problema de saturação. A figura 5.3 mostra esse resultados. Como pode ser visto, apesar das pequenas dimensões do magneto, não há nenhum problema de saturação no ferro (que está por volta de 2 T).

figura 5.3 – Indução magnética no ferro do eletroímã de 10°

A figura 5.4 mostra um esboço com as dimensões desse dipolo.

figura 5.4 - Secção dos dipolos de 10° (medidas em mm)

5.2.4 Dipolos de 10° usados na extração

O primeiro magneto utilizado para a extração do feixe no microtron principal é um magneto particularmente interessante em virtude de suas características. Primeiramente podemos destacar que esse eletroímã deve operar com um feixe cuja energia pode variar de 3,1 MeV (no caso de se optar por uma linha de inserção de 2,5 MeV) a 38 MeV. É recomendado que esse eletroímã possua um conjunto de bobinas para cada faixa de energia, variando em cada conjunto o número de espiras. A finalidade disso é mudar a resistência das bobinas para que a tensão da fonte de alimentação desse magneto seja aproximadamente constante, operando sempre com a mesma corrente. Assim, para extrações a energias baixas, deveria ser utilizado um conjunto de bobinas com poucas espiras, e para energias mais altas (onde o campo necessário para se realizar o mesmo desvio é maior), um conjunto com um número maior de espiras. Pode-se ainda optar por construir um ou dois outros conjuntos de bobinas para as energias intermediárias.

Outro aspecto interessante é que esse dipolo deve ter uma secção reta relativamente estreita, de tal forma que ocupe o espaço entre dois tubos de órbitas adjacentes. A figura 5.5 mostra o perfil desse ímã, modelado no FEMM. Os semicírculos representam os tubos das órbitas do microtron no caminho de retorno. O campo produzido por esse magneto deve atuar somente na órbita desejada. Por isso, ao extrairmos o feixe na órbita n , devemos colocar uma blindagem magnética na órbita $n-1$. As simulações feitas com o FEMM indicam que uma blindagem com um material do tipo μ -metal, com uma espessura de 2,5 mm, é suficiente para atenuar o campo para menos de 0,1% do seu valor na região de interesse. A tabela 5.3 resume as características desse magneto (calculadas com o DipCalc) e que são utilizadas na simulação do FEMM. Mais uma vez pode-se notar que, com o campo máximo, esse magneto não apresenta problemas de saturação.

figura 5.5 – Indução magnética no ferro do eletroímã de 10° da extração

Ângulo de curvatura	10°
Raio de curvatura	286 mm
Campo Magnético máximo	0,448 T
Gap	20 mm
Corrente total máxima	7130 A.voltas

tabela 5.3 - parâmetros do dipolo de 10° da extração

A figura 5.6 mostra um esboço com as dimensões desse dipolo.

figura 5.6 - Secção do dipolo de 10° da extração (medidas em mm)

Deve-se lembrar que esse magneto deve ser de fácil abertura, uma vez que para se escolher a energia de extração devemos montar esse magneto na órbita desejada. Além disso, seguindo o exemplo do magneto equivalente do acelerador de Mainz, para minimizar o uso de suportes sofisticados e minimizar os problemas de alinhamento, pode-se pensar numa configuração em que o eletroímã seja fixado diretamente no tubo de transporte do feixe.

5.2.5 Dipolos de 25° e 35° usados na extração

Por terem características muito parecidas, os dois dipolos utilizados para completar a extração do feixe podem compartilhar do mesmo perfil transversal. A tabela 5.4 resume os principais parâmetros desses magnetos.

Ângulo de curvatura	25°	35°
Ângulo de construção	18°	30°
Raio de curvatura	229 mm	327 mm
Campo magnético máximo	0,560 T	0,392 T
Gap	24 mm	24 mm
Corrente total máxima	10700 A.voltas	7500 A.voltas

tabela 5.4 - parâmetros dos dipolos de 25° e 35°

A figura 5.7 mostra o perfil do eletroímã de 25°, onde o campo necessário para operação é maior, modelado no FEMM. Não há problemas de saturação segundo as simulações, mesmo quando usado com o campo máximo. A figura 5.8 mostra o esboço desse magneto com as cotas em mm.

figura 5.7 – Indução magnética no ferro do eletroímã de 25° da extração

figura 5.8 - Secção dos dipolos de 25° e 35° da extração (medidas em mm)

5.2.6 Eletroímãs corretores

Um conjunto de ímãs muito importante para o funcionamento do microtron e que não foi mencionado explicitamente antes é o dos ímãs corretores. Esses ímãs serão instalados em cada uma das órbitas do feixe do microtron principal e permitirão fazer correções para que as condições de estabilidade sejam mantidas em presença de fatores externos aleatórios, tais como erros no alinhamento do dipolos, imperfeições no campo magnético, etc. (nas discussões finais esses problemas são enumerados). Para isso os eletroímãs corretores (às vezes chamados de *steerings*) devem atuar tanto na horizontal como na vertical. Além disso, devem permitir deslocamentos paralelos, ou seja, deverão ser instalados em pares (1 par para correção horizontal e 1 par para a correção vertical), separados por uma certa distância. A figura 5.9 mostra esquematicamente a distribuição dos corretores. Note que os corretores estão distribuídos de forma assimétrica. Isso se deve ao fato de que, como descrito anteriormente, para se realizar a extração do feixe, é necessário estender a câmara de vácuo, reduzindo o espaço em um dos lados. A tabela 5.5 mostra as principais características dos corretores.

Correção máxima	3 mrad
Campo magnético máximo	0,008 T
Corrente total máxima	110 A.voltas

tabela 5.5 - parâmetros dos ímãs corretores

figura 5.9 - Esquema de distribuição dos ímãs corretores (azuis representam os corretores horizontais e vermelhos os verticais)

A figura 5.10 mostra o perfil desses eletroímãs modelados no FEMM. Não há problemas de saturação segundo as simulações, mesmo quando usado com o campo máximo. A figura 5.11 mostra o esboço desse magneto com as cotas em mm.

figura 5.10 - Simulação do campo magnético de um steering horizontal

figura 5.11 - Secção dos corretores (medidas em mm)

5.3 Quadrupolos

Como foi mencionado no capítulo 4, o maior desafio para a implementação da linha de 4,9 MeV é o emprego de “mini-quadrupolos” no trecho entre os dois ímãs principais. No entanto, como a energia do feixe é baixa, o gradiente necessário é relativamente baixo. No pior caso, necessitamos de um quadrupolo com uma distância focal de 2 m e comprimento efetivo de 100 mm. Ao colocarmos esses valores nas equações 1.16 e 1.18 obtemos que o valor do gradiente necessário é de $G=0,08$ T/m. A figura 5.12 mostra uma proposta para esses quadrupolos. Novamente a área das bobinas foi escolhida de tal forma a respeitar os limites de 2 A/mm^2 para enrolamentos não refrigerados.

figura 5.12 – Secção dos “mini-quadrupolos” (medidas em mm)

A figura 5.13 mostra o modelo simulado no FEMM. O gradiente máximo obtido com esse quadrupolo foi de 1,2 T/m; valor este que está muito acima do necessário.

figura 5.13 - Indução magnética no ferro dos mini-quadrupolos

A maior dificuldade desses quadrupolos não reside no projeto magnético mas sim na etapa mecânica. Um quadrupolo laminado é recomendado nesse caso, pois as lâminas – que podem ser estampadas ou cortadas a laser – eliminam as etapas de usinagem convencional, onde poderiam ocorrer os problemas (sobretudo de tolerâncias mecânicas) em virtude do tamanho pequeno e da dificuldade de se usinar superfícies hiperbólicas nas faces polares.

Os outros quadrupolos da linha podem ser obtidos sobre variações de comprimento físico (ou ainda de pequenas variações do perfil transversal) da versão já existente [41].

