Universidade de São Paulo
Instituto de Física

Sintonia dos Parâmetros de Operação do Primeiro Estágio de Aceleração do Mícrotron do IFUSP

Cristiane Jahnke

Dissertação de mestrado apresentada
ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do título
de mestre em ciências

Orientador:
Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins

Comissão Examinadora:
Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins - IFUSP
Prof. Dr. Nemitala Added - IFUSP
Prof. Dr. Celso Fuhrmann - CTA

São Paulo
2012

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

Jahnke, Cristiane

Sintonia dos parâmetros de operação do primeiro estágio de aceleração do Microtron do IFUSP. - São Paulo, 2012.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Instituto de Física, Depto. Física Experimental

Orientador: Prof. Dr. Marcos Nogueira Martins.

Área de Concentração: Física Nuclear.

Unitermos: 1.Instrumentação (Física) ; 2. Acelerador de Partículas; 3. Física Nuclear.

USP/IF/SBI-024/2012

Resumo

O Laboratório do Acelerador Linear (LAL) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo está construindo um acelerador de elétrons do tipo Mícrotron. O acelerador possui dois estágios de aceleração: o Mícrotron *booster* e o Mícrotron Principal. Atualmente, o sistema injetor do acelerador, que é um acelerador linear, dispõe de um feixe de elétrons de 1,9 MeV. Este feixe será inserido no primeiro estágio de aceleração, o Mícrotron *booster*, que já está construído e será testado em breve. Sua função é elevar a energia do feixe para 5 MeV.

O objetivo deste trabalho é o de otimizar os parâmetros de operação do Mícrotron *booster* por meio de simulação. Também tivemos como objetivo estudar a viabilidade da adaptação do projeto original, com feixe de entrada de 1,765 MeV, para um feixe de entrada de 1,9 MeV. Tendo como foco principal encontrar a admitância do acelerador, foram desenvolvidas algumas rotinas de simulação. A admitância do Mícrotron *booster* para um feixe de 1,765 MeV foi calculada em 3,08 πmm.mrad, 0,58 πmm.mrad e 0,38 πkeV.rad para os espaços de fase horizontal, vertical e longitudinal, respectivamente. Para o feixe de 1,9 MeV, uma condição de aceleração foi encontrada e os valores de admitância foram 3,65 πmm.mrad, 0,62 πmm.mrad e 0,77 πkeV.rad para os mesmos espaços de fase. Dados de caracterizações do feixe, realizados em trabalhos anteriores foram utilizados para determinar a configuração das lentes quadrupolares responsáveis pela inserção do feixe no acelerador.

Tais simulações darão suporte ao início de operação do Mícrotron *booster*, auxiliando na determinação dos parâmetros iniciais de operação e otimização dos parâmetros finais.

Abstract

The Laboratório do Acelerador Linear is building a racetrack microtron electron accelerator. It has two acceleration stages: the booster and the main microtron. The injection system has already been commissioned and is delivering a 1.9-MeV continuous wave beam. This beam will be injected in the booster stage, which is ready to be commissioned, and should increase the energy to 5 MeV.

The aim of this work is to optimize the operation parameters of the booster stage by means of simulation tools. We also studied the feasibility of injecting the 1.9 MeV beam in the booster, which has been designed to operate with a 1.765 MeV beam.

Some simulation routines had to be developed in order to determine the admittance of the booster stage. For the 1.765 MeV beam the admittances were determined to be 3.08 πmm.mrad, 0.58 πmm.mrad, and 0.38 πkeV.rad for the transverse horizontal, transverse vertical, and longitudinal phase spaces, respectively. For the 1.9 MeV injection beam we were able to find a viable acceleration condition, with slightly better admittances: 3.65 πmm.mrad, 0.62 πmm.mrad, and 0.77 πkeV.rad, for the same phase spaces cited above.

The injection beam has been characterized previously, and the available data were used, in the simulation codes, to match the transverse beam emittances of the injector to the transverse beam admittances of the booster. The phase space manipulations were accomplished by tuning a quadrupole triplet placed before the booster entrance.

These simulations are intended as a supporting tool for the commissioning of the booster stage, helping the experimental determination of the working parameters and their optimization.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à Deus por ter me dado saúde, força e perseverança para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Gilda Timóteo Leite e Horst Reinhold Jahnke pelo carinho e amor ao longo de todos os anos da minha vida. Agradeço em especial à minha mãe, pelos momentos que eu passei longe de casa, devido à execução deste projeto. Com todo carinho, à ela dedico este trabalho.

Agradeço ao Viktor, meu irmão, meu ídolo, por ser tão companheiro desde os momentos famíliares até os relacionados à física. Com ele muito aprendi e sei que ainda tenho muito a aprender.

Agradeço ao Max, que apesar de ser um irmão um pouco mais distante, é muito querido e já me ensinou várias coisas de matemática.

À todo o resto da minha família por todos os momentos que passamos juntos.

Um agradecimento especial ao Tiago Fiorini da Silva por ser tão companheiro e por ter me ajudado muito na execução deste trabalho. Agradeço pela paciência, compreensão e carinho nos momentos mais difíceis. Agradeço por tudo que ele me ensinou, seja relacionado à física ou à minha vida pessoal. Agradeço por ele fazer parte da minha vida, deixando tudo mais simples e aconchegante. Agradeço também à sua família que sempre me tratou muito bem.

Um agradecimento especial para o meu orientador, Prof. Marcos Nogueira Martins, por ter me dado a oportunidade de desenvolver este trabalho. Agradeço todo apoio e confiança ao longo de todos estes anos.

Agradeço ao Bruno por ser meu grande amigo e estar sempre presente. Por todos os momentos que passamos juntos e por toda força em diversos momentos da minha vida. Por todos os "chás", "cafés"e principalmente por todas as risadas.

Agradeço as minhas amigas: Cely, Tati e Josi. Por todas as conversas, desabafos, e companheirísmo. Com elas eu sei que sempre posso contar e espero que saibam que também podem contar comigo. Agradeço à Alê, que mesmo de longe, ainda é uma grande amiga. Agradeço também à Joyce, que

além de uma grande amiga, é muito batalhadora e é um exemplo de vida para mim.

Agradeço aos meus amigos do IFUSP: Igino, Ícaro, LM, Lelas, Shock, Felipe, Felisberto, Thaís, Aline e Nathaly pela convivência e incentivo.

Agradeço ao Dr. Maurício Lima Lopes e Sr. Paulo Beolchi Rios, pelas dicas que me deram em relação ao PTRACE.

Ao Prof. Paulo Pascholati por todo apoio e por ter me dado oportunidade de ser sua monitora.

Ao Prof. Philipie Gouffon por me ajudar a conseguir verba para fazer um curso na USPAS e por ter me arrumado um computador super bom.

Ao Prof. Iberê Luiz Caldas e ao Wanderley por todas as conversas no café.

Ao corpo técnico do projeto Mícrotron: Alex Silva, Alexandre Malafronte, Alfredo Bonini, Luciano Portante, Marcelo Lucena e Roberto da Rocha Lima pela dedicação ao projeto Mícrotron. Em especial ao Alexandre, por todas as conversas em relação ao meu projeto e por ter me dado várias dicas e sanado algumas das minhas dúvidas. Também faço um agradecimento especial ao Roberto, por sempre estar pronto para me passar "medidas"do *booster*.

Agradeço também ao Renan de Assis por ter feito os desenhos das câmaras de vácuo.

Ao pessoal da eletrônica: Carlos, Eduardo e Renato.

Ao Sérgio Korogui que sempre me ajudou nas questões relacionadas à informática.

À Juliana e à Bianca, secretárias do LAL, pela colaboração e amizade.

Aos atendentes da Comissão de Pós-Graduação, pelo atendimento sempre gentil e prestativo.

Agradeço à todos os professores do LAL, por estarem sempre dispostos a ajudar os alunos.

E por fim, à FAPESP, ao CNPq e à CAPES pelo fundamental apoio financeiro.

Com todo o carinho dedico
este trabalho
à minha mãe
Gilda

"Se as coisas são inatingíveis, ora!
Não é motivo para não querê-las.
Que tristes seriam os caminhos se não fora
a presença distante das estrelas."
- Mário Quintana

Sumário

1 Introdução **1**
1.1 O projeto Mícrotron 1
1.2 O Mícrotron ***booster*** 3
1.3 Objetivos deste trabalho 5
1.4 Organização desta dissertação 6

2 Fundamentos **8**
2.1 O mícrotron 8
2.2 Partícula guia e o sistema de referência 11
2.3 Condições de estabilidade em mícrotrons convencionais 14
2.4 Condições de estabilidade em mícrotrons ***race-track*** 16
2.5 Mícrotrons fora de estabilidade 19
2.6 Espaço de fase, emitância e admitância 22

3 Metodologia das simulações **26**
3.1 Estudo do código PTRACE 27
3.2 Modificações no PTRACE 28
3.3 Simulações 30
3.3.1 Otimização da fase 31
3.3.2 Obtenção das trajetórias dentro dos dipolos 36
3.3.3 Obtenção da admitância 41
3.4 Conclusões do capítulo 45

4 Resultados das simulações **46**
4.1 Otimizações para o feixe de 1,765 MeV 47
4.1.1 Variação do campo magnético 48
4.1.2 Variação da fase 49
4.1.3 Mudança da distância entre o D3 e o IN 49
4.1.4 Variação da distância entre os eletroímãs principais . . 56
4.2 Otimizações para o feixe de 1,9 MeV 63
4.3 Conclusões do capítulo 68

5 Discussão **69**

6 Conclusões **76**

A Códigos desenvolvidos **78**
A.1 Roda PTRACEX 78
A.2 Otimiza fase 79
A.3 Roda partícula guia 80
A.4 Obtenção das trajetórias 81
A.5 Obtenção da admitância 86

B Arquivo de entrada comentado do PTRACE **89**

C Desenho da câmara de vácuo **98**

D Arquivo de entrada final para o feixe de 1,765 MeV **100**

E Arquivo de entrada final para o feixe de 1,9 MeV **105**

F Desenho da câmara de vácuo proposta **110**

Lista de Figuras

1.1 Vista isométrica do acelerador. 2
1.2 Desenho esquemático do *booster*. A distância entre os magnetos principais é 155,54 cm [1]. 4
1.3 Foto do Mícrotron *booster*. 6

2.1 Órbitas de um feixe de elétrons em um Mícrotron convencional [2]. 9
2.2 Diagrama esquemático do mícrotron *race-track* de quatro setores construído pela *University of Western Ontario* (1961) [3]. 10
2.3 Diagrama esquemático de um mícrotron *race-track*. 10
2.4 Sistemas de coordenadas de *Frenet-Serret*. 12
2.5 Mapa de estabilidade para o Mícrotron *booster*. As curvas mais próximas do eixo das abscissas indicam ganho de energia de 0,57 MeV e as mais distantes indicam 0,69 MeV. Os pontos pretos nas figuras indicam os valores definidos em projeto para o Mícrotron *booster*. 20
2.6 Desvio de fase em função da energia ganha por volta em um mícrotron. 22
2.7 Evolução do espaço de fase. 25

3.1 Comparação do espaço de fase longitudinal obtido com o PTRACE (esquerda) e com o PTRACEX (direita). 30
3.2 Fluxograma da rotina de otimização de fase. 33
3.3 Valores de χ^2 para cada fase testada (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada (abaixo). 34
3.4 Valores de χ^2 para cada fase testada na região onde ocorre um mínimo (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada na mesma região (abaixo). 34
3.5 Relação entre os desvios de fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta. 35

3.6 Valores de χ^2 para cada fase testada em uma situação em que não há fase ideal (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada (abaixo). 36
3.7 Dados brutos da curva realizada pela partícula guia dentro de um dos dipolos. A quebra na trajetória é devido à mudança de coordenadas realizada durante os cálculos. 37
3.8 Trajetória da partícula guia dentro de um dos dipolos, após a realização das transformações inversas de coordenadas. 38
3.9 Trajetória da partícula guia no projeto original. 39
3.10 Fluxograma da rotina de obtenção da admitância. 42
3.11 Comparação da admitância do *booster* encontrada por um Método de Monte Carlo (em vermelho) e por simulações de projeto do acelerador (região compreendida dentro da elipse azul) para os três espaços de fase. Na última figura são mostradas as dimensões transversais do feixe. 43
3.12 Gráfico de envelope do feixe simulado para Mícrotron definido em projeto. 44

4.1 Ampliação da trajetória da partícula guia para o acelerador definido em projeto, mostrando que a partícula passa muito próxima à tubulação tanto na injeção como na segunda volta. 48
4.2 Mudança da trajetória da partícula guia na injeção devido ao deslocamento do ímã D3 em relação ao IN. Para a trajetória vermelha, o D3 se encontra mais próximo do IN do que para a trajetória verde. 50
4.3 Mapeamento do campo do ímã D3. 51
4.4 Mapeamento do campo de borda do IN. 51
4.5 Ajuste de polinômio para o campo de borda do D3. 53
4.6 Ajuste de polinômio para o campo de borda do IN. 53
4.7 Sobreposição dos campos na região entre o D3 e o IN. 54
4.8 Valores finais de campo de borda efetivo para o D3 e o IN. . . 54
4.9 Valores de χ^2 para cada fase testada após aproximação dos eletroímãs D3 e IN. 55
4.10 Ampliação da trajetória da partícula guia para o acelerador após a modificação da distância entre o IN e o D3. 56
4.11 Valores de χ^2 para cada fase testada após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN. 57
4.12 Trajetória da partícula guia após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN. 58
4.13 Ampliação da trajetória da partícula guia após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN. 59

4.14 Admitância do *booster* após otimizações dos parâmetros para 1,765 MeV. 60
4.15 Comparação dos espaços de fase na entrada e saída do acelerador para 1,765 MeV. 60
4.16 Fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta para o feixe 1,765 MeV. 61
4.17 Oscilação síncrotron analisada na entrada da estrutura aceleradora. 62
4.18 Valores de χ^2 para cada fase testada para o feixe 1,9 MeV após otimizações. 64
4.19 Trajetória da partícula guia para o feixe de 1,9 MeV após otimizações. 65
4.20 Ampliação da trajetória da partícula guia para o feixe de 1,9 MeV após otimizações. 65
4.21 Admitância do *booster* após otimizações dos parâmetros para 1,9 MeV. 66
4.22 Comparação dos espaços de fase na entrada e saída do acelerador para 1,9 MeV. 66
4.23 Variação da fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta para o feixe de 1,9 MeV. 67

5.1 Espaço de fase do feixe no ponto de caracterização. 71
5.2 Desenho esquemático do *booster* e seus elementos de injeção. . 72
5.3 Casamento da emitância do injetor (região dentro das elipses) com a admitância do *booster* (região pontilhada). 73
5.4 Admitância longitudinal do *booster* e faixa de dispersão em energia do feixe do injetor. 74
5.5 Comparação da admitância do *booster* para a câmara proposta (azul) e para a câmara atual (vermelho). 75

C.1 Esquema da câmara de vácuo atual. 99

F.1 Esquema proposto para projeto de uma nova câmara de vácuo. 111

Lista de Tabelas

3.1 Elementos ópticos para o programa PTRACE. 28
3.2 Raios da câmara de vácuo do Mícrotron *booster*. 31
3.3 Ganho de energia previsto para cada volta. 32
3.4 Parâmetros do acelerador definido em projeto 33

4.1 Parâmetros do acelerador otimizados para 1,765 MeV. 57
4.2 Parâmetros do acelerador otimizados para 1,9 MeV. 64

5.1 Componentes da matriz de feixe propagados para a saída do *linac* injetor. 71
5.2 Parâmetros dos quadrupolos para inserção do feixe de 1,9 MeV. 72

6.1 Parâmetros finais de operação do *booster* e elementos de injeção para 1,9 MeV. 77

C.1 Medidas da câmara de vácuo 99

F.1 Medidas da câmara de vácuo proposta 111

Lista de Variáveis

α	Ângulo de rotação da face polar na entrada do magneto
β	Velocidade normalizada da partícula (Fator de Lorentz)
β_1	Valor de β na primeira volta
β_n	Valor de β na volta n
ΔE	Ganho de energia por volta
$\Delta E_{esperado,i}$	Ganho de energia esperado na volta i
ΔE_i	Ganho de energia na volta i
$\Delta P/P_0$	Desvio relativo do momento do feixe
Δp	Variação do momento entre órbitas consecutivas no mícrotron
ΔP_{zi}	Desvio do momento em z da partícula i em relação ao momento da partícula síncrona
Δr	Variação do raio de curvatura da partícula entre órbitas consecutivas no mícrotron
ΔT	Variação do período entre órbitas consecutivas no mícrotron
ϵ	Emitância
λ_{RF}	Comprimento de onda de radiofrequência
$\sigma_{0,11}$	Elemento (1,1) da matriz de feixe na horizontal
$\sigma_{0,12}$	Elemento (1,2) da matriz de feixe na horizontal
$\sigma_{0,22}$	Elemento (2,2) da matriz de feixe na horizontal
$\sigma_{0,33}$	Elemento (1,1) da matriz de feixe na vertical
$\sigma_{0,34}$	Elemento (1,2) da matriz de feixe na vertical
$\sigma_{0,44}$	Elemento (2,2) da matriz de feixe na vertical
ϕ	Atraso de fase em relação à fase da estrutura aceleradora
ϕ_0	Fase da partícula guia
φ	Ângulo de curvatura do dipolo
χ^2	Diferença quadrática entre o ganho de energia em teste e o ganho de energia previsto
ψ	Ângulo de rotação da face polar na saída do magneto
Ω	Relação entre o ângulo de curvatura e os ângulos de entrada e saída do dipolo
a	Número inteiro para a condição de estabilidade da

	primeira volta no *booster*
b	Número inteiro para a condição de estabilidade a partir da segunda volta *booster*
B	Campo magnético dos ímãs principais do mícrotron
B_0	Campo magnético ciclotrônico do elétron
B_x	Campo magnético na direção X
B_y	Campo magnético na direção Y
B_z	Campo magnético na direção Z
c	Velocidade da luz
e	Carga do elétron
E	Energia total do elétron
E_i	Energia cinética de injeção no mícrotron
E_1	Energia total do elétron na volta 1
L	Separação entre os ímãs principais do mícrotron
m	Massa do elétron
M	Matriz de transferência
n	Número da volta no mícrotron
p	Módulo do momento da partícula
P_x	Momento transversal horizontal de uma partícula do feixe
P_y	Momento transversal vertical de uma partícula do feixe
P_z	Momento longitudinal de uma partícula do feixe
P_0	Momento da partícula guia
R	Raio de curvatura do dipolo
s	Versor que aponta para a direção longitudinal do feixe
T_{RF}	Período da onda de radiofrequência
T	Período de revolução do elétron no mícrotron
v	Módulo da velocidade do elétron
v_1	Módulo da velocidade do elétron na primeira volta
r_1	Raio realizado pelo elétron na primeira volta
V_x	Velocidade na direção X de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
V_y	Velocidade na direção Y de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
V_z	Velocidade na direção Z de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
x	Posição transversal horizontal de uma partícula
x'	Divergência transversal horizontal de uma partícula do feixe
X	Coordenada cartesiana de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
X_0	Coordenada cartesiana inicial de uma partícula do feixe no referencial do laboratório

y	Posição transversal vertical de uma partícula
y'	Divergência transversal vertical de uma partícula do feixe
Y	Coordenada cartesiana de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
z	Posição longitudinal da partícula
z'	Divergência longitudinal da partícula
Z	Coordenada cartesiana de uma partícula do feixe no referencial do laboratório
Z_0	Coordenada cartesiana inicial de uma partícula do feixe no referencial do laboratório

Capítulo 1

Introdução

1.1 O projeto Mícrotron

O Laboratório do Acelerador Linear do Instituto de Física da USP (LAL-IFUSP) está construindo um acelerador de elétrons do tipo Mícrotron. O LAL optou por uma cascata de aceleradores, consistindo de um acelerador linear (*linac*) e dois aceleradores recirculados do tipo Mícrotron *race-track*. Este tipo de acelerador combina propriedades de um acelerador linear e um acelerador circular.

Neste acelerador, o feixe é produzido em um canhão de elétrons, com energia de 100 keV e 1 mA de corrente contínua. Depois de produzido, o feixe passa pelo sistema *chopper*, que é responsável por picotar o feixe de elétrons, e pelo sistema *buncher*, que é responsável por empacotar os elétrons. Ainda no sistema injetor, o feixe passa por uma estrutura aceleradora de β variável, que, em projeto, eleva a energia do feixe de 0,1 MeV para 0,765 MeV (β é o fator relativístico $\beta = v/c$). Em seguida, passa por outra estrutura aceleradora, que, em projeto, eleva a energia do feixe de elétrons para 1,765 MeV. Este estágio do acelerador já se encontra em funcionamento e medidas realizadas com o feixe após a segunda estrutura, determinaram uma energia de 1,909(5) MeV [4], superior ao que foi determinado em projeto.

O feixe será injetado no Mícrotron *booster*, cuja função é de elevar a energia do feixe a 5 MeV. O Mícrotron *booster* é constituído de uma estrutura

aceleradora de 78,65 cm de comprimento e β = 0,989 e dois eletroímãs de 180º com densidade de fluxo magnético de 0,0986 T. Ao sair do *booster*, o feixe será guiado para o salão experimental, por uma linha de transporte, ou pode ser inserido no segundo estágio de aceleração, chamado de Mícrotron Principal.

O Mícrotron Principal elevará a energia do feixe de 5 a 38 MeV. Este é constituído de uma estrutura aceleradora de β= 1 e 1,04 m de comprimento e dois eletroímãs com densidade de fluxo magnético de 0,16 T [5]. Neste estágio de aceleração, o feixe poderá ser extraído do acelerador em qualquer uma das 43 órbitas, fornecendo, assim, feixes com energias intermediárias, em passos de 0,77 MeV. Após o feixe ser extraído do Mícrotron Principal, ele será guiado ao salão experimental, onde haverá um monocromador de fótons e uma linha para experimentos de *bremsstrahlung*. Um layout do prédio do acelerador é mostrado na figura 1.1

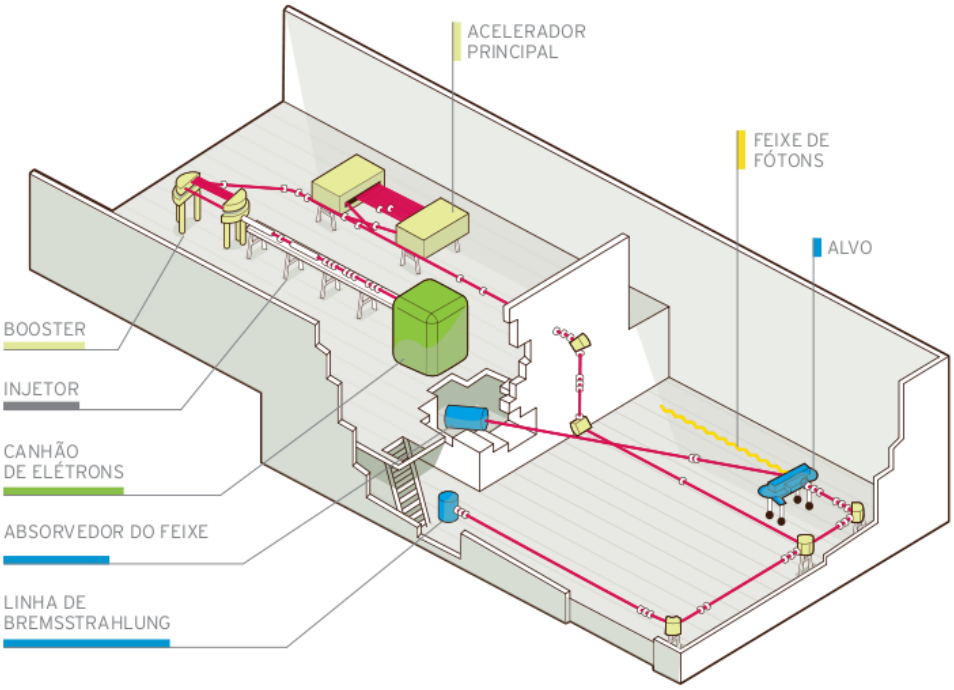

Figura 1.1: Vista isométrica do acelerador.

Tendo em vista que o feixe atualmente produzido pelo *linac* injetor é su-

ficientemente estável para realização de alguns experimentos, foi construída uma derivação na entrada do Mícrotron *booster*. A nova linha já está sendo usada para determinação da seção de choque de ionização da camada K, estudos sobre a seção de choque de produção de bremsstrahlung [6] e caracterizações do feixe utilizando ROT (Radiação Óptica de Transição) [7].

Em breve, pretende-se iniciar a operação com o Mícrotron *booster*, que já está construído e em fase de preparação para testes. Neste trabalho, pretende-se estudar este estágio, a fim de otimizar os parâmetros de operação deste acelerador.

A importância de se estudar um acelerador do tipo mícrotron consiste no fato de que este tipo de acelerador, além da utilização em pesquisa, possui diversas aplicações, tanto na medicina como em indústrias, em substituição aos aceleradores lineares, já que um mícrotron é mais compacto. Algumas aplicações são: inspeção de cargas de *containers* com detecção de composição elementar de seu conteúdo, produção de isótopos de vida curta, radioterapia, análise de objetos biológicos, produção de radionuclídeos, dentre outros [8], [9].