5.4 Solenóides

Os solenóides usados nesse trabalho têm um campo máximo por volta 0,05 T; campo este muito similar aos solenóides já existentes na linha de 100 keV. Esses solenóides possuem uma capa de material magnético que tem por finalidade restringir o campo ao interior do solenóide. Esse artifício é especialmente interessante nesse trabalho, pois alguns dos solenóides estarão localizados entre a inserção e a primeira órbita. A figura 5.14 mostra a simulação de um solenóide de 300 mm de comprimento, raio externo 30 mm e raio interno 8 mm.

figura 5.14 – Simulação do solenóide no FEMM

Foi utilizada nas simulações uma densidade de corrente de $2,2 \text{ A/mm}^2$. Com essa corrente o campo gerado pelo solenóide apresenta o perfil mostrado na figura 5.15. Portanto, as pequenas dimensões radiais desse solenóide não são um empecilho para a viabilidade das linhas projetadas no capítulo anterior.

figura 5.15 - Perfil longitudinal do campo magnético do solenóide

Conclusões

Esse trabalho teve como finalidade o projeto do microtron principal do IFUSP. Para isso realizaram-se simulações de dinâmica de feixe, tanto longitudinal quanto transversal na etapa síncrona, além de simulações de dinâmica de feixe transversal para as linhas de inserção e extração.

Durante as simulações da etapa síncrona, percebeu-se que a energia de inserção poderia ser reduzida de 4,9 para 2,5 MeV. Esse resultado é muito importante, pois permitiria a eliminação do microtron *booster*. Em outras palavras, ao invés de se operar duas máquinas em modo síncrono, teríamos apenas uma, tornando a operação do acelerador como um todo muito mais simples.

Um outro ponto a favor da operação do microtron principal com energia inicial de 2,5 MeV é no que diz respeito à linha de inserção (quando comparada com a linha de 4,9 MeV). O feixe ao passar pelo *booster* sofre uma distorção muito grande no plano transversal, tornando-o inadequado a inserção em outra etapa síncrona. A solução para essa linha de inserção mais energética seria a colocação de colimadores logo após a saída do *booster*. No entanto, o uso desses colimadores reduziria a corrente de feixe em aproximadamente 82%. A linha de inserção de 2,5 MeV não possui colimadores e o feixe ao final tem características transversais melhores do que as da linha de 4,9 MeV.

O método proposto para a extração se apresenta como uma solução bastante simples, evitando a construção de ímãs sofisticados como, por exemplos, um *septum*. O feixe ao final da extração se mostra também adequado à linha de transporte para sala experimental.

Ainda que não tenha sido o enfoque desse trabalho, foi feita uma primeira estimativa dos elementos óticos (dipolos, quadrupolos e solenóides), de maneira a demonstrar a viabilidade das soluções propostas para as duas linhas de inserção e para a linha de extração.

Os únicos magnetos estudados a fundo foram os eletroímãs principais. As soluções apresentadas aqui tiveram uma substancial mudança na qualidade do campo magnético (uma parte em 1000 sem o uso de bobinas corretivas) numa área de interesse de aproximadamente $2 \times 1 \text{ m}^2$. Também foi realizado o projeto mecânico além dos dimensionamentos elétrico e hidráulico das bobinas desses ímãs.

Outra contribuição importante foi o desenvolvimento do pacote de ferramentas para cálculo da dinâmica de feixe no ambiente MATLAB. Essas ferramentas, além de realizarem os cálculos diretamente utilizando os coeficientes de Courant-Snyder, funcionam de maneira visual e bastante intuitiva, sendo recomendadas para aplicações didáticas.

Como perspectivas futuras para esse trabalho, podemos citar:

- Aprofundamento no estudo dos magnetos da linha de transporte (estudo de uniformidades do campo, otimizações de faces polares, etc.) e projeto mecânico e elétrico desses magnetos;
- Detalhamento dos suportes dos eletroímãs principais permitindo a sustentação da massa de 14 toneladas e ainda alinhamento em 6 graus de liberdade;
- Criação da logística de transporte e montagem das partes do eletroímã dentro do prédio do acelerador;
- Estudo da instrumentação para o diagnóstico do feixe composto de dois monitores de posição (para o diagnóstico de posição transversal e divergência) e um monitor de fase e intensidade (para o diagnóstico da parte longitudinal).

Apêndice A

Arquivo de entrada do PTRACE

[illegible]

0,0,0,0,0,0,0,0
 0.000,0.000,-0.002,-0.004,-0.006,-0.012,-0.016,-0.019
 -0.022,-0.030,-0.033,-0.045,-0.051,-0.065,-0.073,-0.096
 -0.118,-0.131,-0.175,-0.189,-0.210,-0.218,-0.214,-0.210
 -0.200,-0.178,-0.110,-0.055,0.029,0.100,0.179,0.262
 0.375,0.458,0.612,0.700,0.756,0.805,0.878,0.932
 0.948,0.969,0.984,0.988,0.991,0.995,0.996,0.999
 1.000,1.000,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 5,1
 0.0,0.0,103.325,0.0,0.0,0.0
 5,1
 0.0,0.0,103.325,0.0,0.0,0.0
 2,1
 0.2,0.5,0.2,0.1,0.0
 25.0,25.0,1.0,11.6,.1410
 180.0,0.0,0.0,0.0
 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
 16.6,-8.5,-8.5,16.6
 50
 17.00,16.20,15.80,14.90,14.20,12.90,12.30,12.00
 11.70,11.00,10.70,10.00,9.70,9.10,8.80,8.10
 7.50,7.20,6.20,5.90,5.20,4.90,4.60,4.30
 3.90,3.60,3.00,2.70,2.30,2.00,1.70,1.40
 1.00,0.70,0.10,-0.30,-0.60,-0.90,-1.50,-2.20
 -2.50,-3.10,-3.80,-4.10,-4.40,-5.10,-5.40,-6.50
 -8.00,-9.00,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 0.000,0.000,-0.002,-0.004,-0.006,-0.012,-0.016,-0.019
 -0.022,-0.030,-0.033,-0.045,-0.051,-0.065,-0.073,-0.096
 -0.118,-0.131,-0.175,-0.189,-0.210,-0.218,-0.214,-0.210
 -0.200,-0.178,-0.110,-0.055,0.029,0.100,0.179,0.262
 0.375,0.458,0.612,0.700,0.756,0.805,0.878,0.932
 0.948,0.969,0.984,0.988,0.991,0.995,0.996,0.999
 1.000,1.000,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0
 5,0
 0.0,0.0,11.325,0.0,0.0
 4,0
 2.498,-290.0,0,0,0
 5,0
 0.0,0.0,20.0,0.0,0.0
 4,0
 2.498,+260.0,0,0,0
 5,1
 0.0,0.0,20.000,0.0,0.0

Apêndice B

Desenhos mecânicos do

eletroímã principal

Obs.: Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm.

Peça 1 do Clamp
Proj.	Material	Unidade	Escala	Contato/ Raral			
Des.	Quant.	Nome do arquivo	Milímetros	1 : 2			
		4 unidades			Data	Des.	02/02

Obs.: Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. O detalhe A é válido para todos os furos com raboixo.

<p align="center">Peça 1 do Clamp</p>
<p>Proj.</p>	<p>Material</p>	<p>Unidade</p>	<p>Escala</p>	<p>Contato/ Raral</p>	<p>R:</p>
<p>Des.</p>	<p>Quant.</p>	<p>Nore do arquivo</p>	<p>1 : 10</p>	<p>Data</p>	<p>Des.</p>
	<p>4 unidades</p>				<p>01/02</p>

Vista frontal em escala 1:10

Obs.: Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. O detalhe A é válido para todos os furos com raboixo.

Título Peça 2 do Clamp
Proj.	Material	Unidade	Escala	Contato/ Raral	R: 0000	
Des.	Quant.	Nome do arquivo	Milímetros	Data	Des. 01/01	
	4 unidades		1 : 10

Obs: A especificação de rosca é válida para os dois furos indicados.

Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. Para o ângulo, adotar tolerância de 0,3°.

Peça nº 1 do Eletroímã (Vista Lateral)			
Proj.:	Material	Unidade Mímetros	Escala 1 : 4	Contato/ Raral
Des.	Quant.	4 unidades	Nome	Data
Des.	02/02

Título		Peça nº 2 do Eletroímã (Vista Lateral)
Proj.		Material		Unidade	Escala	Contato/ Raral	
Des.		Quant.		Milímetros	1 : 4	Data	
		4 unidades		Nome do arquivo		Des.	
						02/02

Obs: Todos os 4 furos laterais seguem o detalhe A. Adotar tolerância igual a $\pm 0,2$ mm para as medidas inferiores a 150 mm e tolerância de $\pm 0,5$ mm para as medidas iguais ou superiores a 150 mm.

Proj. IFUSP		Peça nº 2 do Eletroímã (Vista Superior)
Material		Unidade		Contato/ Raraal
Nome do arquivo		Métricos		Escala
Quant.		4 unidades		1 : 10
Des.		Data		Des. 01/02

Obs: A especificação de rosca é válida para os dois furos indicados.
Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. Para o ângulo, adotar tolerância de 0,3°.

Peça nº 3 do Eletroímã (Vista Lateral)
Proj.		Material		Unidade		Escala		Contato/ Raral	
						1 : 5			
Des.		Quant.		4 unidades		Nome do arquivo		Data	
						Nome		Des.	
								02/02

Detalhe A

Obs: Todos os 4 furos laterais seguem o detalhe A. Adotar tolerância igual a $\pm 0,2$ mm para as medidas inferiores a 150 mm e tolerância de $\pm 0,5$ mm para as medidas iguais ou superiores a 150mm.

Peça nº 3 do Eletroímã (Vista Superior)
Título					
Proj.	Material	Unidade	Escala	Contato/ Ramal	
		Milímetros	1 : 10		
Des.	Quant.	Nome do arquivo	Nome	Data	Des.
	4 unidades				01/02

Obs: A especificação de rosca é válida para os dois furos indicados.
Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. Para o ângulo, adotar tolerância de 0,3°.

Peça nº 5 do Eletroímã (Vista Lateral)
Proj.	Material	Unidade	Escala	Contato/ Raral	
		Milímetros	1 : 5		
Des.	Quant.	Nome do arquivo		Data	Des.
	4 unidades				02/02

Obs: A especificação de rosca é válida para os dois furos indicados.
 Adotar tolerâncias iguais a 0,2 mm para as medidas até 150 mm e tolerância de 0,5 mm para as medidas superiores a 150mm. Para o ângulo, adotar tolerância de 0,3°.

IFUSP	Título Peça nº 6 do Eletroímã (Vista Lateral)
	Proj.	Material	Unidade	Escala	Contato/ Raral
Des.	Quant.	4 unidades	None do arquivo	Milímetros 1 : 5	Data
					Des. 02/02

Apêndice C

Pacote de ferramentas de ótica de feixe para MATLAB[©]

Funções geradoras de matrizes dos elementos

1) drift

```
function d=drift(L);  
% Cria a matriz de transferencia  
% de um espaço livre com comprimento L em [m]  
  
d=[[1 L 0 0];[0 1 0 0];[0 0 1 L];[0 0 0 1]];
```

2) dipole

```
function D=dipole(theta,Ro,alpha,beta)  
%Calcula a matriz de um Dipolo com  
%theta=angulo do desvio em [graus] - no plano horizontal  
%Ro=Raio de curvatura central em [m]  
%alpha=rotação da face polar na entrada em [graus]  
%beta=rotação da face polar na saída em [graus]  
  
theta=theta*pi/180; % conversão de angulo  
alpha=alpha*pi/180; % para radianos  
beta=beta*pi/180;  
  
klin=(tan(alpha))/Ro;  
klout=(tan(beta))/Ro;  
  
Malpha=[[1 0 0 0];[klin 1 0 0];[0 0 1 0];[0 0 -klin 1]]; %rotação  
Mbeta=[[1 0 0 0];[klout 1 0 0];[0 0 1 0];[0 0 -klout 1]]; %de polo  
MD=[[cos(theta) Ro*sin(theta) 0 0];[-(1/Ro)*sin(theta) cos(theta) 0 0];[0 0 1  
Ro*theta];[0 0 0 1]];  
  
D=Mbeta*MD*Malpha;
```

3) quadrupole

```
function q=quadrupole(f,L,ft);  
% Cria a matriz de transferencia
```

```

% de um quadrupolo
% com distancia focal f em [m] e
% comprimento efetivo L em [m]
% sinal positivo de ft foca no plano horizontal

k=1/(f*L);

if (ft>0)
    q=[[cos(k*L) (sin(k*L)/k) 0 0];[-k*sin(k*L) cos(k*L) 0 0];[0 0 cosh(k*L)
(sinh(k*L)/k)];[0 0 k*sinh(k*L) cosh(k*L)]];
else
    q=[[cosh(k*L) (sinh(k*L)/k) 0 0];[k*sinh(k*L) cosh(k*L) 0 0];[0 0 cos(k*L)
(sin(k*L)/k)];[0 0 -k*sin(k*L) cos(k*L)]];
end;

```

4) sol

```

function s=sol(B,L)
% Cria a matriz de transferencia
% de um solenoide d
% com campo B em [T] e
% comprimento efetivo L em [m]

Bro=evalin('base','Bro');

k=B/(2*Bro);

C=cos(k*L);
S=sin(k*L);

s=[[C^2 S*C/k S*C S^2/k];[-k*S*C C^2 -k*S^2 S*C];[-S*C -S^2/k C^2
S*C/k];[k*S^2 -S*C -k*S*C C^2]];

```


Funções de manipulação das matrizes

1) beam4to2

```
function [beamx,beamy]=beam4to2(beam4)
%Separa a matriz de Twiss 4x4 (beam4)
% em duas matrizes beamx (horizontal) e beamy (vertical)

x11=beam4(1,1);
x12=beam4(1,2);
x21=beam4(2,1);
x22=beam4(2,2);

y11=beam4(3,3);
y12=beam4(3,4);
y21=beam4(4,3);
y22=beam4(4,4);

beamx=[[x11 x12];[x21 x22]];
beamy=[[y11 y12];[y21 y22]];
```

2) beam2to4

```
function beam4= beam2to4(beamx,beamy)
% Converte as matrizes de Twiss horizontal (beamx) e vertical (beamy)
% em uma única matriz 4x4 (beam4)

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);

beam4=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
```

3) courantsnyder

```
function [alpha,beta,gama,epsilon]=courantsnyder(a,b,phi)
%Calcula os parametros de Courant-Snyder a partir de uma elipse
%semi-eixo maior a em mm
%semi-eixo menor b em mrad
%rotação da elipse phi em graus
%Parametros de Courant-Snyder convertidos em m and radianos
```

```

warning off;

ang=phi*pi/180;

epsilon=a*b;

if (epsilon~=0)
    gama=((b^2)*((cos(ang))^2)+(a^2)*((sin(ang))^2))/epsilon;
    beta=((b^2)*((sin(ang))^2)+(a^2)*((cos(ang))^2))/epsilon;
    alpha((((b^2)*((cos(ang))*(sin(ang))))-(a^2)*((cos(ang))*(sin(ang)))))/epsilon;
else
    beta=b;
    gama=a;
    alpha=0;
end;

if (abs(phi)==45)
    gama=beta;
end;

warning on;