Independente da aplicação, é necessário otimizar os parâmetros da máquina, de maneira a se conseguir a operação mais efetiva possível do acelerador. Dentre os parâmetros a serem otimizados, estão: energia ganha por volta, campos magnéticos dos eletroímãs, distância entre os eletroímãs, etc. Ao se projetar um mícrotron, estes parâmetros são fixados de forma a satisfazerem as condições de estabilidade deste tipo de acelerador.

1.2 O Mícrotron *booster*

O Mícrotron *booster* é constituído de dois eletroímãs dipolares principais de 180°, um eletroímã dipolar de inserção de 15° e um de extração de 30°. Eletroímãs dipolares, também conhecidos como dipolos, são responsáveis por curvar o feixe. Os dipolos principais do *booster* possuem campo definido em projeto de 0,0986 T e são separados por uma distância de 155,54 cm. O dipolo de 15° (chamado de D3) possui um campo definido em projeto de 0,0157 T e é utilizado para deixar o feixe perpendicular ao eletroímã localizado no lado

Sul do laboratório (Ímã Sul - IS). O eletroímã D3 se faz necessário devido ao fato do feixe incidir no dipolo localizado no lado Norte do laboratório (Ímã Norte - IN) com um ângulo de 15°, conforme pode ser visto na figura 1.2. O *booster* também possui duas lentes (solenóides), responsáveis por focalizar o feixe antes e depois da estrutura aceleradora.

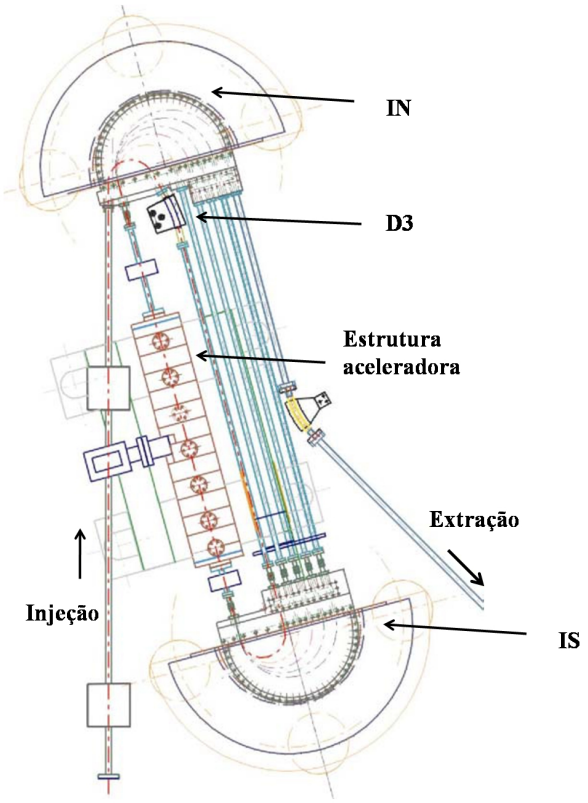

Figura 1.2: Desenho esquemático do *booster*. A distância entre os magnetos principais é 155,54 cm [1].

Uma estrutura aceleradora é um dispositivo que possibilita que uma onda eletromagnética tenha, no seu eixo, campo elétrico na direção axial e velocidade de fase regulável por construção. A estrutura aceleradora do Mícrotron *booster* possui 78,65 cm de comprimento e $\beta = 0{,}989$. Pelo fato de o feixe ser injetado no *booster* com energia baixa, os elétrons não podem ser acelerados por uma estrutura de β =1, pois não conseguiriam acompanhar a onda e, como consequência, não poderiam ser acelerados adequadamente [10]. Por este motivo foi escolhida uma estrutura de $\beta = 0{,}989$ para este estágio de ace-

leração. Devido ao valor de β, este estágio de aceleração não pode funcionar para feixes com energias superiores a 5 MeV, uma vez que um feixe de 5 MeV tem $\beta = 0{,}996$, maior do que da onda, fazendo com que os elétrons comecem a sair da fase de aceleração. Por esta razão, este estágio de aceleração possui apenas 5 voltas.

Ao se projetar um mícrotron do tipo *race-track*, é necessário escolher diversos parâmetros de operação. Dentre eles estão o valor do campo magnético e a energia ganha por volta. Estas grandezas estão relacionadas com o incremento em período de uma órbita para outra. Para que haja aceleração síncrona, este incremento deve ser igual a um número inteiro de períodos da RF (onda eletromagnética que acelera o feixe nas estruturas aceleradoras). Este número está relacionado com o espaçamento entre as órbitas e em geral é escolhido como igual a 1, condição em que as órbitas são as mais próximas possível. O gradiente máximo de campo da estrutura aceleradora, assim como a potência de RF disponível, determinam o comprimento da estrutura aceleradora e consequentemente o espaço entre os magnetos.

Como a energia do feixe que será injetado no *booster* é baixa, o acelerador funcionará fora das condições de estabilidade. Isto é, devido ao fato da velocidade dos elétrons variarem de uma volta para a outra, os elétrons não seguem as condições de sincronismo e chegam à estrutura aceleradora de forma a ganharem energias diferentes a cada volta. Devido à instabilidade de fase, as condições de operação do *booster* só podem ser determinadas por meio de simulações numéricas. O mesmo não ocorre quando o feixe é ultra-relativístico, pois neste caso o β é praticamente igual a 1 e é possível encontrar uma situação tal que o feixe chegue à estrutura aceleradora de forma a ganhar sempre a mesma energia por volta. Na figura 1.3 é mostrada a foto do Mícrotron *booster*.

1.3 Objetivos deste trabalho

O objetivo deste trabalho é simular o Mícrotron *booster* para a energia de projeto e otimizar seus parâmetros de operação. Por se tratar de um estágio recirculado e por ter um feixe de entrada de baixa energia, o sincronismo fica

Figura 1.3: Foto do Mícrotron *booster*.

prejudicado. Nesta situação, a estabilidade só pode ser estudada por meio de simulações. Também foi objetivo deste trabalho estudar a viabilidade da inserção de feixe com energia mais alta, alterando-se apenas parâmetros de campo magnético e de aceleração.

1.4 Organização desta dissertação

Esta dissertação está organizada de forma a apresentar os resultados das simulações e otimizações dos parâmetros de operação do Mícrotron *booster* do IFUSP.

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos para o desenvolvimento deste trabalho. É feita uma discussão histórica sobre aceleradores do tipo Mícrotron, e são apresentados os conceitos de espaço de fase, estabilidade de aceleradores do tipo Mícrotron, emitância e admitância.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para a determinação dos parâmetros de operação do *booster*, bem como são discutidas as rotinas de simulação desenvolvidas para viabilizar a determinação e a otimização de tais

parâmetros.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com as rotinas desenvolvidas, assim como a determinação dos novos parâmetros de operação para o *booster*.

No capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos e a inserção do feixe do injetor no Mícrotron *booster*.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

Nos apêndices são apresentados os códigos de simulações desenvolvidos neste trabalho, arquivos de entrada para o programa utilizado nas simulações e desenhos da câmara de vácuo do acelerador.

Capítulo 2

Fundamentos

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos utilizados neste trabalho. É feita uma discussão histórica sobre aceleradores do tipo mícrotron e são apresentados os conceitos de partícula guia, espaço de fase, emitância e admitância. As condições de estabilidade para mícrotrons convencionais e mícrotrons do tipo *race-track* são deduzidas e o formalismo matricial para transformações das coordenadas das partículas do feixe é apresentado. É feita também uma breve apresentação dos elementos presentes no *booster*, bem como suas caracterizações. É feita uma discussão sobre o efeito de escorregamento de fase, com a finalidade de preparar o leitor para o fato de o *booster* funcionar fora das condições de estabilidade.

2.1 O mícrotron

A proposta para um mícrotron, que é um acelerador de elétrons cíclico com campo magnético uniforme, foi feita pela primeira vez por Veksler[11], em 1944, na URSS. Porém, foi em 1947, no *National Research Council of Canada*, que o primeiro Mícrotron do mundo foi construído e entrou em operação, fornecendo um feixe de 4,6 MeV de energia [2]. Este acelerador, chamado de mícrotron convencional, consiste de uma cavidade ressonante de microondas, responsável pela aceleração dos elétrons. Esta é colocada no interior de um campo magnético uniforme que faz com que o feixe descreva trajetórias

circulares tangentes ao eixo da cavidade e de raios crescentes com a energia das partículas até sua extração por um canal sem campo magnético. Um esquema deste tipo de acelerador é mostrado na figura 2.1.

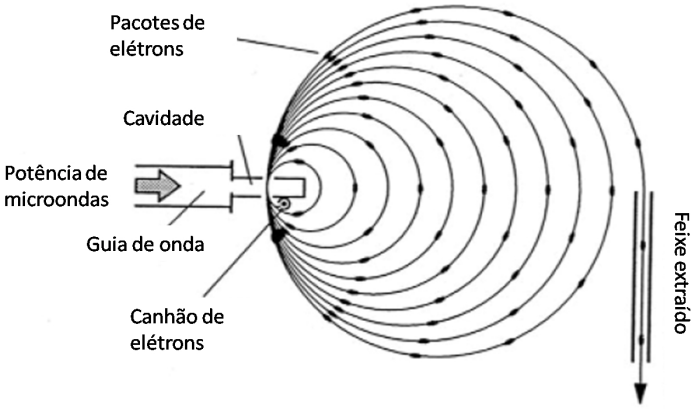

Figura 2.1: Órbitas de um feixe de elétrons em um Mícrotron convencional [2].

Veksler propôs que elétrons poderiam ser acelerados até energias relativísticas em um campo magnético uniforme por múltiplas passagens por uma cavidade de micro-ondas, sendo que a energia ganha pelos elétrons em cada passagem tem uma relação com a energia de repouso do elétron e com a intensidade do campo magnético ao qual eles estão submetidos. Veksler também apontou o fato de que, quando uma partícula ultra-relativística é periodicamente acelerada em um campo magnético, o incremento no tempo que esta gasta de uma órbita para outra é constante, independente da energia total da partícula, dependendo apenas do ganho de energia.

Devido à necessidade de feixes mais energéticos, procurou-se uma forma de se usar mais cavidades aceleradoras em um mesmo mícrotron. Isto se tornou possível ao se particionar o eletroímã de um mícrotron convencional em dois ou mais dipolos separados por trechos retos. Este é o chamado mícrotron *race-track*, que foi proposto independentemente por Moroz [12] em 1956 e Roberts [13] em 1958. O primeiro mícrotron *race-track* do mundo foi construído na Universidade de Western Ontario em 1961 [3] e produzia um feixe de 5 MeV. Um diagrama esquemático deste mícrotron é mostrado na figura 2.2 [2].

Tanto o Mícrotron *booster* como o Mícrotron Principal do IFUSP são aceleradores do tipo *race-track*, cada um com dois magnetos. Na figura 2.3 é mostrado o esquema de um mícrotron semelhante aos que estão sendo construídos pelo IFUSP.

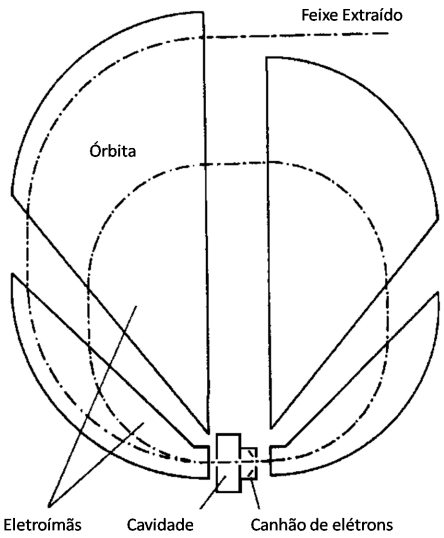

Figura 2.2: Diagrama esquemático do mícrotron *race-track* de quatro setores construído pela *University of Western Ontario* (1961) [3].

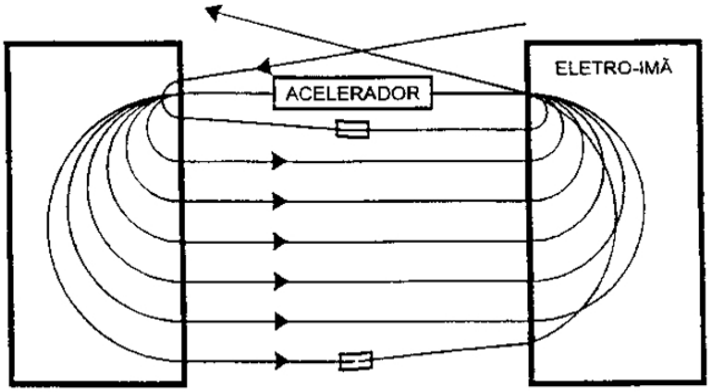

Figura 2.3: Diagrama esquemático de um mícrotron *race-track*.

2.2 Partícula guia e o sistema de referência

Em aceleradores, são usados campos magnéticos e elétricos para guiar as partículas eletricamente carregadas ao longo do caminho previamente prescrito. Este caminho é chamado de trajetória de projeto, ou trajetória de referência e é definido pelas seções retas do acelerador e pelos eletroímãs que curvam o feixe, chamados de dipolos.

A partícula que executa exatamente a trajetória de projeto é chamada de partícula guia. As partículas que não executam a trajetória de projeto ficam distribuídas em torno da partícula guia, e todos os movimentos destas são estudados em relação à trajetória da partícula guia. Estas partículas que possuem um pequeno desvio em relação à órbita de projeto devem ser submetidas a forças restauradoras. Devido a estas forças, as partículas executam um movimento oscilatório em torno da órbita de projeto, chamado de movimento bétatron.

Partículas do feixe também podem ter energias diferentes da energia da partícula guia. Neste caso haverá uma oscilação longitudinal em torno da partícula guia, onde a força restauradora é proveniente da estrutura aceleradora. Estas são as chamadas oscilações síncrotron e estão intimamente ligadas com a estabilidade de fase do acelerador. A estabilidade de fase será tratada com detalhes nas próximas seções.

Um sistema de coordenadas utilizado para descrever o movimento das partículas em relação à partícula guia em um acelerador é o de *Frenet–Serret* [14], que é um referencial que acompanha a partícula guia. Na figura 2.4 é mostrada uma ilustração do sistema de coordenadas de *Frenet-Serret* em dois pontos diferentes de uma trajetória [15].

A partícula guia se encontra na origem das coordenadas e o eixo z aponta no sentido e direção do movimento. Os eixos x e y são perpendiculares ao movimento e, neste trabalho, o eixo x associa-se à direção horizontal e o eixo y à vertical. As coordenadas de cada partícula do feixe, no referencial de

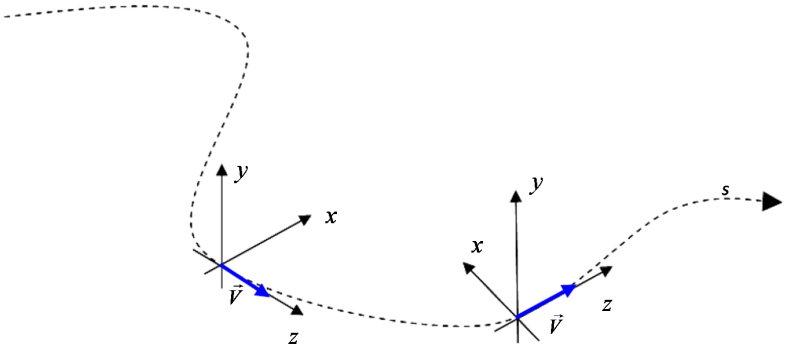

Figura 2.4: Sistemas de coordenadas de *Frenet-Serret*.

Frenet-Serret, são dadas por um vetor de seis posições:

$$\begin{bmatrix} x \\ P_x \\ y \\ P_y \\ z \\ P_z \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

onde z está relacionado com o comprimento do pacote de elétrons, também chamado de comprimento longitudinal do feixe, e P_x, P_y e P_z são as componentes do momento da partícula nas respectivas direções.

Um conjunto de partículas forma um feixe se as componentes de momento na direção longitudinal forem muito maiores que as componentes de momento nas direções transversais ($P_x \ll P_z$ e $P_y \ll P_z$).

Se o comprimento do feixe é muito maior que seu diâmetro, pode-se tratar a distribuição como um feixe contínuo. Por outro lado, se o comprimento é comparável com o diâmetro, o feixe consiste de pacotes de partículas. Neste caso $\Delta P_{zi} \lll < P_z >$, onde ΔP_{zi} é a diferença entre o momento da partícula i e o momento da partícula guia. No caso do Mícrotron, o feixe é formado por pacotes de elétrons, para que sejam acelerados adequadamente nas estruturas aceleradoras.

Considerando as situações dadas pelas as equações 2.2 e 2.3, é conveniente escrever as coordenadas das partículas normalizando-as pela componente longitudinal do momento.

$$P_x \ll P_z \cong P_0 \tag{2.2}$$

$$P_y \ll P_z \cong P_0 \tag{2.3}$$

onde P_0 é o momento da partícula guia.

A divergência da partícula em relação à trajetória de referência é definida por [16]:

$$x' = \frac{dx}{dz} = \frac{\dot{x}}{\dot{z}} = \frac{P_x}{P_0} \tag{2.4}$$

$$y' = \frac{dy}{dz} = \frac{\dot{y}}{\dot{z}} = \frac{P_y}{P_0} \tag{2.5}$$

Para a coordenada z, como $P_z \cong P_0$ é conveniente escrever esta coordenada da seguinte forma:

$$z' = \frac{\Delta P}{P_0} + 1 \tag{2.6}$$

Estas divergências, juntamente com as posições x, y e z das partículas de um feixe, são utilizadas para estudar a qualidade do feixe ao longo do acelerador. Estas coordenadas sofrerão transformações de acordo com os elementos que o feixe atravesse. Adotando um formalismo matricial, a transformação do feixe entre dois pontos do acelerador é dada por:

$$\begin{bmatrix} x_f \\ x'_f \\ y_f \\ y'_f \\ z_f \\ (\Delta P/P_0)_f \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ x'_i \\ y_i \\ y'_i \\ z_i \\ (\Delta P/P_0)_i \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

M é chamada de matriz de transferência e assume diferentes formas, dependendo das configurações de campo pelas quais o feixe passou. A forma da matriz M para cada um dos principais elementos presentes em um acelerador pode ser encontrada em [14, 15, 5]

2.3 Condições de estabilidade em mícrotrons convencionais

As condições básicas para que haja aceleração síncrona em um mícrotron convencional são: o período da primeira órbita deve ser igual a um número inteiro a de períodos de oscilação do campo de aceleração e o período de uma órbita subsequente deve ser maior que o período da órbita anterior por uma diferença igual a um número inteiro b de períodos de oscilação do campo de aceleração [17].

O período orbital T de um elétron em um campo magnético uniforme B é dado por:

$$T = \frac{2\pi m}{eB} \tag{2.8}$$

onde e é a carga do elétron e m sua massa relativística. Relacionando esta expressão com a energia total da partícula, $E = mc^2$, tem-se:

$$T = \frac{2\pi E}{eBc^2} \tag{2.9}$$

onde c é a velocidade da luz. Como se pode observar na equação 2.9, o período orbital do elétron é diretamente proporcional à sua energia total. Sendo ΔE a energia ganha pelo elétron em cada passagem pela cavidade aceleradora, m_0c^2 a energia de repouso do elétron e E_i sua energia de injeção, a energia

da partícula na volta n será:

$$E_n = m_0c^2 + E_i + n\Delta E \tag{2.10}$$

Então o período orbital na volta n, desprezando o tempo de passagem na cavidade aceleradora será:

$$T_n = \frac{2\pi}{eBc^2}\left(m_0c^2 + E_i + n\Delta E\right) \tag{2.11}$$

A diferença de período ΔT para duas órbitas consecutivas é:

$$\Delta T = T_{n+1} - T_n = \frac{2\pi\Delta E}{eBc^2} \tag{2.12}$$

Note que ΔT independe da energia total da partícula, dependendo apenas do ganho de energia por volta. Para que os elétrons realizem órbitas que garantam sincronia com a RF, é necessário ajustar os ganhos de energia ΔE e o campo magnético B dos eletroímãs. Então as condições de ressonância são:

$$T_1 = \frac{2\pi}{eBc^2}\left(m_0c^2 + E_i + \Delta E\right) = aT_{RF} \tag{2.13}$$

$$\frac{2\pi\Delta E}{eBc^2} = bT_{RF} \tag{2.14}$$

Usando o fato que $c = \frac{\lambda_{RF}}{T_{RF}}$, as equações 2.13 e 2.14 podem ser reescritas como:

$$\frac{2\pi}{eBc\lambda_{RF}}\left(m_0c^2 + E_i + \Delta E\right) = a \tag{2.15}$$

$$\frac{2\pi\Delta E}{eBc\lambda_{RF}} = b \tag{2.16}$$

Usando a expressão do campo magnético ciclotrônico do elétron correspondente a um campo de RF com comprimento de onda λ_{RF}, que é dada

por [17]:

$$B_0 = \frac{2\pi m_0 c}{e\lambda_{RF}} \tag{2.17}$$

as condições de estabilidade podem ser escritas como

$$\frac{B_0}{B}\frac{(m_0c^2 + E_i + \Delta E)}{m_0c^2} = a \tag{2.18}$$

$$\frac{\Delta E}{m_0c^2}\frac{B_0}{B} = b \tag{2.19}$$

Isolando ΔE em 2.19 e inserindo em 2.18, chega-se a:

$$\frac{B}{B_0} = \frac{(E_i + m_0c^2)}{m_0c^2}\frac{1}{a-b} \tag{2.20}$$

Usando as expressões 2.20 e 2.19, chega-se na seguinte relação:

$$\frac{\Delta E}{E_i + m_0c^2} = \frac{b}{a-b} \tag{2.21}$$

As equações 2.20 e 2.21 são as relações de sincronismo em um mícrotron convencional.

2.4 Condições de estabilidade em mícrotrons *race-track*

Para o mícrotron *race-track*, temos as mesmas condições para aceleração síncrona, porém é preciso considerar também os trechos retos entre os dipolos: o período da primeira órbita deve ser igual a um número inteiro a de períodos do campo acelerador de RF e o período adicional de cada órbita subsequente deve ser igual a um número inteiro b de períodos do campo acelerador de RF. O período de uma órbita em um mícrotron *race-track* de dois magnetos,

com uma distância L entre estes, é dado por:

$$T = \frac{(2\pi r + 2L)}{v} \tag{2.22}$$

onde v é a velocidade dos elétrons.

Para a condição da primeira órbita ser satisfeita, temos que

$$\frac{(2\pi r_1 + 2L)}{v_1} = \frac{\lambda_{RF}}{c} a \tag{2.23}$$

Usando a equação 2.17, a equação 2.23 pode ser reescrita como

$$\frac{B_0 e}{m_0 c} \frac{r_1}{\beta_1} + \frac{L B_0 e c}{\pi \beta_1 m_0 c^2} = a \tag{2.24}$$

Com o auxílio das expressões $Br = \frac{p}{e}$ e $E\beta = pc$, a equação 2.24 se reduz a:

$$\frac{B_0}{B} \frac{E_1}{m_0 c^2} \left(1 + \frac{L}{\pi r_1}\right) = a \tag{2.25}$$

onde E_1 é dado por $m_0 c^2 + E_i + \Delta E$.

A equação 2.25 é a condição de estabilidade para a primeira volta em um mícrotron *race-track*.

A condição de estabilidade para as órbitas seguintes também pode ser deduzida partindo-se da expressão 2.22, porém agora é necessário impor que a variação do período de uma volta para a outra seja um múltiplo do período de RF. Sendo b um número inteiro diferente de zero, temos:

$$\Delta \left(\frac{2\pi r + 2L}{v}\right) = \frac{\lambda_{RF}}{c} b \tag{2.26}$$

Escrevendo a equação 2.26 em função de β, obtemos:

$$\frac{2\pi}{\beta \lambda_{RF}} \Delta r + \frac{2\pi r}{\lambda_{RF}} \Delta \left(\frac{1}{\beta}\right) + \frac{2L}{\lambda_{RF}} \Delta \left(\frac{1}{\beta}\right) = b \tag{2.27}$$

Diferenciando as expressões $Br = \frac{p}{e}$ e $E\beta = pc$, chegamos às seguintes

relações:

$$\Delta r = \frac{\Delta p}{eB} \tag{2.28}$$

$$\Delta E\beta + E\Delta\beta = c\Delta p \tag{2.29}$$

Substituindo 2.28, 2.29 e 2.17 no lado esquerdo da expressão 2.27, temos a seguinte expressão:

$$\frac{B_0}{B}\frac{\Delta E}{m_0c^2} + \frac{B_0}{B}\frac{E}{m_0c^2}\frac{\Delta\beta}{\beta} + \frac{reB_0}{m_0c}\Delta\left(\frac{1}{\beta}\right) + \frac{LeB_0}{\pi m_0c}\Delta\left(\frac{1}{\beta}\right) = b \tag{2.30}$$

O segundo e o terceiro termo do lado esquerdo da equação 2.30 se anulam, visto que:

$$\Delta\left(\frac{1}{\beta}\right) = -\frac{\Delta\beta}{\beta^2} \tag{2.31}$$

Portanto a condição de estabilidade se torna:

$$\frac{B_0}{B}\frac{\Delta E}{m_0c^2} + \frac{2L}{\lambda_{RF}}\left(\frac{1}{\beta_{n+1}} - \frac{1}{\beta_n}\right) = b \tag{2.32}$$

O ganho de energia ΔE está relacionado com a fase do elétron ao chegar à estrutura aceleradora. O Mícrotron é um acelerador de radiofrequência que usa uma onda eletromagnética para acelerar os elétrons. Como o campo elétrico é oscilatório, apenas os elétrons que estiverem na região de aceleração irão ganhar energia ao passar pela estrutura aceleradora. Portanto, os elétrons devem permanecer aproximadamente na mesma fase da onda aceleradora. A partícula que atinge a estrutura aceleradora sempre na mesma fase, chamada de fase síncrona, é chamada de partícula síncrona. As partículas que não satisfazem esta condição, mas que chegam à estrutura aceleradora em fases próximas à fase síncrona, oscilam em torno da partícula síncrona.

O próprio processo de aceleração faz com que partículas não síncronas se aproximem da partícula síncrona, desde que sejam satisfeitas as seguintes condições: o pico de campo acelerador através do *gap* acelerador deve ser

capaz de fornecer energia superior ao ganho necessário por volta; e a órbita das partículas deve ser tal que uma mudança em energia seja acompanhada por uma mudança no período de revolução [9].

Considere que o elétron síncrono passe pela estrutura aceleradora em um instante de tempo que corresponde à fase ϕ_0, e que outro elétron atinja o *gap* acelerador antes, em uma fase ϕ menor que ϕ_0. Este elétron irá ganhar mais energia que o elétron síncrono, e terá o incremento no período de sua próxima volta maior que o do síncrono (o aumento no período de uma volta para a outra é proporcional ao ganho de energia). Isto fará com que ele atinja o *gap* acelerador em uma fase mais próxima da fase síncrona. Analogamente, elétrons que chegam ao *gap* acelerador um pouco tarde, adquirem menos energia, o aumento no período é um pouco menor, fazendo com que na próxima volta ele se aproxime do elétron síncrono. Portanto, durante o processo de aceleração, os elétrons executam oscilações em fase em torno da partícula síncrona. Este processo é chamado de estabilidade de fase.

2.5 Mícrotrons fora de estabilidade

O elétron síncrono deve satisfazer as condições de estabilidade de um Mícrotron. Porém, estas condições de estabilidade só são completamente satisfeitas para feixes ultra-relativísticos, que não é o caso do Mícrotron *booster*. Neste caso o acelerador irá operar fora das condições de estabilidade, pois devido à variação do β dos elétrons de uma órbita para a outra, não existe uma solução tal que as partículas cheguem sempre na mesma fase na estrutura aceleradora. Este é o chamado efeito de escorregamento de fase e ocorre sempre que a energia de injeção for baixa [8].

No caso do Mícrotron funcionando fora da estabilidade, o próprio "elétron síncrono" irá oscilar em fase na entrada da estrutura aceleradora. E os outros elétrons do feixe irão oscilar em torno da "fase síncrona", que neste caso, para cada volta terá um valor. O fato do ganho de energia por volta não ser constante, faz com que a equação 2.32 não seja válida simultaneamente para todas as voltas do *booster*. Ou seja, dada uma mesma constante b, o ganho de energia por volta não é o mesmo para todas as voltas. Devido à complicação

para se tratar este problema analiticamente, é conveniente utilizar programas de simulação. A própria determinação do elétron síncrono e da fase síncrona deve ser feita por métodos computacionais.

A fim de ilustrar esta particularidade, foram feitas algumas simulações para um feixe com energia cinética inicial igual ao do Mícrotron *booster*. Para a constante de estabilidade fixada em $b = 1$, que é a condição que fornece a menor distância entre as órbitas, foi feito um mapa de B em função de L, para diferentes ganhos de energia por volta. Os resultados são mostrados na figura 2.5.

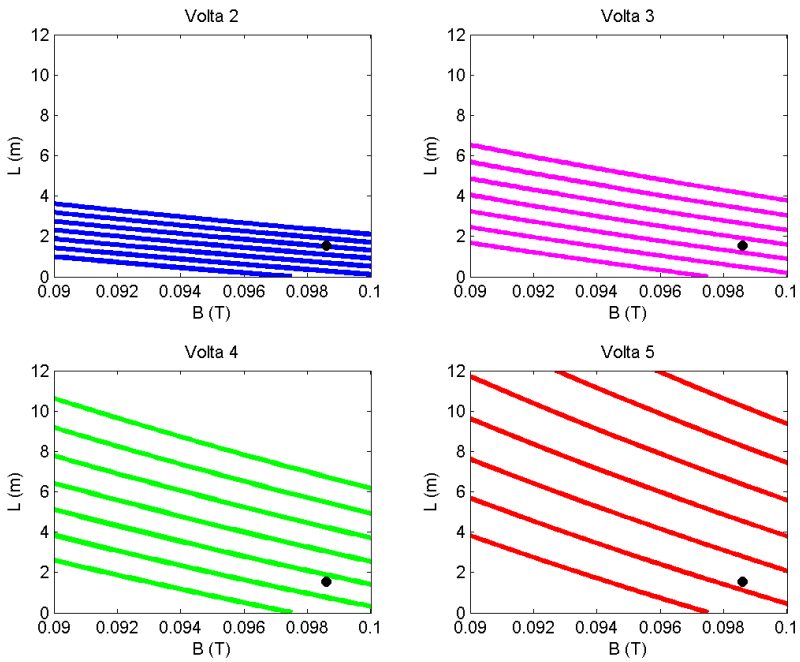

Figura 2.5: Mapa de estabilidade para o Mícrotron *booster*. As curvas mais próximas do eixo das abscissas indicam ganho de energia de 0,57 MeV e as mais distantes indicam 0,69 MeV. Os pontos pretos nas figuras indicam os valores definidos em projeto para o Mícrotron *booster*.

Os resultados mostrados na figura 2.5 foram obtidos a partir da equação 2.32, que é a condição de estabilidade válida a partir da segunda volta. As curvas mais próximas do eixo das abscissas indicam o menor ganho de energia simulado (0,57 MeV) e as demais são aumentos gradativos do ganho de

energia (em passos de 0,02 MeV) , sendo que a última curva é para o maior ganho de energia simulado (0,69 MeV). Os círculos pretos nas figuras indicam os valores definidos em projeto para o Mícrotron *booster* (B = 0,986 T e L = 1,55 m). Note que, na segunda volta, o ponto de operação está mais próximo do valor de ganho de energia de 0,65 MeV. Já para a terceira e quarta voltas, os pontos de operação encontram-se mais próximos ao valor de ganho de energia de 0,61 MeV e para a última volta, o ponto de operação encontra-se perto do valor de ganho de energia de 0,59 MeV. Estes resultados evidenciam o fato de que um feixe não ultra-relativístico opera fora das condições de estabilidade, que seria o caso de haver um ganho de energia constante por volta. Para valores fixos de campos magnéticos e distância entre os eletroímãs principais do *booster*, não se pode encontrar soluções para a equação 2.32 que satisfaçam todas as voltas do *booster* simultaneamente, com o mesmo ganho de energia por volta.

Em relação à condição de estabilidade dada pela equação 2.25 e válida para a primeira volta, para os parâmetros de operação definidos em projeto, a constante a assume o valor 30. Como esta constante não depende do ganho de energia por volta (apenas do ganho de energia na primeira passagem pela estrutura aceleradora), mesmo para um mícrotron fora de estabilidade seu valor pode ser determinado de forma a ser um número inteiro.

Para um feixe ultra-relativístico, o β praticamente não varia e a equação 2.32 pode ser simplificada para a equação 2.33.

$$\frac{B_0}{B}\frac{\Delta E}{m_0 c^2} = b \tag{2.33}$$

Pela equação 2.33 é possível notar que, dado um valor de B, para cada constante b fixada, tem-se um valor de ΔE que será igual para todas as voltas. Ou seja, quando se tem um feixe ultra-relativístico, é possível encontrar uma situação na qual o acelerador funcione dentro das condições de estabilidade. Esta é a situação para o Mícrotron Principal, que receberá um feixe de entrada com energia suficientemente alta.

Apesar do Mícrotron *booster* não seguir esta equação e o incremento do período entre as órbitas não ser constante, é possível, a partir de métodos

numéricos, encontrar uma condição capaz de acelerar as partículas. Nesta condição, ocorre o efeito de escorregamento de fase.

Para ilustrar este efeito, na figura 2.6 é mostrado o resultado de uma simulação do desvio de fase na entrada da estrutura aceleradora em função da energia ganha por volta em um mícrotron com 10 voltas. A simulação foi feita para um feixe na entrada do *booster* com 1,765 MeV [18].

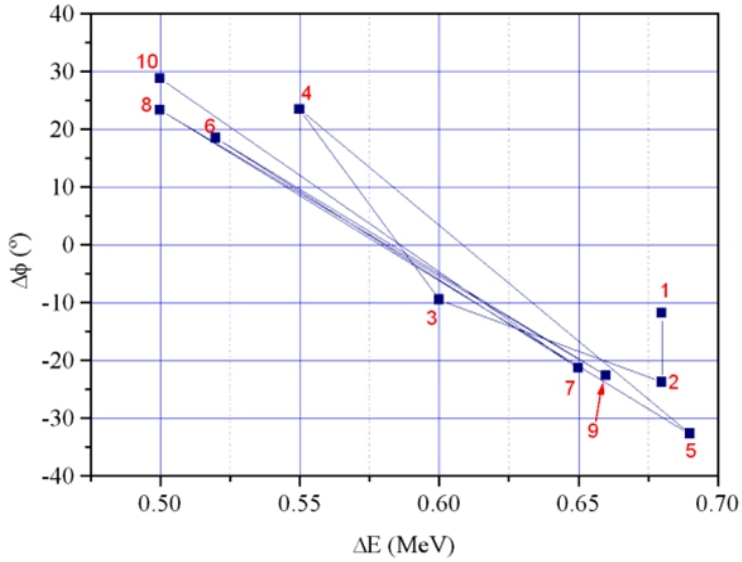

Figura 2.6: Desvio de fase em função da energia ganha por volta em um mícrotron.

Podemos notar que existe uma grande oscilação do desvio de fase em função do ganho de energia. O Mícrotron *booster* foi construído com cinco voltas e simulações de projeto mostraram que ele pode operar numa configuração que, mesmo não sendo capaz de fornecer um ganho de energia fixo por volta, produz um feixe com energia suficiente para ser inserido no segundo estágio acelerador, que é o Mícrotron Principal.

2.6 Espaço de fase, emitância e admitância

Tendo em vista a natureza da fonte de elétrons, existe uma condição intrínseca de dispersão em energia cinética e de velocidades das partículas do feixe, de-

vido à distribuição térmica de emissão. Cada ponto da superfície da fonte emite partículas com diferentes vetores velocidade. Esta dispersão térmica das velocidades permanece presente no feixe em qualquer distância da fonte [16].

A qualidade do feixe pode ser descrita por uma grandeza, chamada de emitância. Ela está relacionada com o volume ocupado por um conjunto de partículas no espaço de seis dimensões definido pelo conjunto de coordenadas canônicas q_i, P_i.

Assumindo que o feixe se propaga na direção z e tem dois planos de simetria (x-z e y-z), o movimento de cada partícula, em qualquer instante de tempo, é definido por três coordenadas espaciais (x, y, z) e três coordenadas de momento (P_x, P_y, P_z). Considerando o referencial descrito na seção 2.2, em qualquer distância s ao longo do acelerador, a toda partícula corresponde um ponto no espaço x-x', y-y' e z-$\frac{\Delta P}{P_0}$. O conjunto dos pontos formado pelas partículas do feixe é conhecido como espaço de fase em x, y e z. O volume ocupado por todos os pontos que representam as partículas do feixe está relacionado com a emitância do feixe, que é frequentemente denotada por ϵ. É possível fazer projeções deste volume em cada um dos espaços de fase x-x', y-y' e z-$\frac{\Delta P}{P_0}$. Para o espaço de fase x, a área ocupada define o que chamamos de emitância transversal horizontal e para o espaço de fase em y, a área ocupada é a emitância transversal vertical. Para o espaço de fase longitudinal, usa-se a fase ϕ que é o atraso de fase em relação à fase do campo acelerador, no lugar da coordenada z e E no lugar da coordenada $\frac{\Delta P}{P_0}$. A área ocupada neste espaço de fase é o que chamamos de emitância longitudinal.

A descrição do feixe no espaço de fase é útil, pois, segundo o teorema de Liouville [14, 19], o volume ocupado pelas partículas no espaço de fase se conserva ao longo de uma linha de transporte. O teorema de Liouville é um resultado da mecânica hamiltoniana sobre a evolução temporal de um sistema mecânico. Considera-se um conjunto de partículas com condições iniciais próximas que podem ser representadas no espaço de fase por certa região, que, apesar de se expandir e se contrair à medida que o feixe evolui, mantém invariante seu volume. Porém este resultado só é válido se o número de partículas do feixe se conservar.

Conforme foi dito anteriormente, o feixe também se transforma de acordo com os elementos pelos quais passa ao longo do acelerador. Então, sabendo as coordenadas de cada partícula do feixe em um dado ponto do acelerador, podemos, conhecendo as matrizes de transformação de cada elemento que o feixe atravessa, saber como é o espaço de fase em outro ponto do acelerador. O espaço de fase é importante, pois guarda as características da dinâmica do feixe. Na figura 2.7 é mostrado o perfil do feixe (primeira linha) e a evolução dos espaços de fase transversais horizontal (segunda linha) e vertical (terceira linha) ao longo de uma linha contendo dois *drifts* (região livre de campo) e um quadrupolo. O perfil do feixe, assim como os espaços de fase são mostrados em quatro pontos diferentes: no início do primeiro *drift*, entrada do quadrupolo, saída do quadrupolo e final do segundo *drift*. Note que o feixe gira no sentido horário ao passar por um *drift* e o quadrupolo focaliza o feixe em um dos planos e o desfocaliza no outro. No caso da figura 2.7, o feixe ao passar pelo quadrupolo foi focalizado em x-x' e desfocalizado em y-y'. Para se obter um efeito focalizador em ambos os planos, usam-se dubletos ou tripletos de quadrupolos.

Alguns elementos do acelerador podem acoplar coordenadas dos diferentes espaços de fase. Por exemplo, o dipolo acopla as coordenadas do espaço de fase longitudinal com as coordenadas do plano onde ocorre a curvatura, que, no caso deste trabalho, é o espaço de fase transversal horizontal. O solenóide, que é uma lente que focaliza e rotaciona o feixe, acopla as coordenadas dos espaços de fase transversais.

Devido ao acoplamento das coordenadas, ocorrem trocas de emitância entre os espaços de fase. Em alguns aceleradores, trocas de emitância são desejáveis e elementos são inseridos propositalmente para realizar estas trocas. Um exemplo é o *free electron laser* (FEL), que requer feixes com emitância transversal pequena. Neste caso pode ser conveniente trocar a emitância transversal com a longitudinal [20].

Outra grandeza importante em física de aceleradores é a admitância, também conhecida como abertura dinâmica. A admitância é definida como a área do espaço de fase associada com as partículas que são aceleradas corretamente pelo acelerador. Ao injetar um feixe em um determinado acelerador,

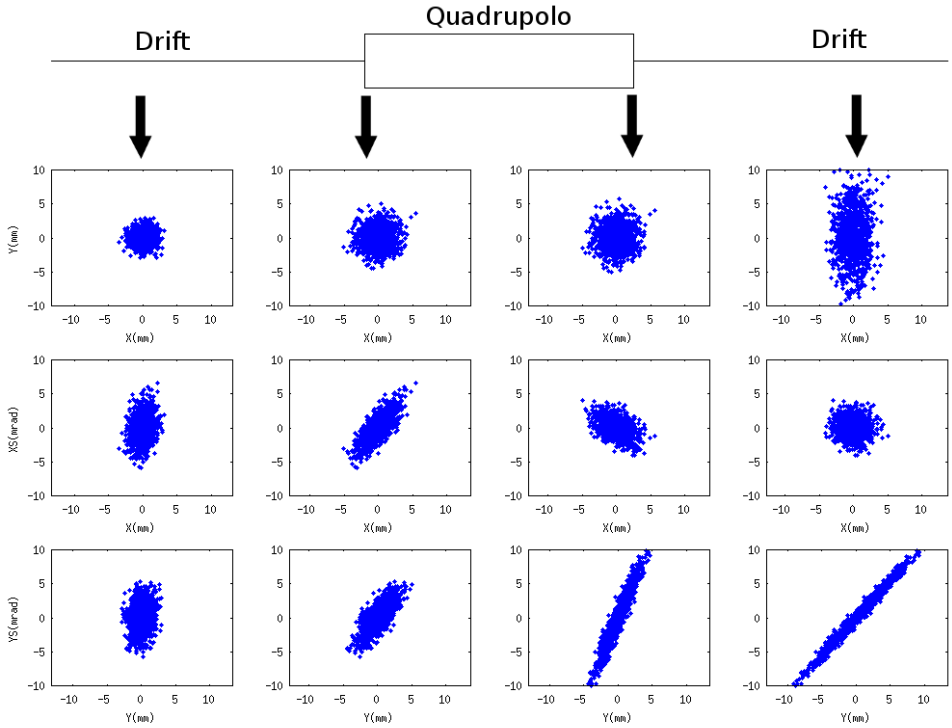

Figura 2.7: Evolução do espaço de fase.

é conveniente fazer o casamento de seu espaço de fase com o espaço de fase aceito pelo acelerador. A distribuição do feixe deve coincidir da melhor forma possível com a área aceita pelo acelerador em cada espaço de fase. Isso deve ser realizado, uma vez que as partículas que se encontram na região do espaço de fase fora da admitância serão perdidas.

Em geral, a admitância é definida pela própria ótica do acelerador. No caso do Mícrotron *booster*, devido ao fato deste acelerador funcionar fora das condições de estabilidade, a admitância foi determinada numericamente a partir de rotinas de simulação desenvolvidas neste trabalho.

Capítulo 3

Metodologia das simulações

Neste capítulo será discutida a metodologia empregada nas simulações e otimizações do primeiro estágio de aceleração do Mícrotron do IFUSP. Os códigos de simulação usam como base o programa PTRACE [21], programas escritos em linguagem C e rotinas feitas na plataforma MatLab [22].

O PTRACE é um programa que simula aceleradores do tipo mícrotron *race-track* e linhas de transporte. Associado a códigos desenvolvidos neste trabalho, é possível obter dados do feixe simulado pelo PTRACE após cada elemento do acelerador, tornando o conjunto de códigos uma poderosa ferramenta de estudos de dinâmica longitudinal e transversal do feixe.

Estes códigos auxiliam na modificação do arquivo de entrada e na extração e preparação dos dados obtidos no arquivo de saída, bem como auxiliam nas automatizações das simulações do PTRACE. As rotinas desenvolvidas no MatLab executam um papel fundamental nas simulações, uma vez que o próprio PTRACE é executado de dentro da plataforma MatLab, tornando mais fácil a análise dos dados.

Três tipos de simulações foram realizadas: otimização da fase; estudo da trajetória da partícula guia dentro do acelerador; e obtenção da admitância do *booster*. As duas primeiras simulações são para a partícula guia e a última é um estudo coletivo do feixe. O fato de o *booster* funcionar fora das condições de estabilidade faz com que a fase da partícula guia tenha que ser determinada numericamente. Após a determinação da fase, é possível extrair do

PTRACE informações sobre a trajetória da partícula guia ao passar pelos dipolos. Com estes dados é possível reconstruir a trajetória do feixe ao longo de todo acelerador. Para a determinação da admitância do *booster*, utilizamos um Método de Monte Carlo para estudar regiões dos espaços de fase próximas à partícula guia.

No apêndice A são apresentados os códigos desenvolvidos para as simulações realizadas neste trabalho.

3.1 Estudo do código PTRACE

O programa PTRACE é um código escrito na linguagem Fortran, o qual pode ser usado para simulações de aceleradores do tipo Mícrotron. Este programa foi criado por H. Herminghaus para o projeto da primeira etapa do Mícrotron de Mainz, Alemanha [23]. O Laboratório do Acelerador Linear possui o código devido a um convênio que houve entre os dois laboratórios.

O programa simula a passagem de 10 partículas pelos elementos presentes no acelerador. Ele recebe como entrada um arquivo ASCII com as coordenadas das partículas nos espaços de fase x-x' e y-y', a energia das partículas E e a fase ϕ de cada partícula no início do acelerador. Esta fase é dada, em cada elemento, como o atraso de fase com respeito a uma onda de radiofrequência fictícia que se propaga, ao longo do caminho da partícula, com a velocidade da luz [24].

O programa PTRACE permite a simulação de mais de um Mícrotron, cada um deles contendo até 20 elementos e no máximo 100 voltas. Também é possível simular os elementos de injeção e extração do feixe nos mícrotrons, sendo que o número máximo suportado é de 20 elementos para cada linha.

No arquivo de entrada, logo após as coordenadas das partículas, é inserida a relação de elementos que constituem o acelerador. Os elementos que o programa admite no arquivo de entrada são: estrutura aceleradora, dipolos, quadrupolos, *drifts*, rotações do feixe, solenóides e multipolos de ordem superior a quadrupolos. Os elementos são identificados pelo programa por números, sendo que alguns elementos, como dipolos, quadrupolos e solenóides, podem ser descritos de forma a incluir seus campos de borda, conforme especificado

Tabela 3.1: Elementos ópticos para o programa PTRACE.

Tipo de elemento óptico	Código
Estrutura aceleradora	1
Dipolo: campo de borda input ponto por ponto	2
Quadrupolo: função analítica do campo de borda	3
Quadrupolo: aproximação de lente	4
Deslocamento e /ou rotação	5
Solenóide: matriz em primeira ordem	6
Solenóide: campo analítico	7
Solenóide: Input do campo, ponto por ponto	8
Quadrupolo: matriz em primeira ordem	9
Multipolos: Input do campo de borda ponto por ponto	10
Desvio de energia	11
Dipolo em primeira ordem	12

na tabela 3.1.

O arquivo de saída do PTRACE fornece uma listagem de coordenadas x, x', y, y', fase ϕ e energia E. Para alguns elementos, como é o caso de dipolos, o programa faz uma integração numérica, provendo no arquivo de saída as informações em cada passo de integração. São fornecidos posições (X, Y, Z) e velocidades (V_x, V_y e V_z) no referencial do laboratório, campos magnéticos (B_x, B_y e B_z) e fase ϕ. Esta saída é muito útil, por exemplo, para se determinar a trajetória do feixe dentro dos dipolos. Foi feito um estudo do programa e documentado como deve ser um arquivo de entrada para um acelerador como o Mícrotron *booster*. Um arquivo de entrada comentado encontra-se no apêndice B.

3.2 Modificações no PTRACE

Foi feito um estudo do código fonte do PTRACE, a fim de torná-lo compatível com novas versões de compiladores Fortran, e, também, aumentar a precisão dos cálculos e o número de partículas que podem ser simuladas. O programa era limitado nesses quesitos: era usada precisão simples nas variáveis numéricas e eram simuladas apenas 10 partículas por vez. Neste trabalho, o código fonte foi alterado para precisão dupla e o número máximo

de partículas que podem ser inseridas no arquivo de entrada foi alterado para 10.000 [21]. Simulações no PTRACE compilado por diferentes compiladores forneciam resultados diferentes, problema que deixou de ocorrer no PTRACE com precisão dupla, devido à diminuição de erros de truncamento. O fato da precisão dos cálculos ter sido alterada não afetou significativamente o tempo de execução do programa e os resultados fornecidos são mais precisos.

Na figura 3.1 são apresentados espaços de fase longitudinais calculados pelo PTRACE e pelo PTRACEX (nome dado ao PTRACE com modificações), ambos compilados com o compilador GFORTRAN [25]. Foram simuladas mil partículas ao passar pelo Mícrotron *booster*, utilizando cada versão do programa. Para as simulações com o PTRACE, foi necessário executar o programa 100 vezes, com 10 partículas em cada execução. As coordenadas iniciais das partículas para ambos os programas foram as mesmas, mas obtivemos resultados diferentes na determinação dos espaços de fase para cada programa. O efeito dos arredondamentos na execução do PTRACE provoca o aparecimento de linhas horizontais no espaço de fase, o que não ocorre para os cálculos com precisão dupla.

Diversas rotinas no MatLab foram desenvolvidas a fim de automatizar as simulações. Usando o MatLab, é gerado um arquivo ASCII com coordenadas aleatórias das partículas, sendo que o número de partículas pode variar de 1 a 10000. As partículas podem ser geradas com uma função densidade de probabilidade uniforme ou normal. Para ambas as distribuições, a rotina possui como parâmetro de entrada o desvio padrão e a média de cada uma das seguintes variáveis: x, x', y, y', ϕ e E. Também é possível utilizar como parâmetro de entrada a correlação entre x e x', y e y', ϕ e E.