```

4) courantsnyderinv

```

function [a,b,phi]=courantsnyderinv(T,eixo);
%Calcula os semi eixos a e b (em mm) e o angulo de rotaçao da elipse (em graus)
%a partir da matriz com os coeficientes de Courant Snyder (matriz Twiss)

if (eixo==1) %hor
    e = evalin('base','epsilonx');
    alpha=-T(1,2);
    beta=T(1,1);
    gama=T(2,2);
else %ver
    e = evalin('base','epsilony');
    alpha=-T(3,4);
    beta=T(3,3);
    gama=T(4,4);
end;

if (gama==beta)
    if (alpha>0)
        phi=-45.0;
    else
        phi=+45.0;
    end
else
    phi=((atan(2*alpha/(gama-beta)))/2)*(180/pi);
end;

```

```

if (abs(phi)~=45)
    N1=(cos(phi*(pi/180)))^2;
    N2=(sin(phi*(pi/180)))^2;
    gamal=gama*e;
    betal=beta*e;
    b=(sqrt(gamal*N1-betal*N2))/sqrt(abs(N1^2-N2^2));
    a=sqrt(gamal+betal-b^2);
else
    N1=(cos(44.99999999999999*(pi/180)))^2;
    N2=(sin(45.00000000000001*(pi/180)))^2;           %aproximação para evitar
a indeterminação
    gamal=gama*e;
    betal=beta*e;
    a=(sqrt(gamal*N1-betal*N2))/sqrt(abs(N1^2-N2^2));
    b=sqrt(gamal+betal-a^2);
end;

```

5) elipse

```

function [x,y]=ellipse(a,b,phi);
% Cria dois vetores de pontos para se usar com a função plot
% de uma elipse genérica com semi-eixos a e b e rotacao phi (em graus)

warning off

npontos=9;

x1=linspace(a,0,npontos);
x2=linspace(0,-a,npontos);
x3=linspace(-a,0,npontos);
x4=linspace(0,a,npontos);

y1=((sqrt(1-(x1./a).^2)).*b);
y2=((sqrt(1-(x2./a).^2)).*b);
y3=(-(sqrt(1-(x3./a).^2)).*b);
y4=(-(sqrt(1-(x4./a).^2)).*b);

if (a==0)
    xi=linspace(0,0,(4*npontos));
    yi=linspace(-b,b,(4*npontos));
else
    xi=[x1 x2 x3 x4];
    yi=[y1 y2 y3 y4];

```

```

end;

r=sqrt(xi.^2+yi.^2);

theta0=abs(atan(yi./xi));

theta1=linspace(1,1,npontos);
theta2=linspace(-1,-1,npontos);
theta3=linspace(1,1,npontos);
theta4=linspace(-1,-1,npontos);

thetacompl=[theta1 theta2 theta3 theta4];

theta=theta0.*thetacompl;

theta1=linspace(0,0,npontos);
theta2=linspace(180,180,npontos);
theta3=linspace(180,180,npontos);
theta4=linspace(360,360,npontos);

thetacompl=([theta1 theta2 theta3 theta4])*pi/180;

theta=theta+thetacompl;

xf=r.*cos(theta+phi*pi/180);
yf=r.*sin(theta+phi*pi/180);

    x=xf;
    y=yf;

warning on

```

Funções de visualização

1) beam

Cria um GUI (*graphical user interface* – interface gráfica para o usuário) capaz de gerar e ao mesmo tempo visualizar as elipses do feixe inicial. As matrizes de Twiss são geradas e os coeficientes de Courant-Snyder são apresentados na tela. A figura C.1 mostra uma tela típica dessa interface.

figura C.1 - Tela típica da interface *beam*

```
function varargout = beam(varargin)
% BEAM M-file for beam.fig
%   BEAM, by itself, creates a new BEAM or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = BEAM returns the handle to a new BEAM or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   BEAM('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in BEAM.M with the given input arguments.
%
%   BEAM('Property','Value',...) creates a new BEAM or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before beam_OpeningFunction gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to beam_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.
```

```

% Edit the above text to modify the response to help beam

% Last Modified by GUIDE v2.5 17-Sep-2005 02:36:22

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @beam_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @beam_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [], ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT


%*****
%***** Inicial *****
%*****

% --- Executes just before beam is made visible.
function beam_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to beam (see VARARGIN)

global E Eo A Z ion

%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);

```

```

ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilonX]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilonX,'String',[num2str(epsilonX)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilonX',epsilonX);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtymax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

[alphay,betay,gamay,epsilonY]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilonY,'String',[num2str(epsilonY)]);
beamY= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilonY',epsilonY);

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);

```

```

x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);


%Energia
set(handles.particle, 'SelectedObject', handles.RB1);
ion=0;
E=str2double(get(handles.energia, 'String'))*1e6;
Eo=511e3;
Z=1;
A=1;
Bro=(A/(2.998e8*Z))*sqrt((E/A)^2+(2*E*Eo/A));
assignin('base','E',E);
assignin('base','Bro',Bro);


% Choose default command line output for beam
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes beam wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);


% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = beam_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;


% --- Executes on slider movement.
function xmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to xmax (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```



```

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%      get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxlmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilonx]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilonx,'String',[num2str(epsilonx)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilonx',epsilonx);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ylmax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtylmax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

```

```

[alphay,betay,gamay,epsilony]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilony,'String',[num2str(epsilony)]);
beamym= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilony',epsilony);


x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);


% --- Executes on slider movement.
function x1max_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to X1max (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%        get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);

```

```

set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilon_x]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilon_x,'String',[num2str(epsilon_x)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilon_x',epsilon_x);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ylmax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtylmax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

[alphay,betay,gamay,epsilon_y]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilon_y,'String',[num2str(epsilon_y)]);
beamy= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilon_y',epsilon_y);

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);

```

```

y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);

% --- Executes on slider movement.
function phix_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to phix (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fgchor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxlmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilon]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilon,'String',[num2str(epsilon)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilon',epsilon);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ylmax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);

```

```

axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtymax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphi,'String',[num2str(yphi)]);

[alphay,betay,gamay,epsilony]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilony,'String',[num2str(epsilony)]);
beamx= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilony',epsilony);

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamx(1,1);
y12=beamx(1,2);
y21=beamx(2,1);
y22=beamx(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);

% --- Executes on slider movement.
function ymax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ymax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%        get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;

```

```

xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilonx]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilonx,'String',[num2str(epsilonx)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilonx',epsilonx);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtymax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

[alphay,betay,gamay,epsilony]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilony,'String',[num2str(epsilony)]);
beamy= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

```

```

assignin('base','epsilony',epsilony);

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);

% --- Executes on slider movement.
function phiy_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to phiy (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxlmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilonx]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilonx,'String',[num2str(epsilonx)]);

```

```

beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilonx',epsilonx);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ylmax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtylmax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

[alphay,betay,gamay,epsilony]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilony,'String',[num2str(epsilony)]);
beamx= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilony',epsilony);

x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);

% --- Executes on slider movement.
function ylimax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ylimax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```



```

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%      get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of slider

global E Eo A Z ion
%Horizontal
xa=( get(handles.xmax,'Value'))*10;
xb=( get(handles.xlmax,'Value'))*10;
xphi=( get(handles.phix,'Value'));
[ex,exl]=ellipse(xa,xb,xphi);
axes(handles.fighor);
plot(ex,exl,'b','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtxmax,'String',[num2str(xa)]);
set(handles.txtxlmax,'String',[num2str(xb)]);
set(handles.txtphix,'String',[num2str(xphi)]);

[alphax,betax,gamax,epsilonx]=courantsnyder(xa,xb,xphi);

set(handles.txtalphax,'String',[num2str(alphax)]);
set(handles.txtbetax,'String',[num2str(betax)]);
set(handles.txtgamax,'String',[num2str(gamax)]);
set(handles.txtepsilonx,'String',[num2str(epsilonx)]);
beamx= [[ betax -alphax];[-alphax gamax] ];
assignin('base','epsilonx',epsilonx);

%Vertical
ya=( get(handles.ymax,'Value'))*10;
yb=( get(handles.ylmax,'Value'))*10;
yphi=( get(handles.phiy,'Value'));
[ey,eyl]=ellipse(ya,yb,yphi);
axes(handles.figver);
plot(ey,eyl,'r','LineWidth',1.5);
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
set(handles.txtymax,'String',[num2str(ya)]);
set(handles.txtylmax,'String',[num2str(yb)]);
set(handles.txtphiy,'String',[num2str(yphi)]);

```

```

[alphay,betay,gamay,epsilony]=courantsnyder(ya,yb,yphi);

set(handles.txtalphay,'String',[num2str(alphay)]);
set(handles.txtbetay,'String',[num2str(betay)]);
set(handles.txtgamay,'String',[num2str(gamay)]);
set(handles.txtepsilony,'String',[num2str(epsilony)]);
beamx= [[ betay -alphay];[-alphay gamay] ];

assignin('base','epsilony',epsilony);


x11=beamx(1,1);
x12=beamx(1,2);
x21=beamx(2,1);
x22=beamx(2,2);

y11=beamy(1,1);
y12=beamy(1,2);
y21=beamy(2,1);
y22=beamy(2,2);
B0=[[x11 x12 0 0];[x21 x22 0 0];[0 0 y11 y12];[0 0 y21 y22]];
assignin('base','B0',B0);


function particle_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to unitgroup (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

global E Eo A Z ion

if (hObject == handles.RB1)
    set(handles.TA, 'Visible', 'off');
    set(handles.TZ, 'Visible', 'off');
    E=str2double(get(handles.energia, 'String'))*1e6;
    if isnan(E)
        set(handles.energia, 'String', 1);
        errordlg('E must be a number','Error');
    end
    Eo=511e3;
    Z=1;
    A=1;
    ion=0;
    Bro=(A/(2.998e8*Z))*sqrt((E/A)^2+(2*E*Eo/A));
    assignin('base','E',E);
    assignin('base','Bro',Bro);
end

```

```

if (hObject == handles.RB2)
    set(handles.TA, 'Visible', 'off');
    set(handles.TZ, 'Visible', 'off');
    E=str2double(get(handles.energia, 'String'))*1e6;
    if isnan(E)
        set(handles.energia, 'String', 1);
        errordlg('E must be a number','Error');
    end
    Eo=938.2e6;
    Z=1;
    A=1;
    ion=0;
    Bro=(A/(2.998e8*Z))*sqrt((E/A)^2+(2*E*Eo/A));
    assignin('base','E',E);
    assignin('base','Bro',Bro);
end

if (hObject == handles.RB3)
    set(handles.TA, 'Visible', 'on');
    set(handles.TZ, 'Visible', 'on');
    E=str2double(get(handles.energia, 'String'))*1e6;
    if isnan(E)
        set(handles.energia, 'String', 1);
        errordlg('E must be a number','Error');
    end
    Eo=938.2e6;
    ion=1;
    A = round(str2double(get(handles.TA, 'String')));
    Z = round(str2double(get(handles.TZ, 'String')));

    if isnan(A)
        set(handles.TA, 'String', 1);
        errordlg('A must be a number','Error');
    end
    if isnan(Z)
        set(handles.TZ, 'String', 1);
        errordlg('Z must be a number','Error');
    end

    Bro=(A/(2.998e8*Z))*sqrt((E/A)^2+(2*E*Eo/A));
    assignin('base','E',E);
    assignin('base','Bro',Bro);
end

% --- Executes on button press in B1.
function B1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to B1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```
global E Eo A Z ion
```

```
E=str2double(get(handles.energia, 'String'))*1e6;
if isnan(E)
    set(handles.energia, 'String', 1);
    errordlg('E must be a number','Error');
end
if (ion==1)
    A = round(str2double(get(handles.TA, 'String')));
    Z = round(str2double(get(handles.TZ, 'String')));

    if isnan(A)
        set(handles.TA, 'String', 1);
        errordlg('A must be a number','Error');
    end
    if isnan(Z)
        set(handles.TZ, 'String', 1);
        errordlg('Z must be a number','Error');
    end
else
    A=1;
    B=1;
end
Bro=(A/(2.998e8*Z))*sqrt((E/A)^2+(2*E*Eo/A));
assignin('base','E',E);
assignin('base','Bro',Bro);
```

```
%*****
%***** Functions creation *****
%*****
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function xmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to xmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%      'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function xlmx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Xlmx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%       'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function phix_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to phix (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%       'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ylmx_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ylmx (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%       'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ymax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ymax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%       'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function phiy_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to phiy (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background, change
%       'usewhitebg' to 0 to use default. See ISPC and COMPUTER.
usewhitebg = 1;
if usewhitebg
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function TA_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TA (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TA as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TA as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TA_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TA (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TZ_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TZ (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TZ as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TZ as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TZ_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TZ (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function energia_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to energia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of energia as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of energia as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function energia_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to energia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if      ispc      &&      isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))

```

```

    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function B1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to energia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function particle_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to energia (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

2) plotbeam

```

function plotbeam(B);
%Cria um par de gráficos para a visualização das elipses de feixe a partir de uma
%matriz 4x4 de um feixe B

[ax,bx,cx]=courantsnyderinv(B,1);
[Xx,Yx]=ellipse(ax,bx,cx);

[ay,by,cy]=courantsnyderinv(B,2);
[Xy,Yy]=ellipse(ay,by,cy);

% Inicial
B0 = evalin('base','B0');

[ax0,bx0,cx0]=courantsnyderinv(B0,1);

```



```

[Xx0,Yx0]=ellipse(ax0,bx0,cx0);

[ay0,by0,cy0]=courantsnyderinv(B0,2);
[Xy0,Yy0]=ellipse(ay0,by0,cy0);

clf reset;
subplot(1,2,1);
plot(Xx0,Yx0,'b:');
set(gca,'DataAspectRatio',[1 2 1])
hold on;
grid on;
xlim([-5 5]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('x (mm)');
ylabel('x"(mrad)');
title('Horizontal','FontSize',12);
plot(Xx,Yx,'b');

subplot(1,2,2);
plot(Xy0,Yy0,'r:');
set(gca,'DataAspectRatio',[1 2 1])
hold on;
grid on;
xlim([-5 5]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('y (mm)');
ylabel('y"(mrad)');
title('Vertical','FontSize',12);
plot(Xy,Yy,'r');

```

figura C.2 - Tela típica da chamada da função *plotbeam*

3) beamdriftevol

```
function beamdriftevol(Lmax,step,Bin)
% gera um variavel MOV
% que contem a evolucao de um feixe
% em um drift
% Lmax é o comprimento do drift em [m]
% Step é o passo em que a evolucao é calculada em [m]
% Bin é o Feixe que se deseja evoluir;

epsilon_x = evalin('base','epsilon_x');
epsilon_y = evalin('base','epsilon_y');

%step=0.05(5cm)
i=1;
for l=0:step:Lmax
    D=drift(l);
    Bout=D*Bin*D';
    [Ax,Bx,Cx]=courantsnyderinv(Bout,1);
    [Ay,By,Cy]=courantsnyderinv(Bout,2);
    elipseevol(i,:)=[Ax];[Bx];[Cx];[Ay];[By];[Cy];[l];
    i=i+1;
end;

assignin('base','mov',elipseevol);
```

4) playmov

Cria uma janela para a visualização de uma sequência de elipse registradas na variável MOV. Geralmente essa função é chamada após o comando **beamdriftevol**. A figura C.3 mostra uma tela típica dessa função.

figura C.3 - Telatípica da chamada da função PLAYMOV

```
function varargout = playmov(varargin)
% PLAYMOV M-file for playmov.fig
%   PLAYMOV, by itself, creates a new PLAYMOV or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = PLAYMOV returns the handle to a new PLAYMOV or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   PLAYMOV('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in PLAYMOV.M with the given input
%   arguments.
%
%   PLAYMOV('Property','Value',...) creates a new PLAYMOV or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before playmov_OpeningFunction gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to playmov_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.