A fim de facilitar a análise dos dados, foi alterada também a forma como o PTRACEX escreve as coordenadas do espaço de fase das partículas no arquivo de saída, com a inclusão de marcas que localizam os dados. Assim, antes de cada impressão, outro código que desenvolvemos extrai o resultado da simulação, excluindo os comentários.

As três mudanças realizadas no arquivo fonte do PTRACE (aumento do número de partículas, precisão dupla e modificação da saída das coordenadas das partículas) nos trouxeram um aumento significativo na produtividade.

O aumento do número de partículas melhora a estatística das simulações, dispensando a necessidade de ter que executar o PTRACE várias vezes para se ter um número significativo de dados. O uso da dupla precisão diminuiu problemas de truncamento e aumentou a confiabilidade dos resultados, uma vez que um problema matemático foi eliminado. A inserção de uma marcação nos resultados da simulação no arquivo de saída viabilizou a automatização da coleta dos dados do espaço de fase das partículas, dispensando trabalhos manuais.

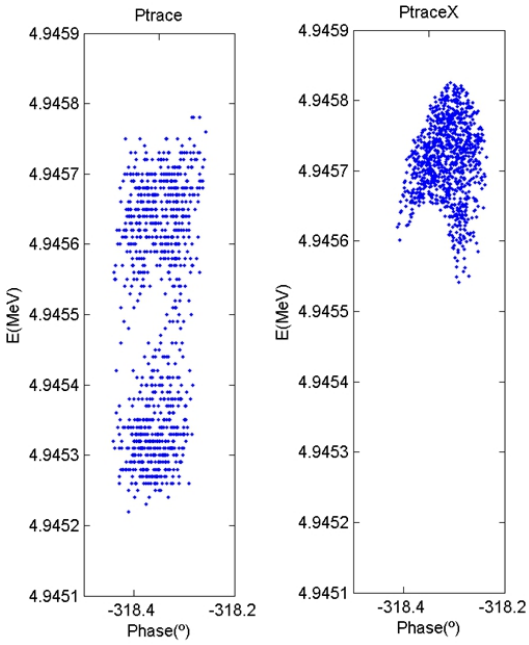

Figura 3.1: Comparação do espaço de fase longitudinal obtido com o PTRACE (esquerda) e com o PTRACEX (direita).

3.3 Simulações

Para um estudo apurado do feixe de elétrons dentro do acelerador, é conveniente estudar o movimento da partícula guia, que é a partícula injetada no acelerador com coordenadas na origem dos sistemas de referência. Todo o movimento das outras partículas do feixe é estudado em relação à partícula

guia. Para a otimização da fase e obtenção das trajetórias dentro dos dipolos, foi utilizada apenas a partícula guia. Já para a rotina de obtenção da admitância, além da partícula guia, é necessário estudo do coletivo das partículas, uma vez que a admitância está relacionada com os espaços de fase tranversais e longitudinal, que caracterizam o feixe propriamente dito.

3.3.1 Otimização da fase

A fase é um dos parâmetros principais da partícula guia, pois dependendo de seu valor na entrada da estrutura aceleradora, a partícula pode ganhar ou perder energia. Em um acelerador do tipo mícrotron, no qual a partícula passa diversas vezes pela mesma estrutura aceleradora, é necessário sincronizar a partícula com o campo da estrutura aceleradora, de forma que em todas as passagens a partícula seja acelerada.

O Mícrotron *booster* do IFUSP possui uma particularidade que deve ser levada em conta na determinação da fase da partícula guia: o feixe não é ultra-relativístico e isso implica que o ganho de energia por volta não é constante, sendo assim, as equações de estabilidade não podem ser usadas para determinação dos parâmetros de operação deste acelerador.

Outro fato que deve ser levado em conta é que a câmara de vácuo pela qual o feixe passará já está construída de acordo com o projeto original. Assim, a sintonia dos parâmetros de operação do *booster* possui restrições quanto aos raios que a partícula poderá realizar. Na tabela 3.2 são apresentados os raios ideais para cada volta na câmara de vácuo do *booster*. Um desenho mostrando os raios da câmara de vácuo é apresentado no apêndice C.

Tabela 3.2: Raios da câmara de vácuo do Mícrotron *booster*.

Volta	Raio real (mm)
Injeção IS	76,0
1	98,2
2	119,3
3	140,3
4	161,2
5	182,0

Levando-se em conta a restrição dos raios a serem realizados, e, consequentemente, o ganho de energia por volta para o feixe com uma determinada energia inicial, pode-se testar qual é a fase que resulta em ganhos de energia mais próximos destes pré-determinados. Isto é, tendo-se os valores dos raios das trajetórias da partícula, sabe-se qual é o ganho de energia que a partícula deve ter em cada volta para um determinado campo magnético dos ímãs principais do acelerador. Sendo assim, é possível testar, para cada fase, se a partícula ganhou a energia prevista para cada volta. Tal teste é feito pela diferença quadrática deste ganho de energia com o ganho previsto, a partir da seguinte expressão:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{5} (\Delta E_{esperado,i} - \Delta E_i)^2 \tag{3.1}$$

onde $\Delta E_{esperado,i}$ é o ganho de energia esperado da volta i e ΔE_i é o ganho de energia da volta i, para uma determinada fase teste. A tabela 3.3 mostra os ganhos esperados por volta para o projeto inicial. Estes ganhos foram calculados utilizando o valor da energia de injeção do feixe e as seguintes expressões: $Br = \frac{p}{e}$ e $E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$.

Tabela 3.3: Ganho de energia previsto para cada volta.

Volta	Ganho de energia (MeV)
1	0,644
2	0,616
3	0,616
4	0,613
5	0,614

Foi feita uma rotina no MatLab, onde o valor da equação 3.1 é calculado para todo o intervalo de fases que pode ser inserido no PTRACEX. Tendo-se o valor do χ^2 para cada fase, é possível analisar se existe uma fase tal que a partícula realizará os raios pré-determinados. Esta fase é dada por um mínimo no valor do χ^2. Um fluxograma da rotina de otimização de fase é mostrado na figura 3.2.

A rotina de otimização de fase foi aplicada ao acelerador definido em

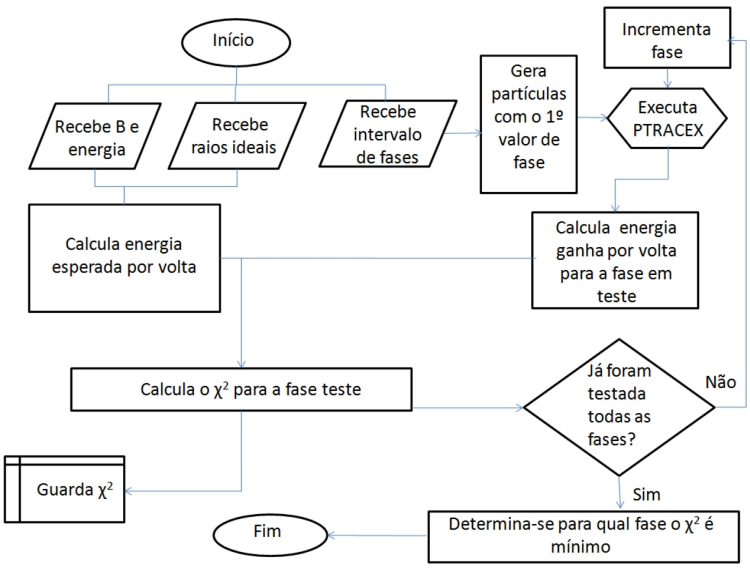

Figura 3.2: Fluxograma da rotina de otimização de fase.

projeto [18]. Na tabela 3.4 são apresentados os principais parâmetros desta configuração.

Tabela 3.4: Parâmetros do acelerador definido em projeto

Distância entre os eletroímãs	155,54 cm
Campo magnético dos ímãs Norte e Sul	0,0986 T
Campo magnético do D3	0,0157 T
Campo da estrutura aceleradora	0,90 MV/m
Raio da primeira órbita	7,50 cm

Na figura 3.3 é mostrado o gráfico de todas as fases testadas e os respectivos valores de χ^2. Note que existe um vale na região ao redor de -150º. Portanto, a fase ideal deve estar compreendida nesta região. A própria rotina de otimização já seleciona qual é a fase que fornece o menor χ^2, que neste caso é -153,8º. Na mesma figura, é possível analisar a dependência da energia final da partícula com a fase inicial. Na figura 3.4 é mostrada a região de interesse com mais detalhes. Note que a fase que fornece o menor χ^2 não corresponde à fase que fornece a maior energia final (-158º).

Para valores de fases entre -158º e -140º, a partícula chega ao final do acelerador com energia final compreendida entre 4,9 MeV e 4,95 MeV. A

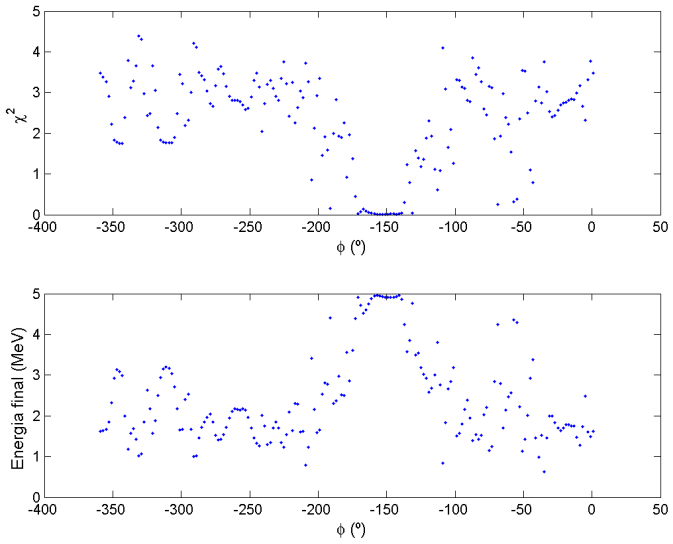

Figura 3.3: Valores de χ^2 para cada fase testada (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada (abaixo).

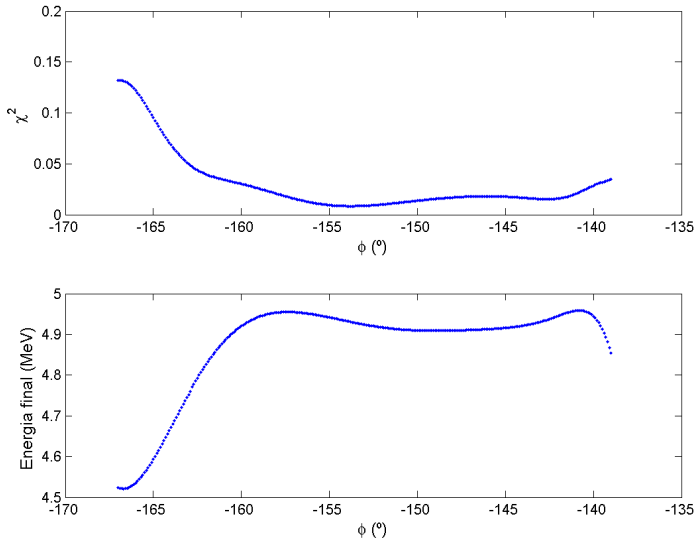

Figura 3.4: Valores de χ^2 para cada fase testada na região onde ocorre um mínimo (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada na mesma região (abaixo).

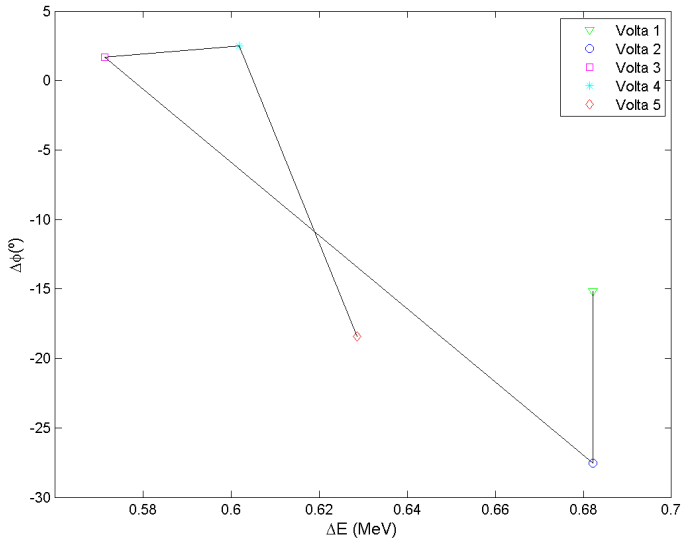

Figura 3.5: Relação entre os desvios de fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta.

fase utilizada no projeto do Mícrotron *booster* [18] foi -157º, que está dentro do intervalo obtido pela rotina de otimização da fase.

Utilizando a rotina de otimização de fase, também é possível analisar o desvio de fase na entrada da estrutura aceleradora para cada volta, relacionando-o com o ganho de energia. Na figura 3.5 é mostrado o cálculo destes desvios para o Mícrotron *booster* com os parâmetros utilizados nas simulações de projeto e os resultados obtidos são compatíveis com os resultados do projeto original [18].

Com esta rotina de teste de χ^2 para a fase, podemos identificar situações do acelerador onde não há região de estabilidade, ou seja, mesmo que exista um valor de fase com χ^2 baixo, não existe uma região em torno desta fase com o χ^2 igualmente baixo, formando um vale de estabilidade. Na figura 3.6 é mostrado um exemplo de uma configuração em que o Mícrotron *booster* não funcionaria. A configuração utilizada para tal simulação é a mesma utilizada nas simulações de projeto, porém o campo da estrutura aceleradora sofreu uma alteração de -6% e não foi mais capaz de fornecer a energia necessária por volta para que a partícula realizasse os raios pré-determinados. Esta

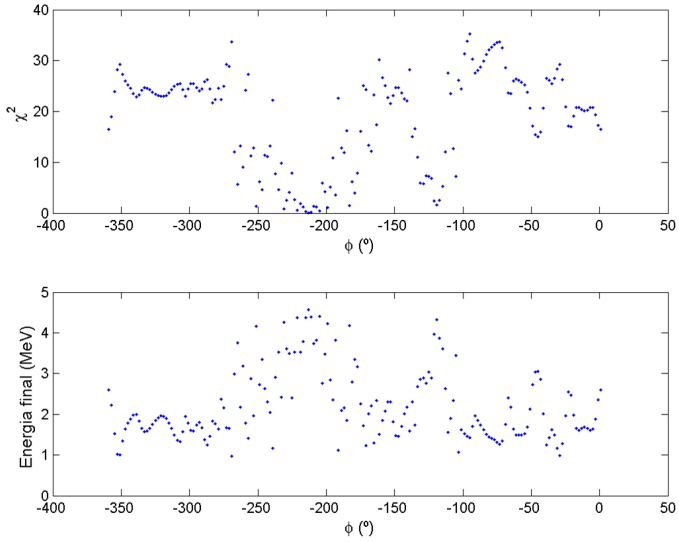

Figura 3.6: Valores de χ^2 para cada fase testada em uma situação em que não há fase ideal (acima). Energia final do feixe correspondente a cada fase testada (abaixo).

variação corresponde ao limite de erro para menos no valor do campo elétrico da estrutura aceleradora, para que ainda haja uma região de estabilidade de fase. O limite de erro para mais é de 10%.

3.3.2 Obtenção das trajetórias dentro dos dipolos

Após a determinação da fase de entrada da partícula guia, é possível extrair do programa a trajetória da partícula guia dentro dos dipolos. Para cada dipolo, é possível extrair do PTRACEX as seguintes coordenadas:

- As posições X, Y e Z da partícula ao longo do magneto, no referencial do laboratório;
- Os campos magnéticos B_x, B_y e B_z na posição das partículas;
- A fase ϕ para cada valor de coordenada Z;
- As velocidades V_x, V_y e V_z.

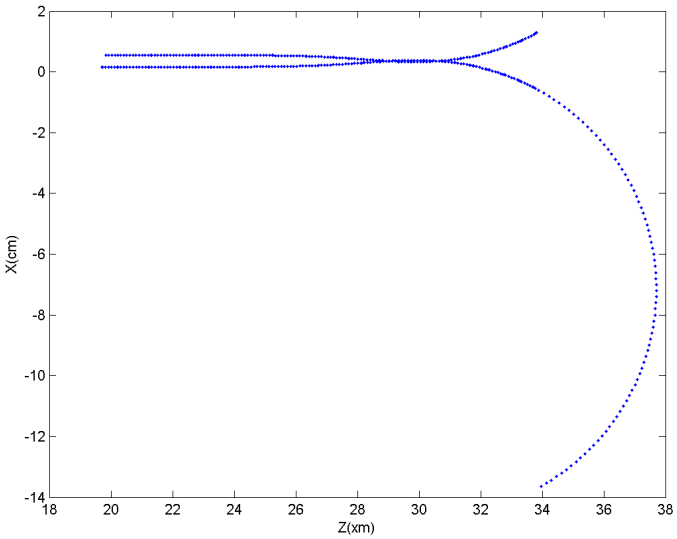

Figura 3.7: Dados brutos da curva realizada pela partícula guia dentro de um dos dipolos. A quebra na trajetória é devido à mudança de coordenadas realizada durante os cálculos.

Utilizando as coordenadas X e Z, é possível obter a curva realizada pela partícula dentro do dipolo. A figura 3.7 mostra os dados brutos como são fornecidos pelo PTRACEX. Em um determinado ponto da trajetória fornecida, existe uma quebra devido à mudança de coordenadas realizada durante os cálculos. É necessário realizar a transformação inversa nos pontos após a quebra.

A rotina desenvolvida para a obtenção das trajetórias dentro dos dipolos é capaz de realizar as mudanças de coordenadas necessárias para cada dipolo do *booster*. As relações entre as coordenadas são dadas pela equação 3.2, que foi extraída do código fonte do PTRACE.

$$\begin{pmatrix} Z \\ X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(\Omega) & \sin(\Omega) \\ -\sin(\Omega) & -\cos(\Omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_0 \\ X_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2R\sin(\varphi/2)\cos(\varphi/2-\psi) \\ 2R\sin(\varphi/2)\sin(\varphi/2-\psi) \end{pmatrix} \tag{3.2}$$

onde X_0 e Z_0 são as coordenadas antes da transformação, X e Z são as

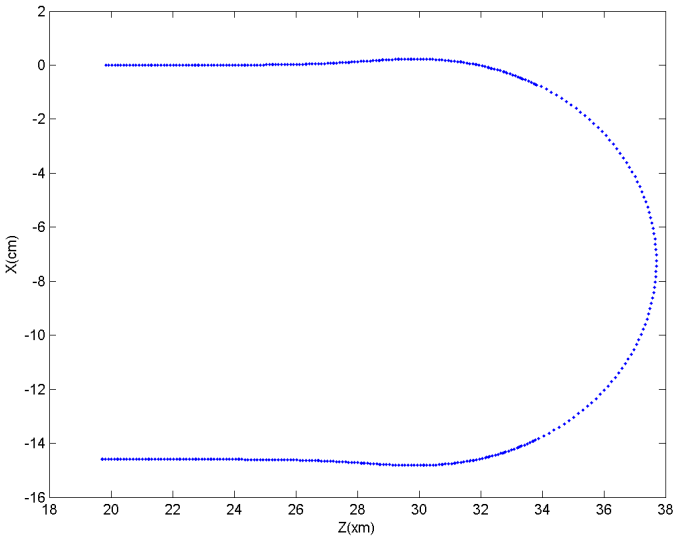

Figura 3.8: Trajetória da partícula guia dentro de um dos dipolos, após a realização das transformações inversas de coordenadas.

coordenadas transformadas, R é o raio entre os sistemas de coordenadas na entrada e na saída do dipolo, $\Omega = \varphi - \alpha - \psi$; φ é o ângulo de curvatura do dipolo, α é o ângulo de rotação da face polar na entrada do magneto e ψ é o ângulo de rotação da face polar na saída do magneto.

A equação 3.2 pode ser reescrita como

$$\vec{v} = D\vec{v}_0 - \vec{u} \tag{3.3}$$

Uma vez que é necessário desfazer a mudança de variáveis feita pelo programa, deve ser utilizada a seguinte expressão:

$$\vec{v}_0 = D^{-1}\left(\vec{v} + \vec{u}\right) \tag{3.4}$$

Realizada a transformação inversa, a apresentação dos dados é corrigida conforme mostrado na figura 3.8.

Após as mudanças de coordenadas, a rotina organiza as trajetórias de todos os dipolos, formando, assim, todo o caminho percorrido pela partícula guia dentro do acelerador. A rotina também faz o desenho da câmara de

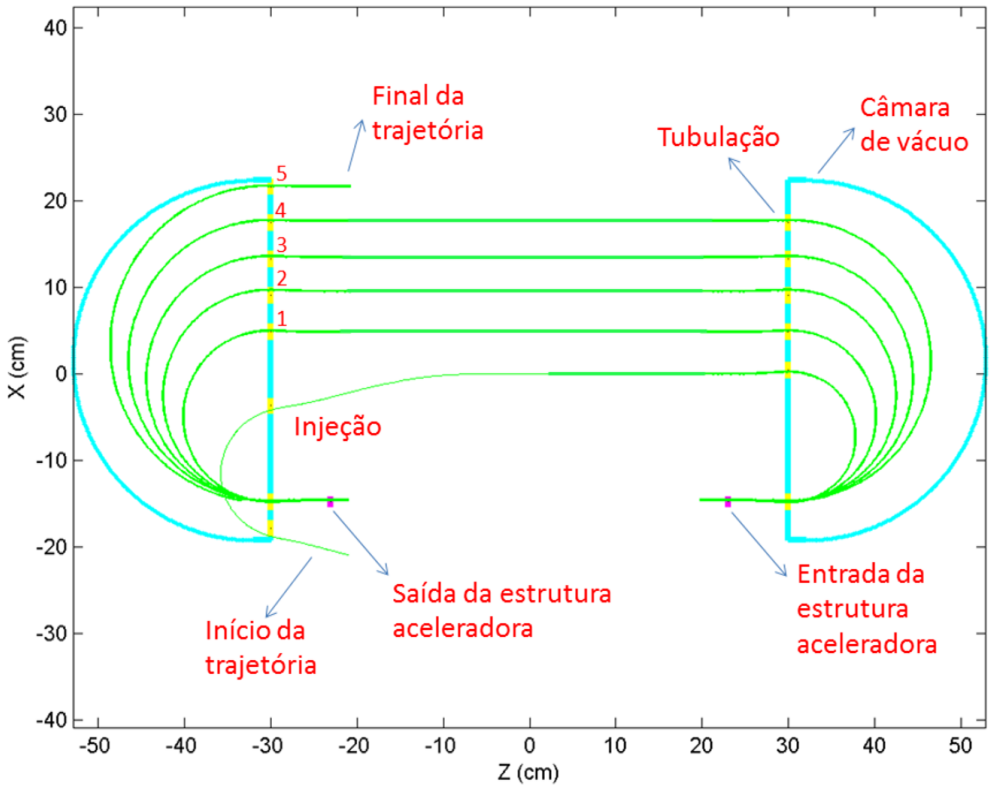

Figura 3.9: Trajetória da partícula guia no projeto original.

vácuo com as posições das tubulações, a fim de analisar se a trajetória está dentro da região delimitada ou se a partícula irá colidir com as paredes da câmara. Na figura 3.9 é mostrada a aplicação desta rotina ao acelerador definido com os parâmetros de projeto.

A partir da figura 3.9 é possível analisar a trajetória do feixe dentro da câmara de vácuo para todas as voltas. As linhas verdes indicam a trajetória do feixe, em azul claro é mostrado o desenho da câmara de vácuo, os traços verticais amarelos indicam as aberturas da tubulação que liga um dipolo ao outro e em rosa são mostradas entrada e saída da estrutura aceleradora. Na figura a distância entre os ímãs principais foi reduzida, uma vez que o que importa é a passagem do feixe pela câmara de vácuo. As distâncias das extremidades da estrutura aceleradora em relação aos dipolos também foram

modificadas na imagem, apenas para fornecer uma visualização melhor da passagem do feixe pela mesma.

Com a rotina de obtenção destas trajetórias, é possível perceber que o feixe terá que ser injetado no *booster* fora do centro da tubulação, do contrário, este não terminaria sua trajetória, conforme pode ser observado na figura 3.9. Também é possível detectar pontos do acelerador por onde o feixe passará muito próximo à câmara de vácuo. Para a simulação mostrada nesta figura, a partícula guia passará a 0,8 mm da extremidade da tubulação tanto na injeção como na segunda volta.

O PTRACE, e consequentemente o PTRACEX, utilizam um referencial tal que, no final da sua trajetória, a partícula guia, sempre volta para o zero após passar por um dipolo. Isto ocorre devido à mudança de referencial que o PTRACE faz quando a partícula passa por tal magneto. Na maior parte do acelerador, o programa usa um referencial que caminha junto com a partícula guia. Porém, para se calcular a trajetória da partícula numa região com campo magnético, o programa precisa mudar para o referencial do laboratório. O fato da partícula guia sempre estar no zero ao sair do dipolo pode causar confusões nas simulações com o PTRACE, uma vez que o referencial do programa não coincide necessariamente com o centro da tubulação, devido ao fato da câmara de vácuo já estar construída e os raios de cada volta serem fixos. Se a câmara de vácuo não estivesse construída, não haveria problemas em relação ao referencial do programa, pois os valores seriam usados de forma a coincidir tal referencial com o centro das tubulações da câmara de vácuo. Por isso a rotina que criamos para juntar as trajetórias de cada dipolo em uma única trajetória se faz tão necessária. Mesmo que o programa coloque o final da trajetória da partícula no zero, sabemos que, ao juntar todas as trajetórias, teremos o efeito cumulativo dos raios de todas as voltas.

Esta rotina é fundamental quando se pretende projetar uma nova câmara (caso do Mícrotron Principal), já que os raios da câmara de vácuo podem ser extraídos diretamente das trajetórias da partícula dentro do acelerador.

3.3.3 Obtenção da admitância

A admitância é a área do espaço de fase associada com as partículas que são aceleradas com sucesso, ou seja, ganham a energia esperada e passam por todos os elementos do acelerador sem colidir com a câmara de vácuo. A admitância transversal está relacionada com os espaços de fase horizontal e vertical, enquanto que a admitância longitudinal está relacionada com as dispersões em fase e energia do pacote de elétrons. Novamente, o fato do feixe do *booster* não ser ultra-relativístico e funcionar fora das condições de estabilidade exclui a possibilidade de se determinar a admitância por métodos analíticos. Por esta razão, foi desenvolvida uma rotina no MatLab que usa como base um Método de Monte Carlo para a determinação da admitância do *booster*.

A rotina de obtenção da admitância depende dos seguintes dados: da fase otimizada para uma dada configuração do acelerador e da posição relativa da partícula guia em relação à câmara de vácuo, ambos determinados pelas rotinas descritas anteriormente.

O princípio de funcionamento da rotina de obtenção da admitância consiste em gerar partículas nos três espaços de fase, dentro de determinados intervalos, e testá-las, uma a uma, na passagem pelo acelerador. Por "testar a partícula" entende-se monitorar características tanto da simulação quanto do próprio espaço de fase ao longo do acelerador. São geradas partículas numa área grande do espaço de fase, a fim de se delimitar uma região onde as partículas tenham sido aceleradas corretamente em todas as voltas e cheguem ao final do acelerador sem colidir com a câmara de vácuo.

Para cada partícula testada, monitora-se o tempo de execução do programa, pois ao se testar partículas fora da região da admitância do acelerador, o programa diverge e não termina a simulação. Para estes casos, o PTRACEX é finalizado automaticamente e outra partícula é gerada e testada.

Outra variável monitorada é a distância de cada partícula até a partícula guia. Uma vez que se sabe a distância da partícula guia em relação à tubulação, sabe-se qual deve ser o diâmetro máximo do feixe.

Na figura 3.10 é mostrado um fluxograma para a rotina de obtenção da admitância.

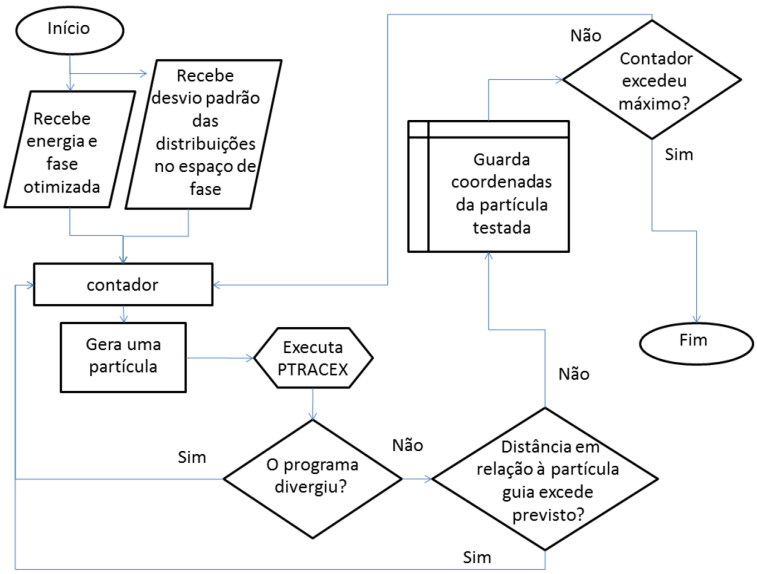

Figura 3.10: Fluxograma da rotina de obtenção da admitância.

Ao monitorar a distância de cada partícula em relação à partícula guia, são monitorados os raios realizados por tais partículas, assim como a fase com a qual cada partícula chega à entrada da estrutura aceleradora. É importante monitorar estes parâmetros para garantir que a partícula chegue à estrutura aceleradora na fase em que será acelerada, ganhando a energia necessária para realizar o raio correto em cada volta.

Nas simulações de projeto concluiu-se que o feixe do Mícrotron do IFUSP deveria ter as seguintes características [18]:

- Diâmetro do feixe: 0,2 cm;
- Abertura angular transversal: < 2 mrad;
- Dispersão em energia: 0,1%;
- Dispersão em fase: 2°.

Esta rotina foi aplicada ao acelerador definido em projeto e os resultados para a admitância nos três espaços de fase e o perfil transversal do feixe são

mostrados na figura 3.11. São marcadas em azul as características determinadas na fase de projeto. Neste caso, o intervalo de fases não é o mesmo apresentado na figura 3.4, pois os elementos de injeção foram retirados para a simulação de obtenção da admitância, o que resulta em uma nova fase para a partícula guia (no caso, -215º).

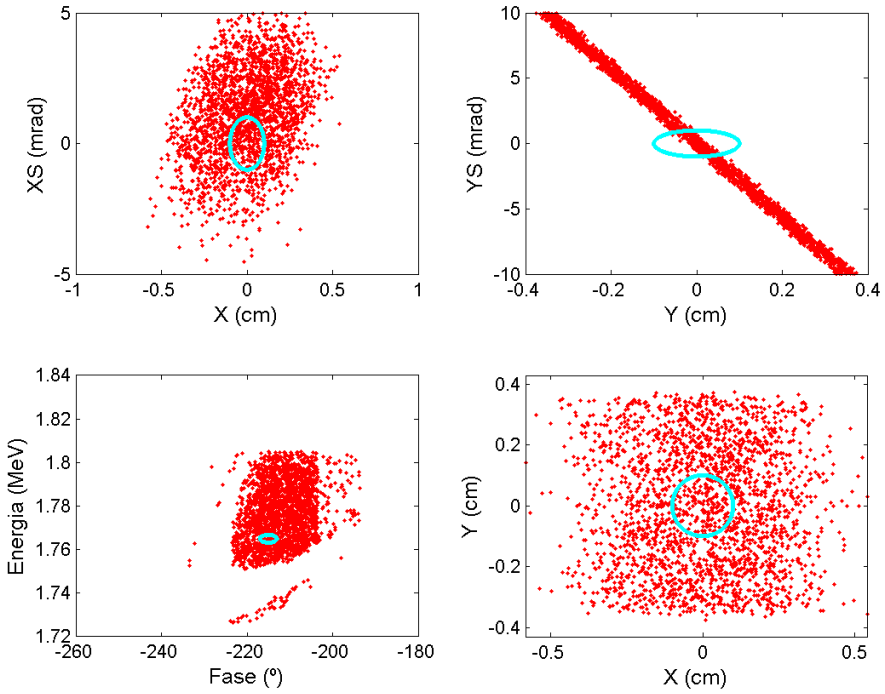

Figura 3.11: Comparação da admitância do *booster* encontrada por um Método de Monte Carlo (em vermelho) e por simulações de projeto do acelerador (região compreendida dentro da elipse azul) para os três espaços de fase. Na última figura são mostradas as dimensões transversais do feixe.

Na figura 3.11 pode-se observar que os resultados obtidos pela rotina de simulação da admitância incluem, em sua maioria, os resultados obtidos nas simulações de projeto. Foi encontrada uma região maior em cada espaço de fase, resultando, assim, em uma admitância maior do que era previsto pelas simulações de projeto. Para realizar estas comparações, as simulações realizadas tiveram como restrição apenas o raio das tubulações do acelerador, da mesma forma que foi feito no projeto original.

Apesar de terem sido encontrados valores máximos para y e y' maiores do que os obtidos nas simulações de projeto do acelerador, a região encontrada não inclui toda a região prevista anteriormente, devido à correlação existente entre y e y'.

Ao final das simulações da admitância, temos um conjunto de partículas, todas em torno da partícula-guia, definindo, assim, o feixe de elétrons capaz de ser acelerado pelo *booster*. Na figura 3.12 é mostrado um gráfico da envoltória do feixe ao longo de todo o acelerador. A dimensão do feixe é maior na direção transversal horizontal devido aos dipolos, que, ao curvarem o feixe, fazem com que este fique mais disperso por causa da dispersão em energia do feixe.

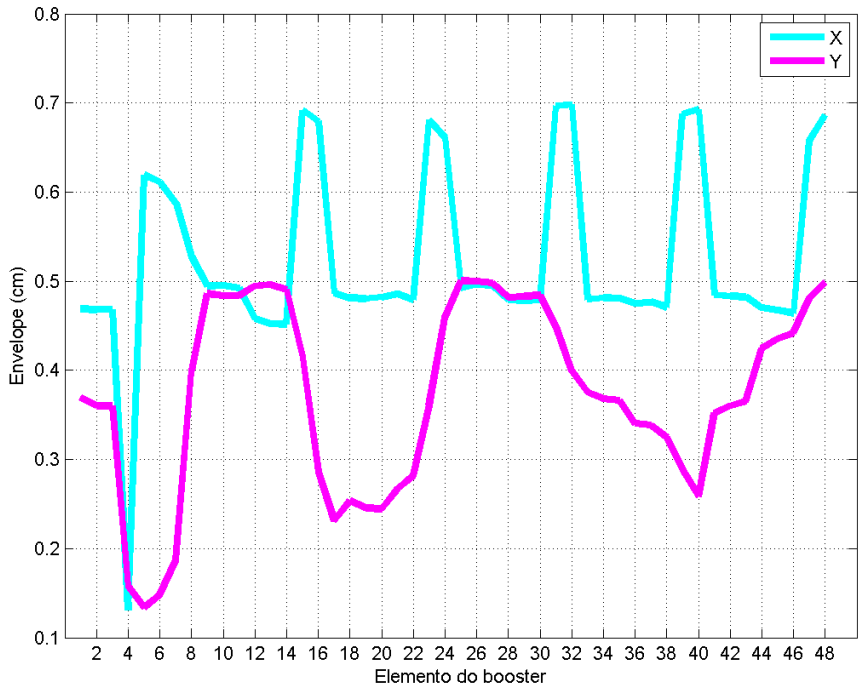

Figura 3.12: Gráfico de envelope do feixe simulado para Mícrotron definido em projeto.

As dimensões máximas do feixe ao longo do acelerador são limitadas à distância do centróide do feixe em relação à tubulação. A tubulação ao longo

de quase todo o *booster* possui 7 mm de raio. Apenas na estrutura aceleradora o feixe passa por uma tubulação de 5 mm de raio. Nos resultados mostrados na figura 3.11, estas foram as únicas restrições impostas nas simulações, considerando o centróide do feixe coincidindo com o centro da tubulação.

3.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi discutida a metodologia empregada nas simulações e otimizações do Mícrotron *booster* do IFUSP. Os códigos de simulação desenvolvidos usam como base o programa PTRACE, programas escritos em linguagem C e rotinas feitas na plataforma MatLab.

Três rotinas principais foram desenvolvidas, sendo uma delas para a determinação da fase da partícula guia, outra para a determinação da trajetória da partícula guia dentro do acelerador e a última para obtenção da admitância do acelerador. Todas estas rotinas foram aplicadas inicialmente ao acelerador definido em projeto, mostrando boa concordância com os resultados da época.

Com a rotina de obtenção da fase, foi possível identificar configurações do acelerador que não possuem solução estável. Um resultado importante obtido com esta rotina foi a tolerância máxima para desvio do campo elétrico da estrutura aceleradora mantendo-se as mesmas condições de campo magnético. O limite de erro no valor do campo da estrutura é 5% para menos e 10% para mais.

A rotina de obtenção da trajetória da partícula guia dentro do acelerador nos fornece informações sobre a passagem do feixe dentro do acelerador. Para o acelerador definido em projeto, foi possível concluir, com os resultados desta rotina, que a partícula guia passará muito próximo à tubulação (no caso, a 0,8 mm), tendo pontos agindo como "estrangulamento" do feixe. Então, faz-se necessária a otimização dos parâmetros do estágio, a fim de encontrar uma nova configuração, na qual o centróide do feixe passe mais próximo ao centro da tubulação.

As rotinas desenvolvidas foram aplicadas a esta otimização do Mícrotron do IFUSP e os resultados obtidos são apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados das simulações

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações do Mícrotron *booster*, utilizando os códigos apresentados no capítulo 3. As primeiras simulações foram realizadas para o projeto original e com feixe de entrada de 1,765 MeV de energia. Tais simulações mostraram que alterações na posição de um dos eletroímãs (D3), implicavam em melhoras na trajetória do feixe dentro do acelerador. Como consequência destas alterações, houve um incremento nos parâmetros de admitância deste estágio.

A otimização da distância e da intensidade de campo dos magnetos principais, juntamente com variações de fase da partícula guia foram realizadas com a intenção de aproximar as órbitas do feixe do centro da tubulação, diminuindo a possibilidade de colisão de partículas com as paredes da câmara de vácuo.

Após as simulações e otimizações dos parâmetros do Mícrotron para a energia prevista em projeto (1,765 MeV), iniciamos o estudo de viabilidade da adequação deste estágio para um feixe de entrada de 1,9 MeV. Isto se fez necessário, uma vez que medidas de energia do feixe do injetor indicaram um valor de 1,909(5) MeV [4].

Utilizando a versão otimizada como ponto de partida, procuramos uma condição de aceleração com um feixe de entrada com energia mais alta. Uma configuração do *booster* para um feixe de entrada de 1,9 MeV é viável, como será apresentado.

4.1 Otimizações para o feixe de 1,765 MeV

A sintonia dos parâmetros de operação do Mícrotron *booster* consiste em se otimizar os valores para as diversas variáveis envolvidas neste acelerador, tal que se obtenha, na saída do acelerador, um feixe com boas qualidades ópticas.

Partindo dos parâmetros definidos em projeto, listados na tabela 3.4, foram feitas algumas variações de tais parâmetros, com a finalidade de melhorar a posição do feixe em relação ao acelerador. Estas modificações se fazem necessárias, pois conforme é mostrado na figura 4.1, para as configurações de projeto, o centróide do feixe passaria muito próximo à tubulação do acelerador.

Modificações nos parâmetros do acelerador, como distância entre os eletroímãs, campo magnético dos dipolos principais e campo elétrico da estrutura aceleradora implicam em modificações nas órbitas do *booster*. Ou seja, variações nos ganhos de energia por volta e variações nos raios das órbitas realizadas. Mudanças na trajetória devido a estes parâmetros ocorrerão principalmente após a primeira passagem pela estrutura aceleradora. Já para obter modificações na injeção do feixe no acelerador, é preciso realizar mudanças tanto no campo dos ímãs principais, que definem os raios na primeira passagem pelo IN e IS, como na posição relativa entre o IN e o D3.

Para cada conjunto de modificações realizadas nos parâmetros do acelerador, faz-se necessário a utilização das três rotinas descritas no capítulo 3. A rotina de otimização da fase, que é a primeira a ser utilizada em cada simulação, é capaz de mostrar quando tal configuração não possui solução. Ou seja, se para uma dada configuração do acelerador, é possível encontrar uma fase tal que a partícula guia realize os raios das trajetórias em cada volta com valores próximos aos raios da câmara de vácuo. Se não existir fase, já se sabe que com tal configuração o Mícrotron *booster* não seria capaz de funcionar. Portanto a rotina de otimização das fases é indispensável para avaliações de novas configurações do acelerador. Já a rotina de obtenção da trajetória dentro do acelerador é capaz de mostrar a posição do feixe em relação ao acelerador, indicando possíveis pontos críticos na passagem do

feixe. É a distância da partícula guia em relação ao acelerador que irá definir a restrição utilizada na terceira rotina de simulação, que é a rotina de obtenção da admitância. O conjunto dos resultados das três rotinas desenvolvidas é capaz de mostrar se uma determinada configuração do acelerador é viável ou não e até mesmo qualificar determinadas configurações, auxiliando na determinação da configuração final que otimiza o feixe na saída do acelerador.

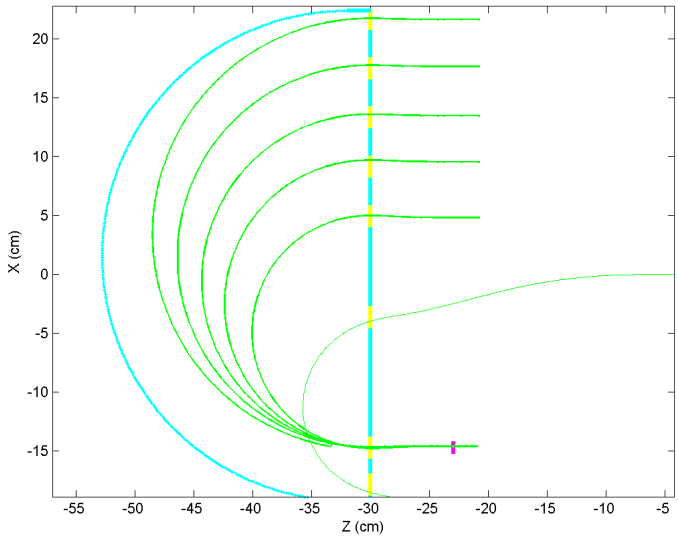

Figura 4.1: Ampliação da trajetória da partícula guia para o acelerador definido em projeto, mostrando que a partícula passa muito próxima à tubulação tanto na injeção como na segunda volta.

4.1.1 Variação do campo magnético

Como pequenas variações de campo acarretam em pequenas variações nos raios das trajetórias realizadas pela partícula guia, o primeiro parâmetro que sofreu modificações foi o campo magnético dos ímãs principais. Porém tais modificações não foram suficientes para fazer com que o feixe realizasse a trajetória dentro do acelerador de maneira a passar mais longe da tubulação. Ainda mais que o valor do campo magnético não podia sofrer grandes mo-

dificações, devido ao fato do Ímã Norte ser usado para injeção do feixe no acelerador, e o raio do feixe estar pré-determinado pela construção da câmara e pela energia do feixe de entrada.

4.1.2 Variação da fase

Após encontrar a fase ideal para a configuração de projeto do acelerador, nota-se que existe um vale no gráfico de χ^2, conforme observado na figura 3.4. Foram testadas diferentes fases deste vale, pois estas resultavam em diferentes raios realizados em cada volta. Porém o que se notou foi que tais variações isoladas não foram suficientes para resultar em grandes modificações nas trajetórias dentro do acelerador.

Com as modificações de campo magnético e fase, foi possível observar que a partícula guia possuía uma região crítica no acelerador, onde esta sempre passava muito próxima à tubulação. Esta região é formada pelos elementos de injeção do feixe no acelerador, correspondendo à primeira passagem pelo ímã Norte, à passagem pelo ímã de 15°, à passagem pelo *drift* entre os ímãs principais e à primeira passagem pelo ímã Sul. Enquanto a partícula guia passa fora do centro da tubulação, para o lado negativo (em X) na injeção, ela passa na segunda volta fora do centro para o lado positivo (em X), mostrando que não adiantaria deslocar o feixe lateralmente na entrada, pois isto agravaria o problema em outras partes do acelerador. Portanto, modificações na distância entre os eletroímãs principais e entre os ímãs Norte e D3 se fizeram necessárias, para que se conseguisse, independentemente, mudanças na injeção e nas órbitas do *booster*.

4.1.3 Mudança da distância entre o D3 e o IN

A distância entre o dipolo de 15° (D3) e o ímã principal Norte (IN) está relacionada com o deslocamento do feixe na direção X, conforme mostrado na figura 4.2. A diferença entre as trajetórias vermelha e verde, mostradas na figura, é que para a trajetória vermelha o D3 se encontra cerca de 2 cm mais próximo ao IN do que para a trajetória verde. Note que o deslocamento na direção X entre os pontos A e B é maior do que o deslocamento na direção

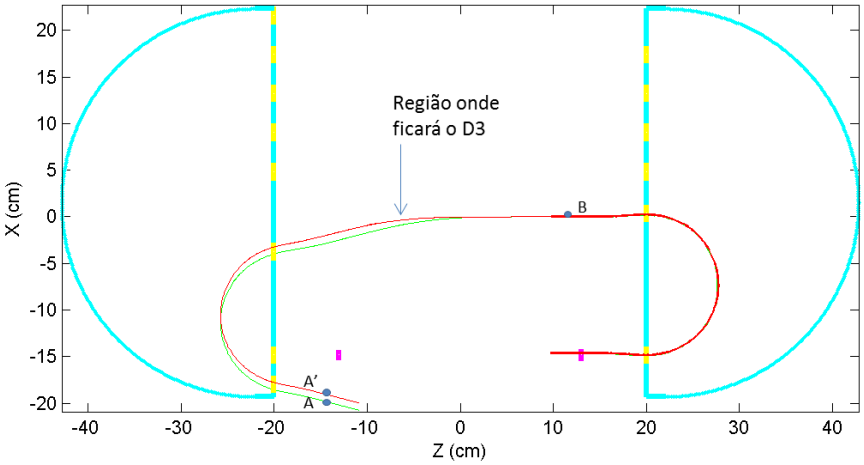

Figura 4.2: Mudança da trajetória da partícula guia na injeção devido ao deslocamento do ímã D3 em relação ao IN. Para a trajetória vermelha, o D3 se encontra mais próximo do IN do que para a trajetória verde.

X entre os pontos A' e B. Portanto uma aproximação do D3 em relação ao IN faz com que o deslocamento do feixe em X seja menor, resultando em um feixe mais centrado em relação à tubulação. Este deslocamento não afeta as órbitas do *booster*, uma vez que para ambos os casos o feixe incide no IS na mesma posição.

Para realizar a modificação da distância destes eletroímãs, foi necessário realizar um estudo das distribuições de campos magnéticos de cada magneto. Como estes se encontram próximos um ao outro, foi necessário fazer a sobreposição das distribuições dos campos magnéticos de ambos. A fim de facilitar futuras modificações desta posição relativa, foi elaborada uma rotina em que, dadas as distribuições de campos e a distância entre os ímãs, é feita a sobreposição dos campos na região de interesse. A rotina também separa a região de campo de borda de cada magneto, que são os dados que devem ser inseridos no arquivo de entrada do PTRACE.

O mapeamento da distribuição de campo do D3 é mostrado na figura 4.3 [26]. Juntamente com o campo magnético são mostradas as posições da borda virtual e física do dipolo, bem como a seleção do campo de borda do magneto. A posição da borda virtual é calculada considerando o modelo *hard-edge*, isto

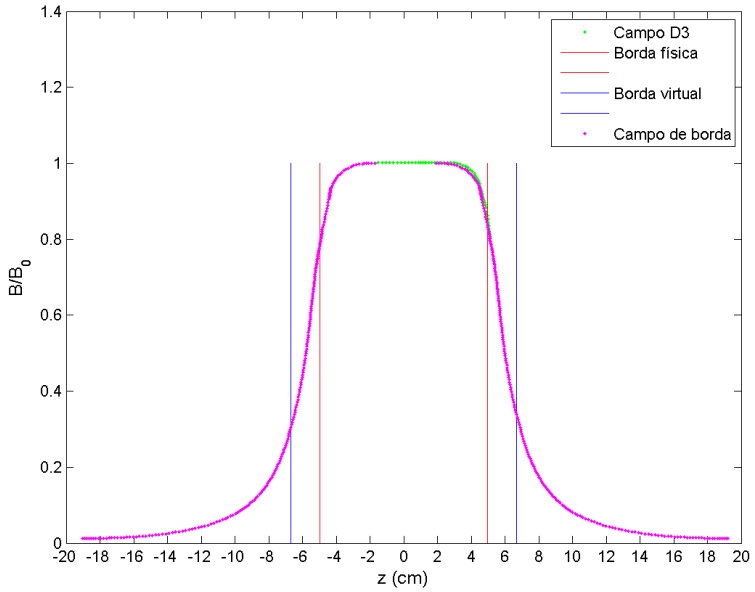

Figura 4.3: Mapeamento do campo do ímã D3.

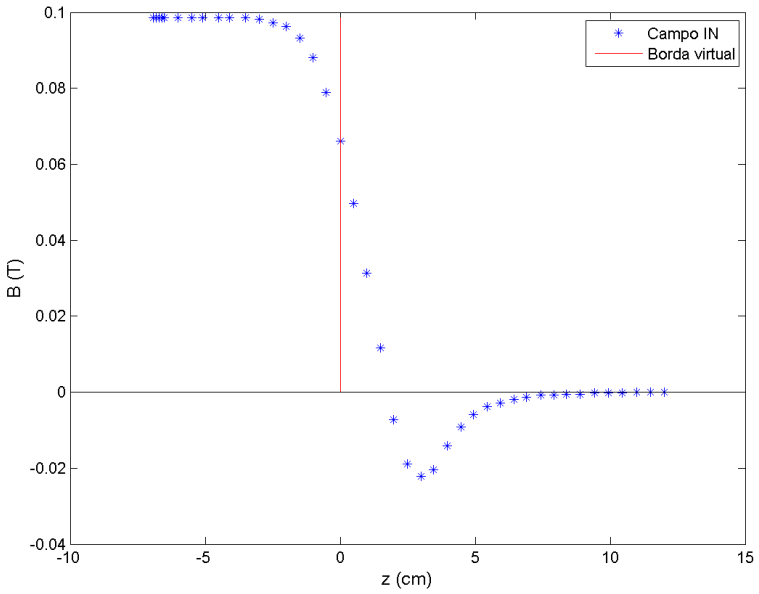

Figura 4.4: Mapeamento do campo de borda do IN.