% Edit the above text to modify the response to help playmov

% Last Modified by GUIDE v2.5 05-Jul-2005 11:08:24

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
```

```

        'gui_OpeningFcn', @playmov_OpeningFcn, ...
        'gui_OutputFcn', @playmov_OutputFcn, ...
        'gui_LayoutFcn', [] , ...
        'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before playmov is made visible.
function playmov_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to playmov (see VARARGIN)

mov = evalin('base','mov');

i=1;
    axes(handles.fighor);
    cla;
    A=mov(i,1);
    B=mov(i,2);
    C=mov(i,3);
    [Xx,Yx]=ellipse(A,B,C);
    plot(Xx,Yx,'b');
    grid on;
    xlim([-10 10]);
    ylim([-10 10]);
    set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
    set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
    set(gca,'GridLineStyle','-');
    xlabel('x (mm)');
    ylabel('x"(mrad)');

    axes(handles.figver);
    cla;
    A=mov(i,4);
    B=mov(i,5);
    C=mov(i,6);
    [Xy,Yy]=ellipse(A,B,C);

```

```

plot(Xy,Yy,'r');
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('y (mm)');
ylabel('y"(mrad)');

% Choose default command line output for playmov
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes playmov wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = playmov_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

mov = evalin('base','mov');
[m,n]=size(mov);

for i=1:m
    axes(handles.fighor);
    cla;
    A=mov(i,1);
    B=mov(i,2);
    C=mov(i,3);
    [Xx,Yx]=ellipse(A,B,C);
    plot(Xx,Yx,'b');

```

```

grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('x (mm)');
ylabel('x"(mrad)');

axes(handles.figver);
cla;
A=mov(i,4);
B=mov(i,5);
C=mov(i,6);
[Xy,Yy]=ellipse(A,B,C);
plot(Xy,Yy,'r');
grid on;
xlim([-10 10]);
ylim([-10 10]);
set(gca,'XTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'YTick',[-10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 6 8 10]);
set(gca,'GridLineStyle','-');
xlabel('y (mm)');
ylabel('y"(mrad)');
pause(0.0001);

L=mov(i,7);
set(handles.lengthtxt,'String',[num2str(L)]);

end

```

5) plotbeam

```

function M=dadosinptrace(B);
% Gera os dados de entrada para o PTRACE
% a partir de um feixe B (matriz de Twiss 4x4)

[ax,bx,phyx]=courantsnyderinv(B,1);
[ay,by,phyy]=courantsnyderinv(B,-1);

[Xx,Yx]=ellipse(ax,bx,phyx);
[Xy,Yy]=ellipse(ay,by,phyy);

Xx=Xx';
Yx=Yx';
Xy=Xy';
Yy=Yy';
Xx=Xx./10;

```

```
Xy=Xy./10;  
M=[Xx Yx Xy Yy];
```

6) envelope

```
%Cria um par de vetores contendo os valores dos envelopes  
% horizontal e vertical  
  
EnvX(1)=sqrt(B0(1,1)*epsilon_x);  
EnvY(1)=sqrt(B0(3,3)*epsilon_y);  
  
for i=1:length(B)  
    betax=B(1,1,i);  
    betay=B(3,3,i);  
    EnvX(i+1)=sqrt(betax*epsilon_x);  
    EnvY(i+1)=sqrt(betay*epsilon_y);  
end;  
  
clear betax  
clear betay  
clear i  
  
plot(EnvX,'b');  
hold on;  
plot(EnvY,'r');  
xlabel('número do elemento');  
ylabel('amplitude do envelope (mm)');  
grid on;  
xlim([0 65]);  
legend({'horizontal','vertical'},'Position',[0.1383 0.7988 0.2036 0.1]);
```


Apêndice D

Arquivos de simulação das linhas de inserção e extração

Inserção com $E=2,5$ MeV:

```
D=dipole(45,.1637,0,0);
QD1=quadrupole(3.5,5e-2,-1);
QD2=quadrupole(3.5,5e-2,-1);
LD=drift(.10);

D3=dipole(-10,.573,10,10);
D4=dipole(-160,.061405,-10,-10);
D5=dipole(-10,.573,10,10);
D6=dipole(-180,.061405,0,0);

L1=drift(1);
L2=drift(.30);
L3=drift(.138);
L4=drift(.20);
L5=drift(.30);
L6=drift(.20);
L7=drift(.2);
L8=drift(.3);
L9=drift(.5);
L10=drift(1);
L11=drift(1);
L12=drift(.2285686);
L13=drift(.4934);
L14=drift(.4934);
L15=drift(.4934);
L16=drift(.4934);
L17=drift(.4934);
L18=drift(1.2868);
L19=drift(0.3477477);
L20=drift(0.30);
L21=drift(1.0);
L22=drift(0.2249136);
```

```

Q1= quadrupole(5.0,10e-2,+1);
Q2= quadrupole(2.7,10e-2,+1);
Q3= quadrupole(3.0,10e-2,+1);
Q4= quadrupole(5.5,10e-2,-1);
Q5= quadrupole(2.0,10e-2,+1);
Q6= quadrupole(2.6,10e-2,-1);
Q7= quadrupole(4.0,10e-2,-1);
Q8= quadrupole(4.0,10e-2,+1);
Q9= quadrupole(6.0,10e-2,+1);
Q10=quadrupole(6.0,10e-2,+1);


S1=sol(+0.052,0.30);
S2=sol(-0.052,0.30);
%
S3=sol(+0.040,0.30);
S4=sol(-0.040,0.30);
S5=sol(+0.040,0.30);
S6=sol(-0.040,0.30);


S8=sol(+0.051,0.30);
S9=sol(-0.051,0.30);


% *** Elementos do caminho de retorno tal como estão no PTRACE
LRPA=drift(.234251);
LRPB=drift(.20);
LRPC=drift(.20);
QRPA=quadrupole(2.9,5e-2,-1);
QRPB=quadrupole(2.6,5e-2,+1);


% LINHA

%*****1*****5*****10*****15*****20****
*****25*****30*****35*****40*****
*****45*****50*****55*****60*****
**
linha= [L1 Q1 L2 D LD QD1 LD D L3 Q2 L4 Q3 L4 Q4 L3 D LD QD2 LD D L5 Q5
L6 Q6 L7 Q7 L8 Q8 L9 S1 L10 S2 L11 Q9 L12 D3 L13 Q10 L14 S3 L15 S4 L16 S5
L17 S6 L18 D4 L19 D5 L20 S8 L21 S9 L22 D6 LRPA QRPA LRPB QRPB LRPC];
%
%*****
*****
*****
**

```

```

[m,n]=size(linha);
n=n/4;

Bm=B0;
for j=0:n-1
    i=j*4;
    M=[[linha(1,1+i) linha(1,2+i) linha(1,3+i) linha(1,4+i)];[linha(2,1+i) linha(2,2+i)
linha(2,3+i)        linha(2,4+i)];[linha(3,1+i)        linha(3,2+i)        linha(3,3+i)
linha(3,4+i)];[linha(4,1+i) linha(4,2+i) linha(4,3+i) linha(4,4+i)]];
    Bm=M*Bm*M';
    B(:,j+1)=Bm;
end

for i=50:(length(linha)/4)
    figure(i)
    plotbeam(B(:,i));
end

envelope

clear m
clear n
clear i
clear j
clear Bm

M=dadosinptrace(B(:,:(length(linha)/4)));

```

Inserção com $E=4,9$ MeV:

```

D3=dipole(-10,0.573,0,0);
D4=dipole(-160,0.1231,-10,-10);
D5=dipole(-10,0.573,0,0);
D6=dipole(-180,0.1231,0,0);

L10=drift(0.8382248);
L11=drift(1);
L12=drift(.2285686);
L13=drift(.4934);
L14=drift(.5934);
L15=drift(.6934);
L16=drift(.6934);
L17=drift(.6934);

```

```

L18=drift(1.38645);
L19=drift(0.3477477);
L20=drift(0.20);
L21=drift(0.3);
L22=drift(0.3);
L23=drift(1.0249136);

Q1= quadrupole(3.7,10e-2,-1);
Q2= quadrupole(3.0,10e-2,+1);
Q3= quadrupole(3.6,10e-2,-1);
Q4= quadrupole(4.5,10e-2,+1);
Q5= quadrupole(3.6,10e-2,-1);
Q6= quadrupole(3.0,10e-2,+1);
Q7= quadrupole(3.5,10e-2,-1);

QE1=quadrupole(2.5,10e-2,+1);
QE2=quadrupole(2.0,10e-2,-1);
QE3=quadrupole(2.1,10e-2,+1);

% *** Elementos do caminho de retorno tal como estão no PTRACE
LRPA=drift(.234251);
LRPB=drift(.20);
LRPC=drift(.20);
QRPA=quadrupole(2.9,5e-2,-1);
QRPB=quadrupole(2.6,5e-2,+1);

% LINHA

%*****1*****5*****10*****15*****
*****20*****25*****30*****
linha= [L10 Q1 L11 Q2 L12 D3 L13 Q3 L14 Q4 L15 Q5 L16 Q6 L17 Q7 L18 D4 L19
D5 L20 QE1 L21 QE2 L22 QE3 L23 D6 LRPA QRPA LRPB QRPB LRPC]; %
%*****
*****

[m,n]=size(linha);
n=n/4;

Bm=B0;
for j=0:n-1
    i=j*4;

```

```

    M=[[linha(1,1+i) linha(1,2+i) linha(1,3+i) linha(1,4+i)];[linha(2,1+i) linha(2,2+i)
linha(2,3+i)        linha(2,4+i)];[linha(3,1+i)        linha(3,2+i)        linha(3,3+i)
linha(3,4+i)];[linha(4,1+i) linha(4,2+i) linha(4,3+i) linha(4,4+i)]];
    Bm=M*Bm*M';
    B(:,j+1)=Bm;
end

for i=1:(length(linha)/4)
    figure(i)
    plotbeam(B(:,i));
end

clear m
clear n
clear i
clear j
clear Bm

M=dadosinptrace(B(:,:(length(linha)/4)));

```

Extração:

```

DE1=dipole(-10,0.2865,0,0);
DP=dipole(-160,0.9108,-10,-10);           %mudar raio de curvatura conforme o numero
da volta
DE2=dipole(25,0.2292,0,0);
DLEx=dipole(-35,0.3274,0,0);

LE1=drift(0.2589);
LE2=drift(0.3274);
LE3a=drift(0.1666);
LE3b=drift(0.4579);
LE3c=drift(0.4629);
LEx=drift(0.300);

QE1= quadrupole(1.7,10e-2,-1);
QE2= quadrupole(2.4,10e-2,-1);

% LINHA

```

```

%*****1*****5*****10*****
linha= [DE1 LE1 DP LE2 DE2 LE3a QE1 LE3b QE2 LE3c DLEx LEx];%
%*****

[m,n]=size(linha);
n=n/4;

Bm=B0;
for j=0:n-1
    i=j*4;
    M=[[linha(1,1+i) linha(1,2+i) linha(1,3+i) linha(1,4+i)];[linha(2,1+i) linha(2,2+i)
linha(2,3+i) linha(2,4+i)];[linha(3,1+i) linha(3,2+i) linha(3,3+i)
linha(3,4+i)];[linha(4,1+i) linha(4,2+i) linha(4,3+i) linha(4,4+i)]];
    Bm=M*Bm*M';
    B(:,j+1)=Bm;
end

for i=1:(length(linha)/4)
    figure(i)
    plotbeam(B(:,i));
end

clear m
clear n
clear i
clear j
clear Bm

```

Apêndice E

Manual do programa DipCalc

DipCalc 1.1

Welcome to DipCalc

DipCalc is a calculation tool to help dipole magnets designers to calculate some of its parameters, such as curvature radius, deflection angle, magnet length and magnetic field.

DipCalc also provides fringe field correction calculation for the deflection angle, the curvature radius and the magnetic field.

DipCalc can estimate the total current for the design magnet as well as an estimate for the coil cross section.

Copyright information

DipCalc is a freeware software and can be used freely for non-commercial purposes.

The author asks users to register (for control purposes) sending an e-mail to:

mllopes@if.usp.br

Overview

DipCalc is basically divided in three parts:

- **Particle type:** is where you define what kind of particle will be considered in the calculations
- **Main dipole parameters:** is where you define the main geometric parameters such as angle, length and curvature radius of the magnet, and the magnetic field necessary to bend the particles of the beam.
- **Gap Calculation:** when the gap box is checked is possible to make calculations involving the gap of the magnet:
 - Fringe field correction: allows DipCalc to perform the geometric corrections, necessary when you consider the fringe field effect.
 - Coil parameters: allows DipCalc to estimate the total current and the coil cross section geometry.

The “Run” button make the DipCalc perform all the calculations.

Particle type

Particle type

☒ electrons
☐ protons
☐ ions

Z 1
A 1

Energy 30 MeV

Particle type

Atomic Number (Z) and Atomic Mass (A)

Particle Kinetic Energy

In DipCalc you can choose between electrons, protons and ions. In the case you choose ions you have to give the Atomic Number (Z) and the Atomic Mass (A) of the ion.

NOTE: Atomic Mass must be an integer number.

You have also to provide de particle Kinetic Energy (in MeV).

Main dipole parameters

Independent parameters Angle & Length

Angle 15 degrees rad mrad

Length 100 m cm mm

Curvature radius 0 m cm mm

Magnetic field 0 T kG G

Angle

Length

Curvature radius

Magnetic field

Independent parameters choice

Units change

In this part DipCalc is divided in 3 boxes. Each one corresponds to one of the geometric parameters of the magnet, plus one box that corresponds to the magnetic field (see figure below).

The parameters are related by the following equations:

$$L = \theta.R$$

$$B.R = \frac{A}{c.Z} \left[\left(\frac{E}{A} \right)^2 + 2 \left(\frac{E}{A} \right) E_o \right]^{1/2} \quad (1)$$

where:

L is the length

θ is the angle

R is the radius in the homogeneous magnetic field region

B is the magnetic field

A is the atomic mass

Z is the atomic number

c is the speed of light

E_o is the rest energy of the particle

As you can see, there are 4 main parameters (θ , L , R and B) and 2 equations, giving 2 degrees of freedom. Those degrees of freedom are the independent parameters that you can choose from the combo box.

Once you have chosen the independent parameters, simply enter their values in the edit boxes.

¹ for more information please refer to "The optics of dipole magnets – John J. Livingood, Academic Press, 1969"

NOTE: The independent parameters cannot be equal to zero.

You can change the calculations using more convenient units. To do that just click in the unit you want, that DipCalc performs the conversion.

Press the Run button to perform the calculation.

Gap calculations

☒ Gap 24 mm

Fringe field correction
☒ Long tail
☐ Short tail

Angle 0.0 graus
Curvature radius 0.0 m
Magnetic field 0.0 T

Coil parameters
☒ N.I 0.0 A
J 2 A/mm²
A 0.0 mm
B 0.0 mm
☐ Rectangular area

DipCalc can perform additional calculations, such as fringe field corrections and coil parameters estimate. To do that, just check the box called Gap.

Fringe fields corrections

Fringe field correction

☒ ☐ Long tail
☐ Short tail

Angle graus

Curvature radius m

Magnetic field T

When this feature is checked, DipCalc enables fringe field calculation. See figure bellow.

The fringe field is responsible for bending the particle beam outside the magnet region (see figure below).

To avoid higher order focusing effect is desirable that the beam reaches the magnet orthogonally to its pole face, so it is necessary to decrease the magnet construction angle. As far as the magnet length is fixed, the curvature radius and the magnetic field also change⁽²⁾.

You can choose between two types of the fringe field distributions: short tail and long tail. The field distribution type depends basically on the geometry of the chosen coils⁽³⁾.

² for more information please refer to “Dipolos magnéticos da linha de transporte do microtron – Mauricio L. Lopes, MSc dissertation, IFUSP, 2002”

³ for more information please refer to “Focusing of charged particles, Albert Septier (editor), Vol 2, Academic Press, 1967 (Deflecting Magnets, Harald A. Enge)”

Coil parameters estimative

Coil parameters

☒ $N.I$ 0.0 A

J 2 A/mm²

A 0.0 mm

B 0.0 mm

☐ Rectangular area

DipCalc can estimate the total current ($N.I$) necessary to generate the magnetic field using the following formula:

$$N.I = \frac{B.h}{\mu_o}$$

where:

- $N.I$ is the total current (Amp turns)
- B is the magnetic field
- h is the gap length
- μ_o is the magnetic permeability of the vacuum

NOTE: The magnetic field used in this calculation is that given in the magnetic field edit box in the independent parameter.

With the total current is possible to estimate the coil cross section, using the formula:

$$S = \frac{N.I}{J}$$

where:

- S is the cross section
- J is the current density

The current density (J) is usually adopted between 2 and 3 A/mm² for common wire coils and could be up to 5 A/mm² for cooled coils.

With the cross section DipCalc estimate the width (A) and the height (B) of the coil. When the rectangular area box is checked you can enter the width (A) of the coil, otherwise DipCalc considers:

$$A = B = \sqrt{S}$$

Bug reporter

To report a bug in DipCalc, please send an e-mail to the author:

mllopes@if.usp.br

Updates

Check for DipCalc updates at:

<http://axpfep1.if.usp.br/~mllopes>

Referências Bibliográficas

- [1] J. Takahashi, Y. Miyao, M.N. Martins, J.M. Machado, A.A. Malafronte, J.C.A. Alcon, J. Marini Jr., A. Bonini, "The IFUSP racetrack microtron", Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference, editado por H. Henke e P.J. Genaz, Editions Frontières, França, (1992)
- [2] M.N. Martins, *et al.*, "Tagged bremsstrahlung polarization: a Monte Carlo approach", Nucl. Instrum. and Methods A390, 375-382 (1997);
- [3] R. Guarino, "Adaptação e calibração do monocromador de fótons do LAL", Dissertação de Mestrado, IFUSP, (1998)
- [4] V.B. Gavrikov, *et al.*, "Features of spectral-angular distribution of coherent X-radiation", Braz. J. Phys. 29, 516-523 (1999)
- [5] P. B. Rios, "Linha de transporte de feixe do acelerador microtron do IFUSP", Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo (2002)
- [6] V. I. Veksler, Proc. USSR Acad. Sci. 43, 346 (1944)
- [7] J. J. Livingood, "Principles of Cyclic Particle Accelerators", D. Van Nostrand Company Inc. (1961)
- [8] H. R. Froelich e E. Brannen, IEEE Trans. MTTT-11, No 5, 1962 (1963)
- [9] L. I. Schiff, Review Sci. Instr. 17,6 (1946)
- [10] R. E. Rand, "Recirculating Electron Accelerators", harwood academic publishers (1984)
- [11] K-H. Kaiser, comunicação pessoal, 2003
- [12] H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics, vol I", Springer, 2nd edition (1998)
- [13] A. W. Chao, M. Tigner, "Accelerator Physics and Engineering", World Scientific (1999)
- [14] E. Wilson, "An Introduction to Particle Accelerators", Oxford University Press (2001)
- [15] K-H. Kaiser, Comunicação pessoal, 2003
- [16] J. Takahashi, "Projeto e construção de uma estrutura aceleradora de elétrons de onda contínua", Tese (Doutorado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo (1997)
- [17] M. V. Figueredo – "Projeto, construção e teste de uma rede de microondas para alta potência", Tese de doutorado do Instituto de física da Universidade de São Paulo, 2002
- [18] M.N. Martins et al – "How to fix a Thomson TH2075 Klystron with vacuum problems without spending a lot of money" - Proceedings of EPAC 2002, Paris, France
- [19] S. Cohen, "Notes for PTRACE users", Atenas, Grécia: IASA Internal note, 1997.
- [20] M. L. Lopes, M. Martins, P. B. Rios, J. Takahashi, "The IFUSP microtron new configuration", Proceedings of PAC, Knoxville, Tennessee - USA (2005)
- [21] M. L. Lopes, A. Malafronte, M. Martins, J. Takahashi, K-H Kaiser, "Design of the end magnets for the IFUSP main Microtron", Proceedings of EPAC (2004)

- [22] L.R.P. Kassab, J. Takahashi, M.N. Martins and P. Gouffon, "The design of main racetrack microtron accelerator end magnets of the Institute of Physics of University of São Paulo", Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams, Volume 2, 032401 (1999)
- [23] D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, 2001, <http://femm.berlios.de/>
- [24] M. L. Lopes, A. Malafronte, M. Martins, J. Takahashi, K-H Kaiser, "Design of the end magnets for the IFUSP main Microtron", Proceedings of EPAC (2004)
- [25] L. R. P. Kassab, "Projeto, construção e teste de um conjunto de bobinas corretoras para homogeneização do campo de um ímã dipolar", Dissertação (mestrado), IFUSP (1987)
- [26] P. Elleaume, O. Chubar and J. Chavanne, "Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices", Proceedings of PAC, Vancouver, Maio (1997)
- [27] Mathematica, <http://www.wolfram.com/>, 2005
- [28] Vector Fields, <http://www.vectorfields.com/files/html/products/opera3d.html>
- [29] H. Babic, M. Sedlacek, "A Method for stabilizing particle orbits in race-track microtron", Nuclear Instrumentation Methods 56 (1967) 170-172
- [30] Outokumpu Poricopper Oy, "Hollow conductors – List of tools", <http://www.outokumpu.com>
- [31] D.R. Lide – Editor, "CRC Handbook of chemistry and physics on CDROM" (2002)
- [32] J. Tanabe, "Accelerator Magnet Engineering" USPAS at Rice University (2001)
- [33] MATLAB, <http://www.mathworks.com/>, 2005
- [34] D.C. Carey, "TRANSPORT manual", Stanford, CA: Stanford Linear Accelerator Center, 1995. (SLAC-95-465)
- [35] F. Shimidt, "MAD user's guide", http://mad.home.cern.ch/mad/madx_manual.pdf
- [36] H. Billen, "PARMELA User's Manual", Los Alamos. Accelerator Code Group, LA-UR-96-1835
- [37] J. Takahashi – Comunicação pessoal, 2004
- [38] K. R. Spangenberg, Vacuum Tubes, McGraw-Hill Book Co., 1948
- [39] K. Wille, The physics of Particle Accelerators – an introduction, Oxford University press, 2000
- [40] M. L. Lopes, "Dipolos magnéticos da linha de transporte do microtron do IFUSP", Dissertação de mestrado, IFUSP (2002)
- [41] T. F. Silva, M. L. Lopes, A. A. Malafronte, P. B. Rios, J. Takahashi, M. Martins, "Magnetic Quadrupole Lenses for the IFUSP Microtron", Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Suíça.

"A bússola sempre aponta para o norte"

CIWALY