é, o dipolo real é substituído por uma região com campo uniforme na direção axial e campo nulo fora desta região, de forma que o feixe obtenha a mesma deflexão. A intensidade do campo na região uniforme é suposta ser a mesma da região homogênea do campo do dipolo real. A distância entre as bordas física e virtual do D3 é 1,71 cm.

O campo de borda do IN é mostrado na figura 4.4 [27]. Note que a distribuição de campo do IN possui uma região de campo negativo, que é devido ao *clamp* colocado próximo à face polar do dipolo, para cancelar o efeito do campo de borda deste ímã.

Para realizar a sobreposição dos campos, primeiramente foi necessário ajustar um polinômio aos dados. Com este ajuste é possível calcular o valor do campo em qualquer posição. Na figura 4.5 é mostrado o ajuste aos dados do D3 bem como o gráfico de resíduos do ajuste. Note que a diferença entre o polinômio de grau 20 ajustado e os dados do campo de borda do D3 é menor do que 0,015%. Na figura 4.6 é mostrado o ajuste de um polinômio de grau 20 para os dados do IN. Neste caso a diferença entre o ajuste e os dados é menor que 0,013%. Em ambos os casos o grau dos polinômios ajustados é alto para minimizar os resíduos.

Com os polinômios ajustados, é possível realizar a sobreposição dos campos na região entre os dois magnetos, conforme mostrado na figura 4.7. Foi feita uma rotina de simulação no MatLab, onde, dada a distância entre as bordas virtuais e os campos dos magnetos a serem sobrepostos, é calculado o campo resultante.

Após a sobreposição dos campos, é necessário dividir a região em duas bordas, já que tanto o IN como o D3 devem ser definidos para o PTRACEX com seus respectivos campos de borda. É também necessário um número correto de valores de campo, que não deve ultrapassar 48 pontos para cada dipolo. Na figura 4.8 são mostrados os valores dos campos de borda para cada um dos dipolos inseridos no PTRACEX, bem como as posições das bordas virtuais, separadas entre si por 8,62 cm. A distância entre as bordas físicas é 10,33 cm.

Com a aproximação do D3 ao IN, foi feito o teste da fase, a fim de se avaliar se a mudança realizada pode fornecer uma solução para o *booster*. Na

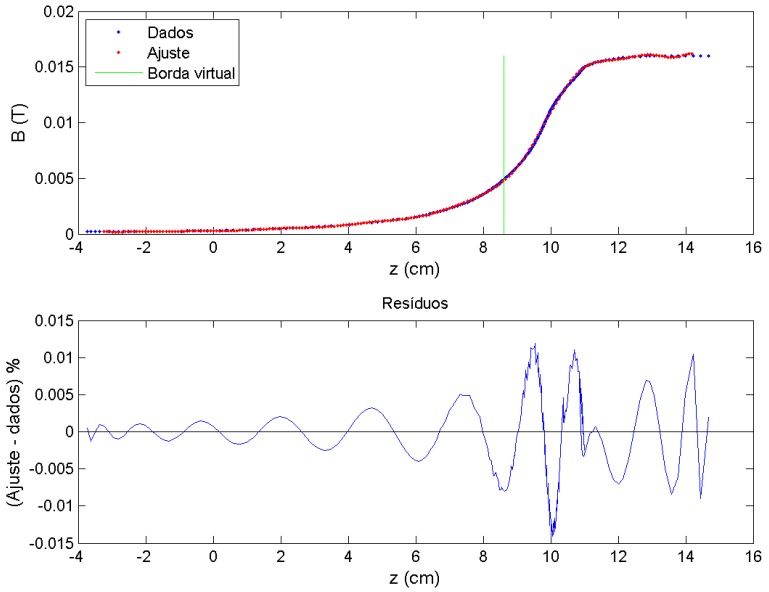

Figura 4.5: Ajuste de polinômio para o campo de borda do D3.

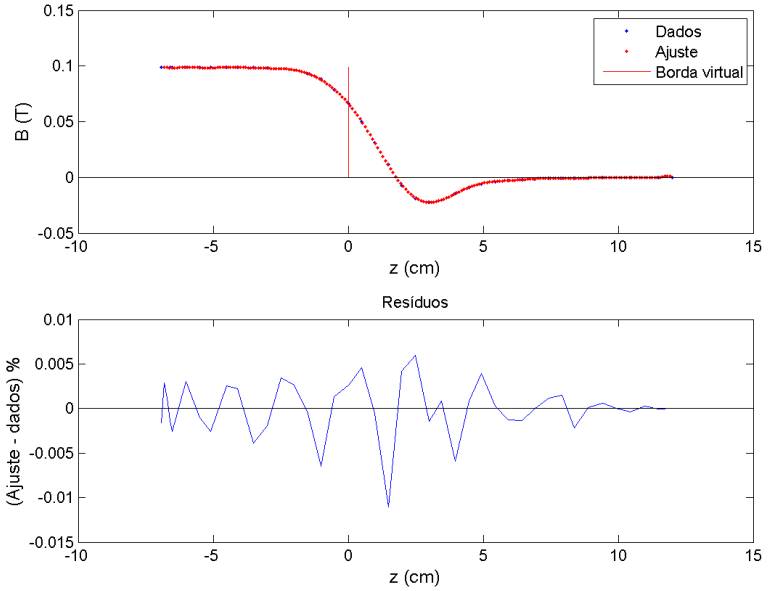

Figura 4.6: Ajuste de polinômio para o campo de borda do IN.

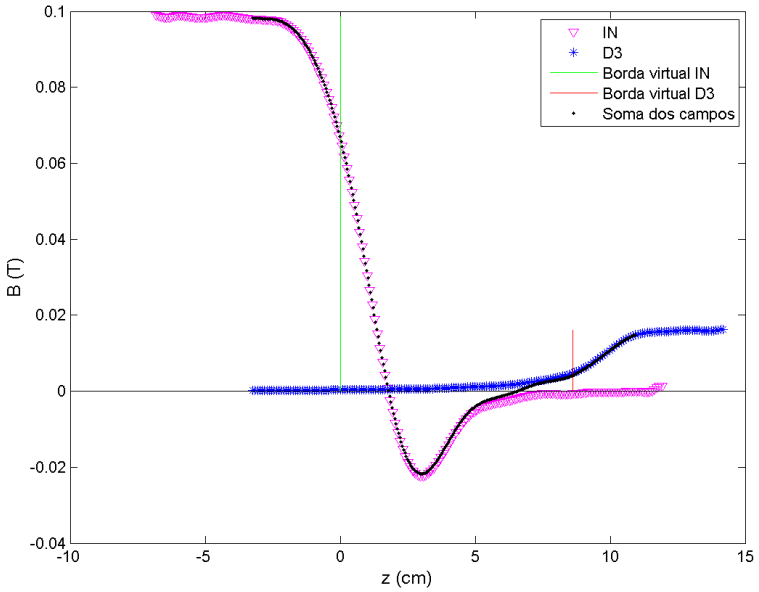

Figura 4.7: Sobreposição dos campos na região entre o D3 e o IN.

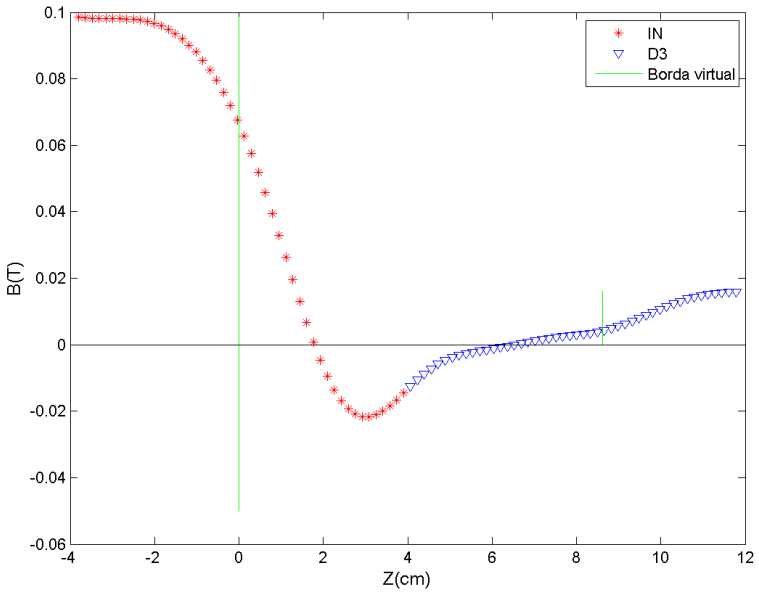

Figura 4.8: Valores finais de campo de borda efetivo para o D3 e o IN.

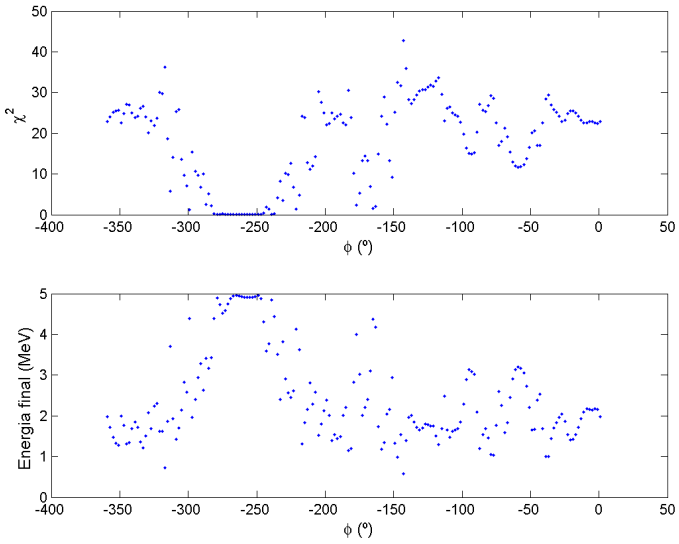

Figura 4.9: Valores de χ^2 para cada fase testada após aproximação dos eletroímãs D3 e IN.

figura 4.9 é mostrado que existe uma região onde o χ^2 é muito próximo de zero, portanto existe solução para a nova configuração do acelerador. A fase que fornece o menor χ^2 é -261°.

Com a fase encontrada, foi possível estudar a trajetória da partícula guia dentro do acelerador. Notou-se que, apesar da distância da partícula guia em relação à tubulação ter aumentado, ainda existe uma volta onde a partícula passará muito próxima da tubulação. Na figura 4.10 foi feita uma ampliação em um dos dipolos, mostrando que a região crítica para esta configuração se encontra na segunda volta. Com a rotina de obtenção da trajetória, é possível quantificar tal distância em 0,08 cm. Na figura 4.1 é mostrada a mesma região do acelerador para os parâmetros definidos em projeto, e é possível notar que a partícula guia passava muito próxima à tubulação tanto na segunda volta como na injeção (a 0,07 cm). A aproximação dos dipolos eliminou o problema na injeção. A próxima etapa de modificações é variar a distância entre os eletroímãs, pois esta está relacionada com as condições de estabilidade do *booster*. Apesar do *booster* não operar em condição de estabilidade, as soluções encontradas para uma determinada configuração

variam de acordo com os mesmos parâmetros da condição de estabilidade.

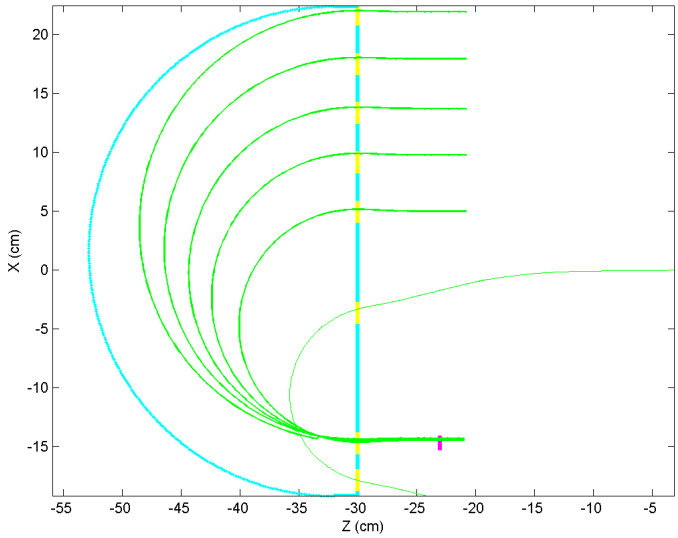

Figura 4.10: Ampliação da trajetória da partícula guia para o acelerador após a modificação da distância entre o IN e o D3.

4.1.4 Variação da distância entre os eletroímãs principais

Mudanças na distância entre os eletroímãs principais do *booster* acarretam em mudanças na fase com que a partícula chega à estrutura aceleradora, pois a distância percorrida pela partícula guia será diferente para cada valor desta distância. Conforme já foi dito anteriormente, a fase está relacionada com o ganho de energia da partícula e mudar o ganho de energia por volta pode ser a forma de fazer com que a partícula guia descreva trajetória com diferentes raios em cada volta, de maneira a passar mais longe da tubulação. Foram testados alguns valores para a distância entre os eletroímãs e o que forneceu os melhores resultados foi aumentar a distância definida em projeto em 4 mm. Ou seja, a distância foi alterada de 155,54 cm para 155,94 cm.

Na tabela 4.1 é mostrada a nova configuração para o acelerador, considerando o feixe de 1,765 MeV.

Tabela 4.1: Parâmetros do acelerador otimizados para 1,765 MeV.

Distância entre os eletroímãs principais	155,94 cm
Distância entre bordas físicas do IN e D3	10,33 cm
Campo magnético dos Ímãs Norte e Sul	0,0986 T
Campo magnético do D3	0,0156 T
Raio de curvatura do D3	47,09 cm
Campo da estrutura aceleradora	0,90 MV/m
Raio da primeira órbita	7,50 cm

Na figura 4.11 é mostrada a fase testada para a nova configuração do acelerador. A fase que fornece o menor χ^2 é -247º.

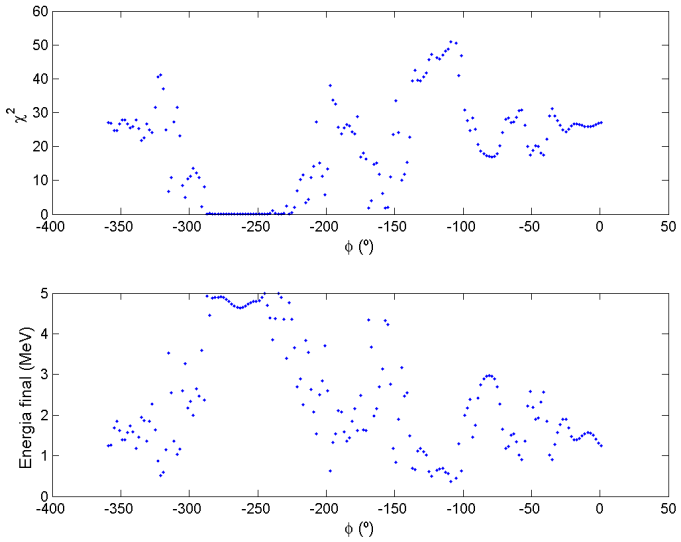

Figura 4.11: Valores de χ^2 para cada fase testada após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN.

Com este valor de fase para a partícula guia, foi possível obter a trajetória desta dentro do acelerador, conforme pode ser visto na figura 4.12. Os resultados para a configuração atual se mostraram bem melhores do que nas configurações anteriores, no que diz respeito à posição da partícula guia em relação ao acelerador. Nas regiões mais críticas, ou seja, onde a partícula passa mais próxima à tubulação, sua distância é de 2 mm. A figura 4.13 possui uma ampliação na região do IN, mostrando as regiões críticas.

Nesta nova configuração, apesar do feixe aceito pelo *booster* ainda ser limitado, a região de estrangulamento do feixe diminuiu. Ou seja, antes o raio do feixe em alguns pontos do acelerador poderia ser no máximo 0,07 cm e agora pode ser até 0,2 cm, mostrando que as modificações realizadas nos parâmetros do acelerador foram positivas.

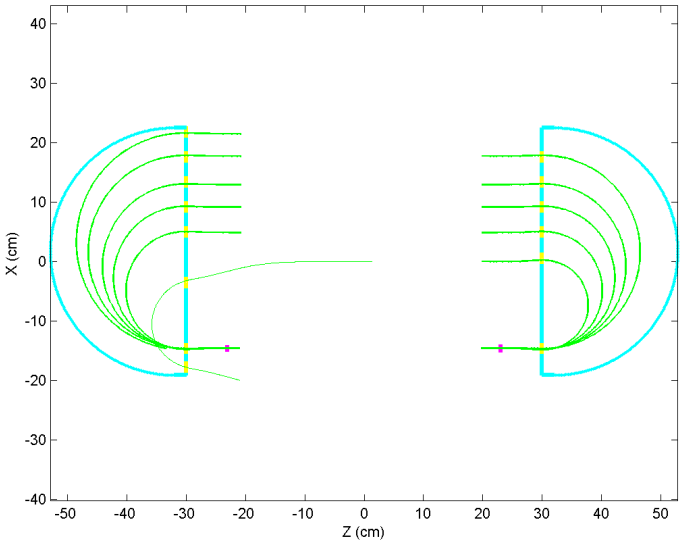

Figura 4.12: Trajetória da partícula guia após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN.

Conforme foi dito anteriormente, sabendo-se a distância da partícula guia em relação à tubulação, é possível simular a passagem das partículas pelo acelerador, a fim de se obter a admitância do *booster*. A restrição utilizada para as simulações é que a distância máxima dos elétrons em relação à partícula guia deve ser de 0,2 cm.

Na figura 4.14 são mostrados os espaços de fase transversais, o espaço de fase longitudinal e o perfil transversal do feixe para a nova configuração do acelerador. A partir desta figura, é possível analisar quais são as características que o feixe deve possuir para que seja acelerado pelo *booster*.

Por causa da restrição para esta configuração ser de 0,2 cm, as dimensões do feixe, na entrada do acelerador, nas direções x e y são limitadas.

O resultado para o espaço de fase da energia pela fase de aceleração

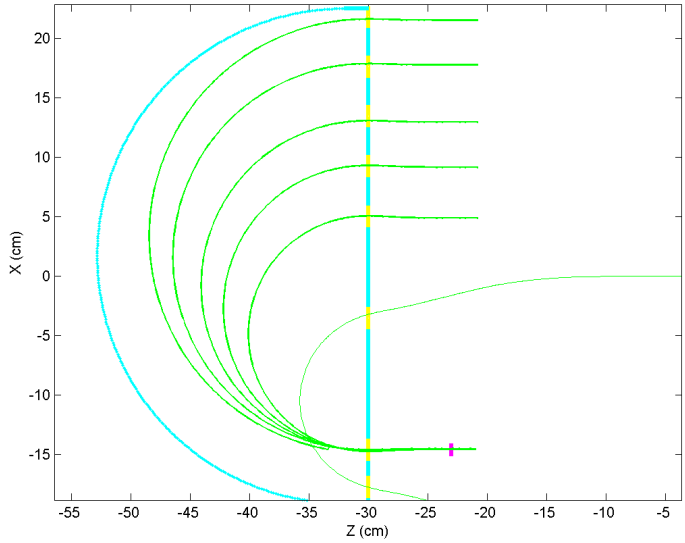

Figura 4.13: Ampliação da trajetória da partícula guia após aproximação dos ímãs principais e dos eletroímãs D3 e IN.

indica que até mesmo um feixe com dispersão relativa em energia de 0,9% e dispersão em fase de 10º em torno da fase ótima de aceleração pode ser acelerado adequadamente pelo *booster*, desde que haja a correlação correta entre estas grandezas.

A partir dos dados da figura 4.14, é possível calcular a área em cada espaço de fase. Deixando as grandezas nas unidades usuais de admitância, a área nos espaços de fase, dividida por π, em *x-x'*, *y-y'* e ϕ-E são, respectivamente, 3,08 πmm.mrad, 0,58 πmm.mrad e 0,38 πkeV.rad. Estes valores determinam a admitância do *booster* para a configuração otimizada.

Na figura 4.15 é mostrada a comparação dos espaços de fase na entrada e saída do Mícrotron *booster*. Considerando que o feixe a ser injetado no *booster* tenha exatamente as mesmas dimensões nos espaços de fase da admitância do acelerador, é possível tirar algumas conclusões de como o feixe chegará ao final do *booster*. Nos espaços de fase transversais, é possível notar que na saída do acelerador o feixe possuirá abertura angular menor do que na entrada do acelerador. Para o espaço de fase da energia e fase em relação à estrutura aceleradora, a dispersão relativa em energia na saída do acelerador

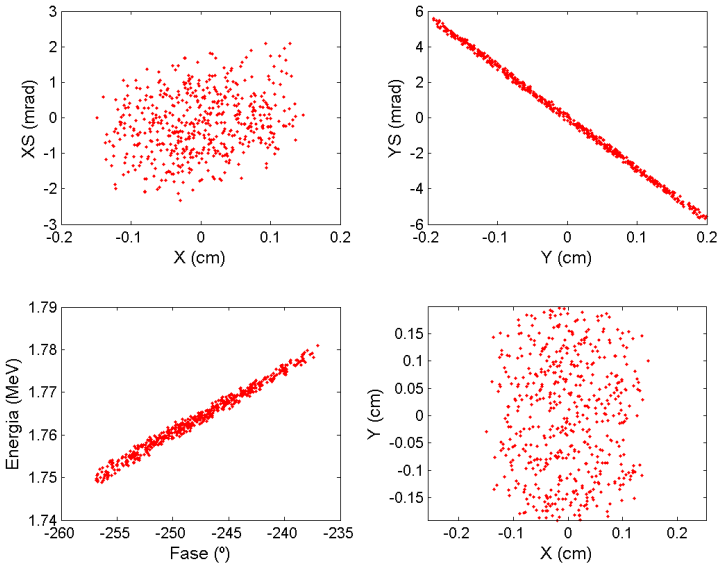

Figura 4.14: Admitância do *booster* após otimizações dos parâmetros para 1,765 MeV.

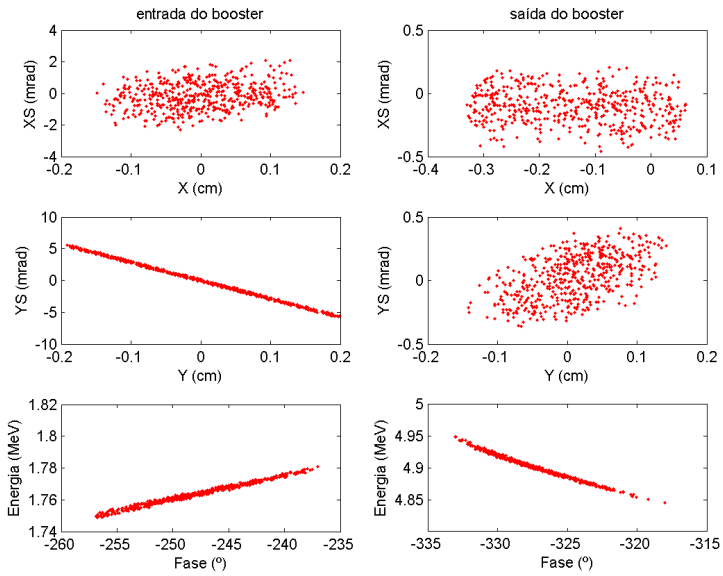

Figura 4.15: Comparação dos espaços de fase na entrada e saída do acelerador para 1,765 MeV.

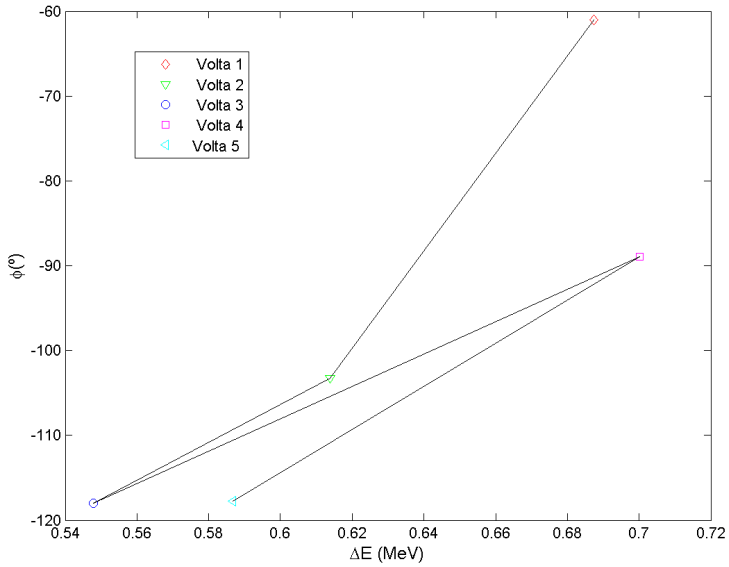

Figura 4.16: Fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta para o feixe 1,765 MeV.

será de 1% e a dispersão em fase será cerca de 8º. A energia final do feixe é 4,9 MeV.

Foi feito também um estudo da fase na entrada da estrutura aceleradora para cada volta, relacionando-o com o ganho de energia em cada passagem pela estrutura aceleradora. Na figura 4.16 é mostrado o cálculo destes desvios para a configuração do acelerador otimizada para o feixe de 1,765 MeV. Esta figura enfatiza o fato do *booster* funcionar fora das condições de estabilidade, fornecendo ao feixe ganho de energia diferente em cada volta.

Na figura 4.17 é mostrada a fase de três partículas na entrada da estrutura aceleradora, para cada volta. Uma das partículas é a partícula guia e as outras duas partículas foram simuladas de forma a chegarem à entrada da estrutura aceleradora com um pequeno desvio de fase (uma delas com +0.5º e a outra com -0.5º) em relação à fase da partícula guia. As outras coordenadas nos espaços de fase destas partículas foram mantidas iguais às da partícula guia. É possível notar que as partículas oscilam em torno da partícula guia. Esta oscilação longitudinal é também chamada de oscilação síncrotron e o

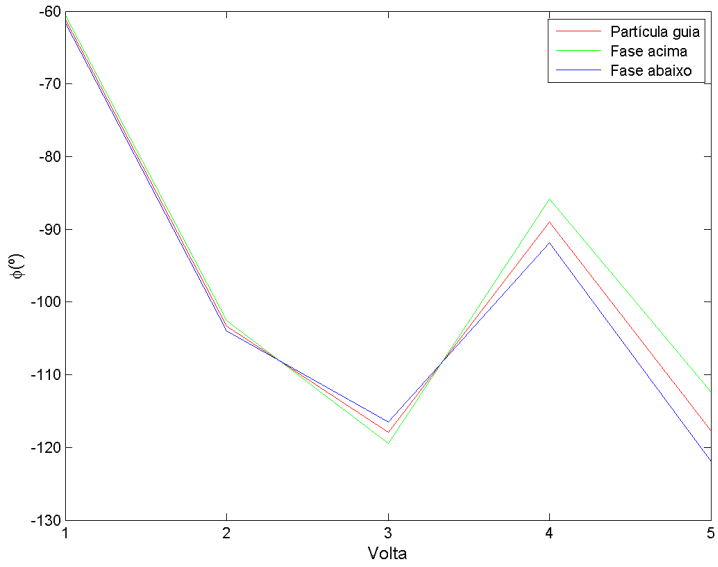

Figura 4.17: Oscilação síncrotron analisada na entrada da estrutura aceleradora.

campo elétrico da estrutura aceleradora é o responsável por esta força de restauração. É possível também, a partir desta figura, obter a fase que a partícula guia deve chegar à estrutura aceleradora, que no caso é -61°, fase da volta 1.

Apesar de funcionar fora das condições de estabilidade, conclui-se que é possível encontrar uma configuração do *booster* capaz de acelerar o feixe com energia de 1,765 MeV. Os parâmetros principais do acelerador são apresentados na tabela 4.1 e o arquivo de entrada do PTRACEX utilizado para estas simulações é apresentado no apêndice D. Em relação às configurações definidas em projeto, as principais modificações foram a distância entre os ímãs principais e entre o D3 e o IN. Tais modificações aumentaram a admitância do acelerador, já que foi possível fazer o centróide do feixe passar mais longe da tubulação.

Estas mesmas modificações foram aplicadas ao feixe de 1,9 MeV, a fim de se encontrar uma adequação deste estágio para tal energia. Foi estudada a viabilidade de se acelerar o feixe de 1,9 MeV sem grandes alterações no

projeto do acelerador, isto é, sem alterar distâncias entre elementos, apenas variando parâmetros como campos magnéticos, campo da estrutura e fase. Os resultados encontrados são apresentados na seção 4.2.

4.2 Otimizações para o feixe de 1,9 MeV

Dado que foi encontrada uma configuração para o *booster*, para um feixe de entrada de 1,765 MeV, foi feito um estudo de viabilidade de aceleração para um feixe de 1,9 MeV. Para realizar as simulações, foi necessário fazer algumas modificações inevitáveis nos parâmetros do acelerador.

(a) O campo magnético dos ímãs principais e do D3 tiveram que ser modificados de acordo com a mudança de energia do feixe, para que este realizasse o mesmo raio que o feixe de 1,765 MeV realizava em sua injeção no *booster*.

(b) O campo elétrico da estrutura aceleradora teve que ser aumentado, uma vez que energias maiores por volta eram necessárias para a realização dos raios pré-determinados no novo campo magnético fixado.

As distâncias entre os eletroímãs (D3-IN e IN-IS) foram mantidas as mesmas utilizadas para o feixe de 1,765 MeV.

Após a fixação do campo dos ímãs principais, foram realizadas diversas simulações com o intuito de se encontrar o campo elétrico para a estrutura aceleradora, capaz de acelerar o feixe corretamente. O valor final fixado corresponde à configuração que fornece a melhor posição do feixe na câmara de vácuo.

Os parâmetros para o feixe de 1,9 MeV são mostrados na tabela 4.2 e o arquivo de entrada utilizado nas simulações é apresentado no apêndice E.

Na figura 4.18 é mostrado o χ^2 obtido para as fases testadas, onde é possível notar que existe solução para esta configuração do acelerador. A fase que fornece o menor χ^2 é -285°, fornecendo um feixe com energia final de 5,2 MeV.

A rotina de obtenção da trajetória da partícula guia dentro do acelerador nos forneceu a figura 4.19.

Na figura 4.20 é mostrada uma ampliação no IN, e é possível notar que

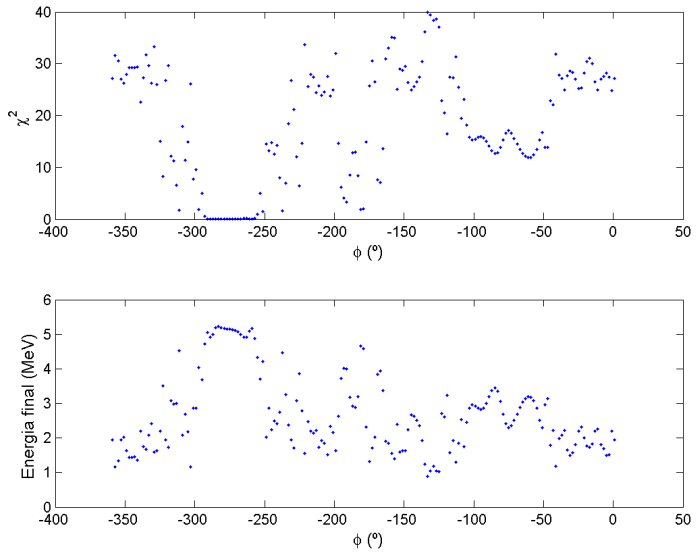

Figura 4.18: Valores de χ^2 para cada fase testada para o feixe 1,9 MeV após otimizações.

apenas na 3ª volta o feixe passará muito próximo à tubulação. Neste caso, a distância é de 0,2 cm e indica qual é a restrição que deve ser utilizada na rotina de simulação da admitância. Note que foi encontrada a mesma restrição que para o feixe de 1,765 MeV, apesar das modificações de campos magnéticos e campo da estrutura aceleradora.

Devido ao filtro imposto (0,2 cm), as dimensões transversais do feixe obtidas na rotina de obtenção da admitância para 1,9 MeV, apresentadas na figura 4.21, são semelhantes às obtidas para 1,765 MeV.

A partir dos dados da figura 4.21, é possível calcular a admitância em

Tabela 4.2: Parâmetros do acelerador otimizados para 1,9 MeV.

Distância entre os eletroímãs principais	155,94 cm
Distância entre bordas físicas do IN e D3	10,33 cm
Campo magnético dos ímãs Norte e Sul	0,1048 T
Campo magnético do D3	0,0165 T
Raio de curvatura do D3	47,09 cm
Campo da estrutura aceleradora	0,92 MV/m
Raio da primeira órbita	7,50 cm

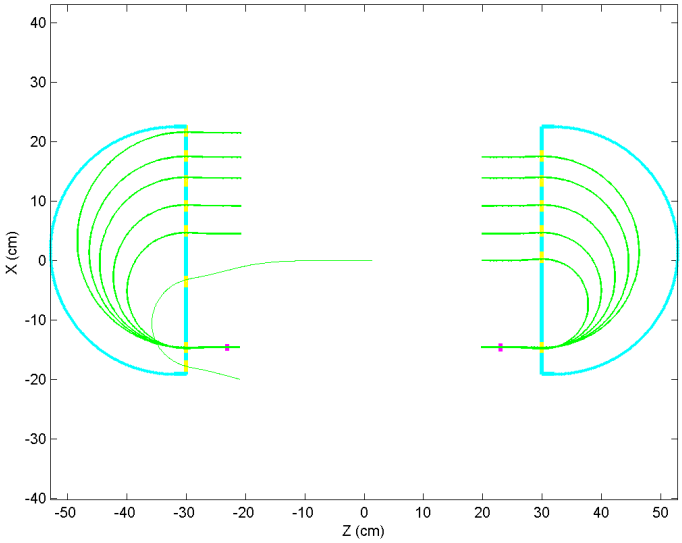

Figura 4.19: Trajetória da partícula guia para o feixe de 1,9 MeV após otimizações.

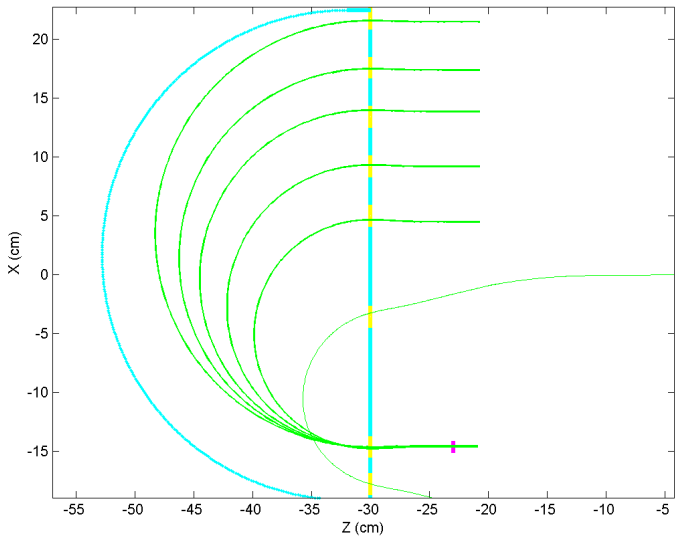

Figura 4.20: Ampliação da trajetória da partícula guia para o feixe de 1,9 MeV após otimizações.

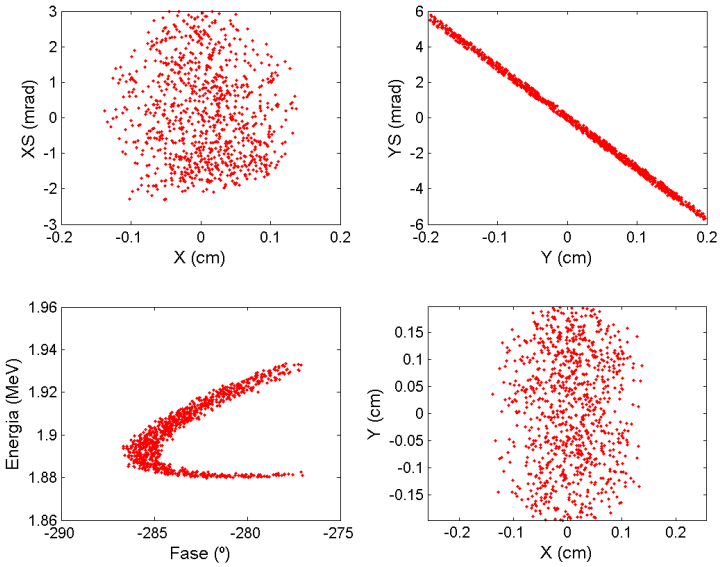

Figura 4.21: Admitância do *booster* após otimizações dos parâmetros para 1,9 MeV.

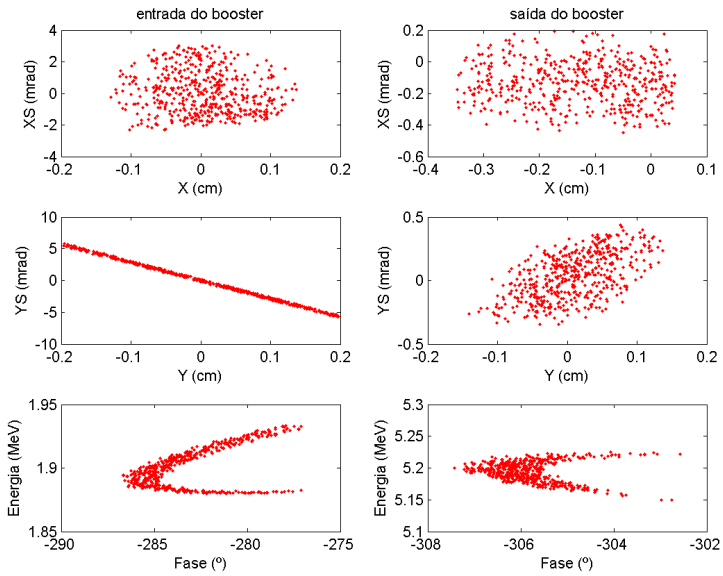

Figura 4.22: Comparação dos espaços de fase na entrada e saída do acelerador para 1,9 MeV.

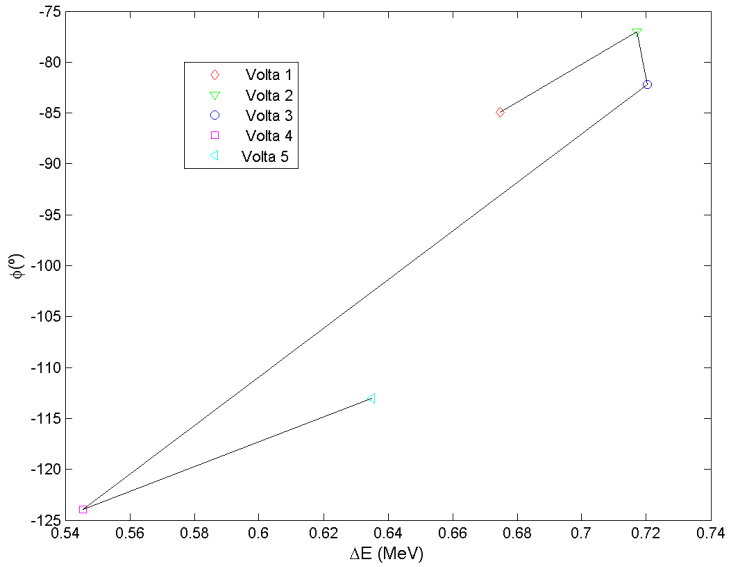

Figura 4.23: Variação da fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta para o feixe de 1,9 MeV.

cada espaço de fase. Os valores para *x-x'*, *y-y'* e ϕ-*E* são, respectivamente, 3,65 πmm.mrad, 0,62 πmm.mrad e 0,77 πkeV.rad.

Novamente, considerando que o feixe injetado no acelerador possua os espaços de fase dados pela admitância do *booster*, é possível analisar como o feixe chegará ao final do acelerador. Na figura 4.22 são mostrados os espaços de fase na entrada e na saída do acelerador.

Pode-se notar que no espaço de fase em *x-x'*, o raio máximo do feixe que pode ser acelerado pelo *booster* é um pouco maior que 0,1 cm. Já para o espaço de fase em *y-y'* o raio máximo do feixe é de 0,2 cm, porém, devido à correlação entre *y* e *y'*, a área ocupada no espaço de fase é menor do que para o espaço de fase *x-x'*, conforme pode ser observado pelo valor da admitância.

Para o espaço de fase longitudinal, o feixe no início do acelerador tem uma dispersão relativa em energia de 1,5% e dispersão em fase de 5°. No final do acelerador o feixe terá dispersão relativa em energia de 0,7% e dispersão em fase menor que 3°. Note que neste caso o feixe chegará ao final do acelerador com condições melhores do que para injeção a 1,765 MeV.

Na figura 4.23 é mostrada a variação da fase na entrada da estrutura aceleradora e o ganho de energia por volta. Novamente, é possível perceber uma grande variação da fase da partícula na entrada da estrutura aceleradora e uma grande variação da energia ganha por volta.

A partir dos resultados das simulações é possível concluir que existe uma configuração para o *booster* capaz de acelerar um feixe com energia maior do que era previsto em projeto.

4.3 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados de otimização dos parâmetros de operação do Mícrotron *booster* tanto para um feixe injetado com energia de 1,765 MeV como 1,9 MeV. Algumas modificações em relação ao projeto inicial foram feitas, de forma a aumentar a admitância do acelerador. O aumento da admitância foi possível devido ao fato de se ter encontrado uma configuração tal que a partícula guia passasse mais longe da tubulação. Foi possível diminuir o estrangulamento do feixe, pois na configuração de projeto o centróide do feixe passaria a 0,07 cm da tubulação e com as otimizações feitas, esta distância será de 0,2 cm. As principais modificações foram nas distâncias entre os ímãs principais e entre o ímã de 15º e o ímã Norte. A distância entre os ímãs principais foi aumentada em 0,4 cm, mudando de 115,54 cm para 155,94 cm. Já a distância entre as bordas virtuais do IN e do D3 foi diminuída de 10,22 cm para 8,62 cm. Portanto as bordas físicas destes magnetos são separadas por 10,33 cm.

Capítulo 5

Discussão

A partir dos resultados obtidos para o feixe de 1,9 MeV, é possível estimar a tolerância na distância entre os ímãs principais. A partir da figura 4.22, é possível ver que a largura máxima, em fase, aceita pelo acelerador é de aproximadamente 10º. Apesar disso, a fase da partícula guia é -285º e o valor mínimo que esta pode adquirir é -287º (limite inferior do espaço de fase longitudinal). Abaixo deste valor, estaríamos fora da região admitida pelo acelerador. Portanto, considerando uma variação de 2º para a fase, podemos calcular a quanto este valor corresponde em comprimento de trajetória.

$$d = \frac{2^\circ}{360^\circ}\lambda_{RF} = 0,07 \tag{5.1}$$

onde d é dado em cm. Como um comprimento de trajetória contém duas vezes a distância entre os eletroímãs principais, a tolerância estimada para esta medida é de 0,04 cm. Outra tolerância estimada com os resultados obtidos é para o campo magnético dos eletroímãs principais. Utilizando a expressão

$$Br = \frac{p}{e} \tag{5.2}$$

e diferenciando-a (considerando p e e constantes), chegamos a:

$$\frac{\Delta B}{B} = -\frac{\Delta r}{r} \tag{5.3}$$

A variação percentual do campo magnético está relacionada com a variação percentual do raio que a partícula realiza. O raio de cada órbita, por sua vez, está relacionado com o comprimento da trajetória Z percorrida pela partícula. Portanto, é possível relacionar a variação da intensidade do campo magnético com a variação do comprimento percorrido em uma dada órbita. A relação é dada pela equação 5.4.

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta r}{r} = -\frac{\Delta B}{B} \tag{5.4}$$

Conforme mostrado na equação 5.1, uma variação de 2° na fase com a qual a partícula chega à estrutura aceleradora, implica em uma variação de trajetória de 0,07 cm. Portanto a estimativa de erro máximo para B será:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{0,07}{2\pi 18,2} = 5,9.10^{-4} \cong 0,06\% \tag{5.5}$$

onde 18,2 cm é o raio da última volta. Portanto a tolerância para o campo magnético é de 0,06%. O sistema de controle garante uma estabilidade na corrente de alimentação dos eletroímãs melhor que 0,0025%, abaixo da tolerância exigida.

A tolerância para o campo da estrutura aceleradora foi discutida na seção 3.3.1 e os valores encontrados foram de 6% para menos e 10 % para mais.

Além das tolerâncias, também é possível analisar as melhores condições de inserção do feixe de 1,9 MeV no *booster*. Para isto, foram utilizados os dados de caracterização do feixe obtida em [7], que consistiu na medida de seus espaços de fase transversais e na medida de dispersão em energia. Os parâmetros das distribuições do feixe, admitindo-se que estas sejam gaussianas em cada espaço de fase, são mostrados na tabela 5.1 [7]. São também apresentados os valores da emitância transversal horizontal e vertical do feixe.

Tabela 5.1: Componentes da matriz de feixe propagados para a saída do *linac* injetor.

			Emitância
Horizontal	$\sigma_{0,11}$	3,0987(85) mm^2	**3,367(22) π mm.mrad**
	$\sigma_{0,22}$	37,429(26) mrad^2	
	$\sigma_{0,12}$	-10,205(13) mm.mrad	
Vertical	$\sigma_{0,33}$	1,7946(13) mm^2	**2,638(23) π mm.mrad**
	$\sigma_{0,44}$	10,416(64) mrad^2	
	$\sigma_{0,34}$	3,4203(61) mm.mrad	

A elipse de feixe, que é a curva de nível que delimita 68% do feixe no espaço de fase, correspondente aos valores da tabela 5.1, é mostrada na figura 5.1.

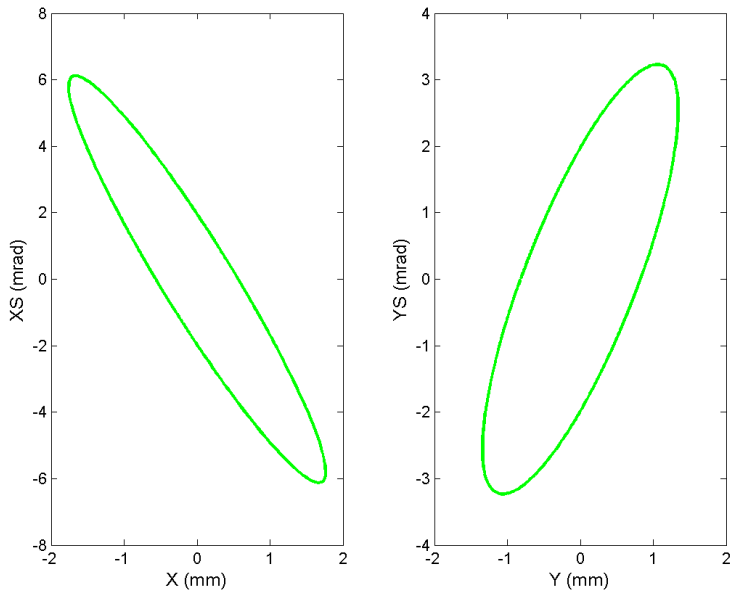

Figura 5.1: Espaço de fase do feixe no ponto de caracterização.

O espaço de fase longitudinal ainda não foi caracterizado completamente, uma vez que ainda falta a medida do comprimento do pacote de elétrons [7]. A medida da dispersão relativa em energia foi realizada e seu valor é 2,2.10^{-3}.

A caracterização do feixe foi feita 178,9 cm antes da entrada do *booster* e, neste espaço, há um tripleto de quadrupolos. Estes foram usados para transformar os espaços de fase, de forma a conseguir a orientação adequada

Tabela 5.2: Parâmetros dos quadrupolos para inserção do feixe de 1,9 MeV.

Gradiente na lente Q1	-25 G/cm
Gradiente na lente Q2	30 G/cm
Gradiente na lente Q3	-13 G/cm

na entrada do *booster*. As distâncias envolvidas são mostradas na figura 5.2, onde é mostrado um desenho esquemático dos elementos desde a região onde o feixe foi caracterizado até a entrada do *booster*.

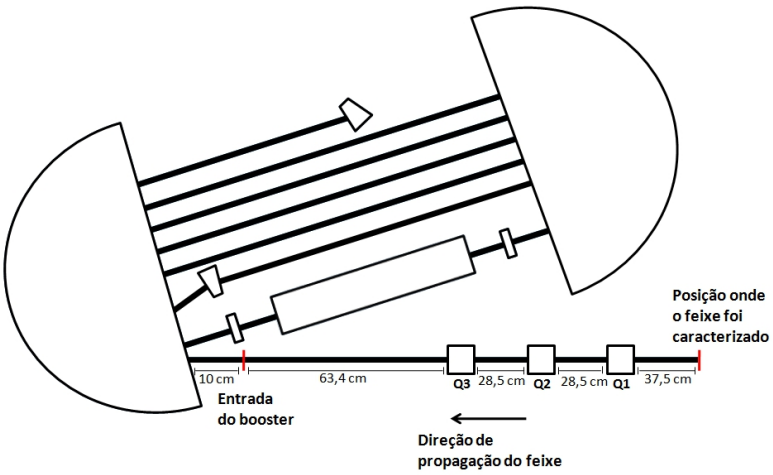

Figura 5.2: Desenho esquemático do *booster* e seus elementos de injeção.

Os valores encontrados para o gradiente dos quadrupolos estão listados na tabela 5.2. A propagação dos parâmetros do feixe foi feita conforme o formalismo matricial apresentado no capítulo 2. A sobreposição da admitância com o espaço de fase propagado é mostrada na figura 5.3.

Note que foi possível encontrar uma configuração para o tripleto de quadrupolos de forma que a distribuição do feixe coincida, em boa parte, com a região de admitância do acelerador. Para ambos os espaços de fase, a região de intersecção denota a área que contém as partículas que serão aceleradas

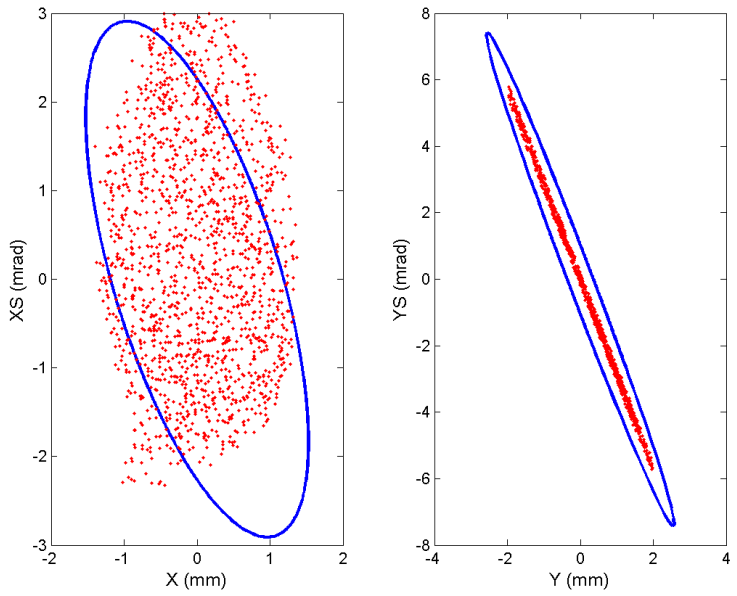

Figura 5.3: Casamento da emitância do injetor (região dentro das elipses) com a admitância do *booster* (região pontilhada).

pelo *booster*. No espaço de fase *x-x'*, a região de intersecção possui um valor de 2,62 πmm.mrad, que é menor do que a admitância e que a própria emitância transversal horizontal. Tendo em vista que as partículas que estão fora da intersecção não serão aceleradas, a emitância do feixe neste espaço de fase passa a ter este valor. No espaço de fase *y-y'*, a emitância do feixe passa a ser a admitância do *booster*, pois a intersecção da emitância com a admitância para este espaço de fase é a própria admitância e as partículas que estão fora desta região serão perdidas.

Vale ressaltar que as distribuições em ambos os espaços de fase são gaussianas e o casamento destas distribuições com a admitância do *booster* foi feito de forma que os centros das distribuições estejam dentro da admitância, pois é a região do feixe com mais partículas.

Em relação ao espaço de fase longitudinal, podemos fazer algumas considerações. A dispersão relativa em energia no ponto de caraterização do feixe é $2,2.10^{-3}$ [7] e pela figura 4.21, é possível notar que o *booster* é capaz de acelerar um feixe com dispersão em energia de $2{,}9.10^{-2}$ para um feixe de entrada

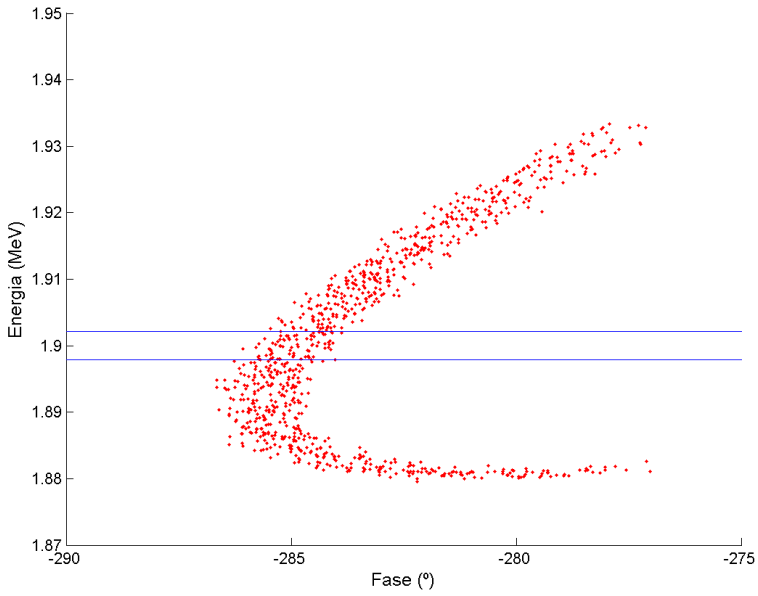

Figura 5.4: Admitância longitudinal do *booster* e faixa de dispersão em energia do feixe do injetor.

de 1,9 MeV. Como o feixe, ao passar por *drifts* e quadrupolos, mantém sua dispersão em energia constante, é possível estimar o comprimento do pacote de elétrons, para que este seja aceito pelo *booster*.

Na figura 5.4 é mostrada a admitância longitudinal do *booster* juntamente com a faixa correspondente à dispersão em energia medida. Nesta figura é possível estimar o comprimento do pacote de elétrons máximo, que corresponde à região de intersecção da admitância (em vermelho) com a região da dispersão medida (entre as linhas azuis). Para que esteja dentro da admitância, a variação máxima de fase permitida é de 1° para menos ou 1° para mais (totalizando um intervalo de 2°), que corresponde a um comprimento de pacote de 0,68 mm ou 2,3 ps.

O casamento da emitância do injetor com a admitância do *booster* mostra que o acelerador, com os parâmetros otimizados, funcionará satisfatoriamente para o feixe de 1,9 MeV. Porém, caso se queira aumentar a admitância do acelerador, de forma que uma região maior do feixe do *linac* seja aceito pelo *booster*, seria necessário construir de uma nova câmara de vácuo, já que esta

foi um fator limitante para o valor da admitância. Para os parâmetros finais de operação do *booster* para o feixe de 1,9 MeV, apresentados na tabela 4.2, os valores dos novos raios para uma câmara, tal que o feixe passe no centro da tubulação, são dados no apêndice F.

A admitância para o acelerador com a câmara de vácuo proposta foi simulada com a rotina de obtenção da admitância e os espaços de fase obtidos (pontos azuis) comparados com os da câmara atual (pontos vermelhos) são apresentados na figura 5.5.

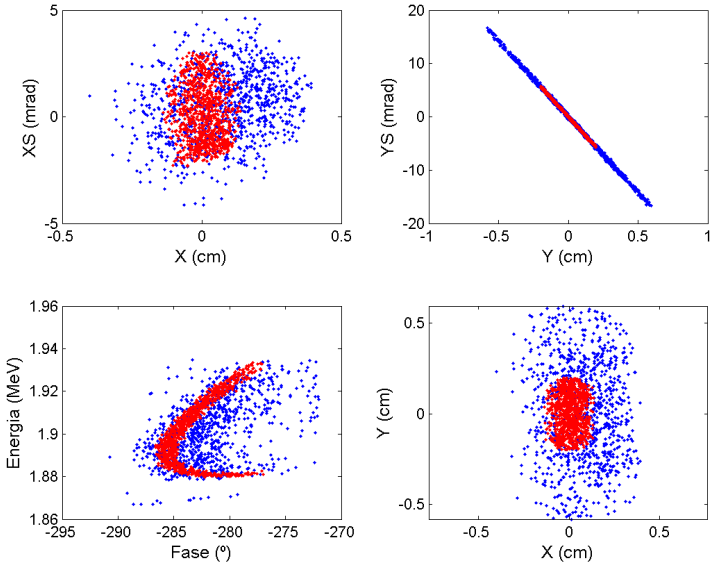

Figura 5.5: Comparação da admitância do *booster* para a câmara proposta (azul) e para a câmara atual (vermelho).

Os valores da admitância neste caso são: 15,6 πmm.mrad, 4,58 πmm.mrad e 2,7 πkeV.rad para os espaços de fase em *x-x'*, *y-y'* e ϕ-*E*, respectivamente.

Capítulo 6

Conclusões

A metodologia empregada nas simulações se mostrou satisfatória, uma vez que foi possível, apesar da operação fora das condições de estabilidade, encontrar uma configuração de aceleração para o *booster*. Os parâmetros de operação foram otimizados para a energia prevista em projeto e foi possível adaptá-los de forma a encontrar uma solução para o feixe de 1,9 MeV, dispensando a necessidade de se ter que diminuir a energia do feixe do injetor.

Para o feixe de 1,765 MeV, os valores de admitância, na entrada do *booster*, nos espaços de fase em *x-x'*, *y-y'* e ϕ-E foram respectivamente 3,08 πmm.mrad, 0,58 πmm.mrad e 0,38 πkeV.rad. Para o feixe de 1,9 MeV os valores de admitância foram 3,65 πmm.mrad, 0,62 πmm.mrad e 0,77 πkeV.rad para os mesmos espaços de fase. Note que para os três espaços de fase a admitância do *booster* para o feixe de 1,9 MeV é maior do que para o feixe de 1,765 MeV. Isto ocorre devido ao fato do feixe de 1,9 MeV estar mais perto da estabilidade do que o feixe de 1,765 MeV.

Para a realização das otimizações, foram necessárias algumas alterações nos parâmetros de projeto do acelerador. As principais alterações foram da distância entre os eletroímãs principais e da distância entre o IN e o D3. Estas alterações foram muito significativas na melhora da trajetória do feixe dentro do acelerador, uma vez que foi possível aproximá-la do centro da tubulação. Adaptações para o feixe de 1,9 MeV foram realizadas com sucesso, apenas com mudanças de campos magnéticos, campo acelerador e fase.

Tabela 6.1: Parâmetros finais de operação do *booster* e elementos de injeção para 1,9 MeV.

Distância entre os eletroímãs principais	155,94 cm
Distância entre bordas físicas do IN e D3	10,33 cm
Campo magnético dos ímãs Norte e Sul	1048 G
Campo magnético do D3	165 G
Raio de curvatura do D3	47,09 cm
Campo da estrutura aceleradora	0,92 MV/m
Raio da primeira órbita	7,50 cm
Fase na entrada da estrutura	-85º
Campo dos solenóides	350 G
Comprimento efetivo dos solenóides	4,5 cm
Quadrupolo Q1	-25 G/cm
Quadrupolo Q2	30 G/cm
Quadrupolo Q3	-13 G/cm
Comprimento efetivo de cada quadrupolo	7 cm

O casamento da emitância do *linac* com a admitância do *booster* para os espaços de fase transversais foi realizado com sucesso. Para o espaço de fase longitudinal, foi possível estimar em 2° o tamanho máximo do comprimento do pacote de elétrons que será aceito pelo *booster*.

Os parâmetros de operação do *booster* para 1,9 MeV são listados na tabela 6.1.

Para os mesmos parâmetros de operação determinados neste trabalho, para o feixe de 1,9 MeV, deixamos a proposta de uma nova câmara de vácuo, que condiz com a trajetória realizada pelo feixe. Vale ressaltar que eventuais mudanças na energia do feixe ou até mesmo nos campos magnéticos e de aceleração, podem acarretar em mudanças no projeto desta nova câmara.

Com este trabalho surgem as seguintes perspectivas de pesquisa:

- Início de operação do Mícrotron *booster*;
- Caracterização do comprimento do pacote de elétrons do feixe;
- Caracterização do feixe no final do Mícrotron *booster*;
- Casamento da emitância do feixe do Mícrotron *booster* com a admitância do Mícrotron Principal.

Apêndice A

Códigos desenvolvidos

A.1 Roda PTRACEX

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Roda_ptrace.m

disp('Iniciando preparacao do arquivo de entrada do ptrace.');
if system('prepara') == 0 % junta as particulas com o resto do acelerador
  disp('Preparacao completada com sucesso.');
  disp('Executando ptraceX.');

  if system('ptraceX') == 0
    disp('PTRACE executado com sucesso.');
    disp('Preparando banco de dados para o MATLAB.');

    if system('LAGE') == 0 % codigo que separa somente a parte util do OUTFILE
      echo on
      disp('LAGE executado com sucesso.');
      disp('Execucao da analise habilitada');
    else
      disp('Erro no LAGE.');
      return;
    end
  else
      disp('Erro no ptrace.');
  end
else
    disp('Erro no prepara.');
end
```

A.2 Otimiza fase

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Otimiza_fase.m

meanE=1.9;
B=0.104750;

raios=[76, 98.2, 119.3, 140.3, 161.2, 182.0];% mm
fator= 5.3333*10^(-22);
carga=1.6*10^(-19);
p=B*carga*raios*10^(-3)/fator;
E=sqrt(p.*p+0.511^2);
E_esperado=E-0.511;
Qui2=0;
voltas=5;
cont2=1;
cont3=1;

j=48;  % total de elementos no arquivo de saida
j2=48; % elemento que se deseja analisar

for meanPHI=-359:2:1

  erro=0;

  n=1; % numero de particulas

  sigX=0.0;
  sigXS=0.0;
  sigY=0.0;
  sigYS=0.0;
  sigE=0.0;
  sigPHI=0.0;
  rx=0;
  ry=0;

  M=gera_particulas_adm(sigX, sigXS, sigY, sigYS,sigPHI, sigE,
  meanPHI, meanE,rx,ry, n);
  roda_PTRACE;

  if testa_dados(n,j)
    B2=Acha_elemento(n,j2);
  else
    disp('Falha no banco de dados.');
    erro=1;
```

```
    continue;
  end

  Entrada(cont2,:)=M;
  Saida(cont2,:)=B2;

  el=12; %saida da estrutura
  for i=1:voltas
    A=Acha_elemento(n,el);
    E_volta(i)=A(:,6);
    PHI_volta(i)=A(:,5);
    el=el+8;
  end

  Qui2=0;
  for i=1:1:5
    Qui2_i=(E_esperado(i+1)-E_volta(i))^2;
    Qui2=Qui2+Qui2_i;
  end


end


if erro==0;
  TabelaPHI(cont2)=meanPHI;
  TabelaQui2(cont2)=Qui2;
  energia_final(cont2)=E_volta(5);
  E_otimizadas(cont2,:)=E_volta(:);
  cont2=cont2+1;
end
```

A.3 Roda partícula guia

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Roda_guia.m

j=48;     % total de elementos no arquivo de saida
j2=48;    % elemento que se deseja analisar

n=1; % numero de particulas
echo off

meanE=1.9;
```

```
meanPHI=fase;

sigX=0;
sigXS=0;
sigY=0.0;
sigYS=0;
sigE=0*10^(-3);
sigPHI=0;

rx=0;
ry=0;

M=gera_particula_guia(sigX, sigXS, sigY, sigYS, sigPHI, ...
... sigE, meanPHI, meanE,rx,ry, n);

roda_PTRACE;
```

A.4 Obtenção das trajetórias

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Plota_microtron.m


figure;
list=dir('DIPOLO*.txt');
L=30; %9.7;
s=0;
alinha3=14.5179+0.1-0.075;% ajusta posicao da camara
RB150=7.5032;
RB15=47.089;
RB14=18.202;
last = 0;

%%  trajetorias do dipolo 5 ao dipolo 13

% clf;
dif1=zeros(1,5);
dif2=zeros(1,5);
dif3=zeros(1,5);
dif4=zeros(1,5);
m=120;
i=1;
j=1;
```

```
for k=5:1:13
hold on
A = arruma_dados(load(list(k).name),15);

Z = (-1)^k * A(:,6) - (-1)^k * L;
X = (-1)^(k) * A(:,4);% + last;

X = X - X(1) + last;

if k==5
    alinha =-X(1);
    alinha2=-X(size(X,1));
end
 plot(Z,X,'g','linewidth', 1); hold on
 hold on
 last = X(size(X,1));
 esqmin=esq-0.7-alinha3;
 dirmin=dir-0.7-alinha3;
 esqmax=esq+0.7-alinha3;
 dirmax=dir+0.7-alinha3;

end
box on

%% Dipolo 14

A=load(list(14).name);
X=A(:,4);
Z=A(:,6);
hold on
pos1=find(X==max(X(1:1:floor(size(X,1)/2))));

%Segundo campo de borda

k=14;
phi=pi;
alpha=0;
beta=0;
RB=RB14;
M=zeros(2,2);
M(1,1)=-cos(phi-alpha-beta);
M(1,2)=sin(phi-alpha-beta);
M(2,1)=-sin(phi-alpha-beta);
M(2,2)=-cos(phi-alpha-beta);
U=zeros(2,1);
U(1,1)=2*RB*sin(phi/2)*cos(phi/2 -beta);
U(2,1)=2*RB*sin(phi/2)*sin(phi/2 -beta);
ListV0=zeros(size(X,1)-(pos1+1),2);
for i=pos1+2:1:size(X,1)
V=zeros(2,1);
```

```
V(1,1)=Z(i);
V(2,1)=X(i);
V0=M'*(V+U)
ListV0(i-pos1-1,1)=V0(1,1);
ListV0(i-pos1-1,2)=V0(2,1);
end
hold on
Z(pos1+2:1:size(X,1))=ListV0(:,1);
X(pos1+2:1:size(X,1))=ListV0(:,2);
Z = (-1)^k * Z - (-1)^k * L;
X = (-1)^(k) * X;
X = X - X(1) + last;
plot(Z,X,'g','linewidth', 1); hold on
xlabel('Z (cm)')
ylabel('X (cm)')

%%  dipolos 1 e 2
A=load(list(1).name);
X=A(:,4);
Z=A(:,6);
hold on
pos1=find(X==max(X));

phi=75*pi/180;
alpha=-15*pi/180;
beta=0;
RB=RB150;
M=zeros(2,2);
M(1,1)=-cos(phi-alpha-beta);
M(1,2)=sin(phi-alpha-beta);
M(2,1)=-sin(phi-alpha-beta);
M(2,2)=-cos(phi-alpha-beta);
U=zeros(2,1);
U(1,1)=2*RB*sin(phi/2)*cos(phi/2 -beta);
U(2,1)=2*RB*sin(phi/2)*sin(phi/2 -beta);
ListV0=zeros(size(X,1)-(pos1+1),2);
for i=pos1+2:1:size(X,1)
V=zeros(2,1);
V(1,1)=Z(i);
V(2,1)=X(i);
V0=M'*(V+U)
ListV0(i-pos1-1,1)=V0(1,1);
ListV0(i-pos1-1,2)=V0(2,1);
end
hold on
Z(pos1+2:1:size(X,1))=ListV0(:,1);
X(pos1+2:1:size(X,1))=ListV0(:,2);
Z1=Z;
X1=X; % vetor com os dados ja modificados
hold on
```

```
A=load(list(2).name);
X=A(:,4);
Z=A(:,6);
dx=X1(size(X1,1))-X(1);
Z2=Z;
X2=X+dx;
hold on
axis equal

% Junta dados dos dipolos 1 e 2
X_1=[X1' X2'];
Z_1=[Z1' Z2'];


%%  dipolos 3 e 4

A=load(list(3).name);
X=A(:,4);
Z=A(:,6);
hold on
pos1=find(X==min(X));
% Segundo campo de borda precisa ser rotacionado
phi=7.5*pi/180;
alpha=0;
beta=0;
RB=RB15;
M=zeros(2,2);
M(1,1)=-cos(phi-alpha-beta);
M(1,2)=sin(phi-alpha-beta);
M(2,1)=-sin(phi-alpha-beta);
M(2,2)=-cos(phi-alpha-beta);
U=zeros(2,1);
U(1,1)=2*RB*sin(phi/2)*cos(phi/2 -beta);
U(2,1)=2*RB*sin(phi/2)*sin(phi/2 -beta);
ListV0=zeros(size(X,1)-(pos1+1),2);
for i=pos1:1:size(X,1)
V=zeros(2,1);
V(1,1)=Z(i);
V(2,1)=X(i);
V0=M'*(V+U);
ListV0(i-pos1+1,1)=V0(1,1);
ListV0(i-pos1+1,2)=V0(2,1);
end
% plot(ListV0(:,1), ListV0(:,2),'.y')
Z(pos1:1:size(X,1))=ListV0(:,1);
X(pos1:1:size(X,1))=ListV0(:,2);
X3=X;
Z3=Z;
hold on
```

```
% Primeiro campo de borda para o primeiro dipolo - dipolo 3 sendo
% rotacionado em 15 graus, pois o referencial estava rodado em relacao ao dipolo
% de 180 graus.
alpha=(180-15)*pi/180;
M=zeros(2,2);
M(1,1)=cos(alpha);
M(1,2)=sin(alpha);
M(2,1)=sin(alpha);
M(2,2)=-cos(alpha);
V=zeros(2,1);
ListV0=zeros(size(X3,1),2);
for i=1:1:size(X3,1)
V(1,1)=Z3(i);
V(2,1)=X3(i);
V0=M'*V;
ListV0(i,1)=V0(1,1);
ListV0(i,2)=V0(2,1);
end
axis equal
Z3=ListV0(:,1);
X3=-ListV0(:,2);
hold on
A=load(list(4).name);
X=A(:,4);
Z=A(:,6);
hold on
axis equal
dZ=Z3(size(Z3,1))-Z(1);
dX=X3(size(Z3,1))-X(1);
axis equal
Z3=Z3-dZ;
X3=X3-dX;
X4=X;
Z4=Z;
% Junta dados dos dipolos 3 e 4
X_2=[X3' X4'];
Z_2=[Z3' Z4'];

%% Juntado coordenadas dos dipolos (1 e 2)  e (3 e 4)
dZ=Z_1(size(Z_1,2))-Z_2(1);
dX=X_1(size(Z_1,2))-X_2(1);
Z_2=Z_2+dZ;
X_2=X_2+dX;
hold on
Zf=[Z_1 Z_2];
Xf=[X_1 X_2];
plot(Z_1-L, X_1-Xf(size(Xf,2)), 'g');
plot(Z_2-L, X_2-Xf(size(Xf,2)), 'g');
```

A.5 Obtenção da admitância

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Admitancia.m

meanE=1.9;
B=0.104750;
meanPHI_guia=-285;
meanPHI=-285;

RandStream.setDefaultStream(RandStream('mt19937ar','seed',sum(100*clock)));

cont2=1;
cont3=1;
cont4=1;
cont5=1;
cont6=1;

j=48;       % total de elementos no arquivo de saida
j2=48;      % elemento que se deseja analisar
voltas=4;   % numero de voltas no Microtron

env_X=zeros(48,1);
env_Y=zeros(48,1);

for contador=1:500000

  n=2; % numero de particulas

  sigX=0.15;
  sigXS=3;
  sigY=0.15;
  sigYS=4.2;
  sigE=3.5*10^(-2);
  sigPHI=5;
  rx=0;
  ry=0;

  M=gera_particulas_adm(sigX, sigXS, sigY, sigYS, sigPHI, sigE, ...
  ... meanPHI,meanPHI_guia, meanE,rx,ry, n);

  Entrada_geral(contador,:)=M(2,:); % guarda todas as particulas simuladas
  roda_PTRACE;

  if testa_dados(n,j)
    B=Acha_elemento(n,j2);
```

```
else
  disp('Falha no banco de dados.');
  continue;
end

Entrada_sent(cont2,:)=M(2,:);
Saida_sent(cont2,:)=B(2,:);
cont2=cont2+1;

C=load('coordenadas.txt');

% antes da estrutura
estru_X_a=C(22:16:86,1)
estru_Y_a=C(22:16:86,3)

if max(sqrt(estru_X_a.^2+estru_Y_a.^2))>=0.2
  continue
end

Entrada_estru_a(cont5,:)=M(2,:);
Saida_estru_a(cont5,:)=B(2,:);
cont5=cont5+1;

% depois da estrutura
estru_X_d=C(24:16:88,1)
estru_Y_d=C(24:16:88,3)
if max(sqrt(estru_X_d.^2+estru_Y_d.^2))>=0.2
  continue
end
Entrada_estru_d(cont6,:)=M(2,:);
Saida_estru_d(cont6,:)=B(2,:);
cont6=cont6+1;

% envelope
env_temp_X = C(2:2:96,1)-C(1:2:95,1); % em relacao a particula guia
env_temp_Y = C(2:2:96,3)-C(1:2:95,3);%
if max(sqrt(env_temp_X.^2+env_temp_Y.^2))>=0.2
  continue;
end
env_X = max(abs( [ env_X , env_temp_X ]' ))' ;
env_Y = max(abs( [ env_Y , env_temp_Y ]' ))' ;


Entrada_env(cont3,:)=M(2,:);
Saida_env(cont3,:)=B(2,:);
cont3=cont3+1;


el=11; % entrada da estrutura
for i=1:(voltas+1) % pega valores antes de ganhar primeiro delta E
```

```
    A=Acha_elemento(n,el);
    E_volta_entrada(i)=A(2,6);
    PHI_volta_entrada(i)=A(2,5);
    el=el+8; % sempre na entrada da estrutura
  end


  el=12; % saida da estrutura
  for i=1:(voltas+1)
    A=Acha_elemento(n,el);
    E_volta(i)=A(2,6);
    PHI_volta(i)=A(2,5);
    el=el+8;
  end


  delta_E(1)=E_volta(1)-meanE;
  for i=1:(voltas)
    delta_E(i+1)=E_volta(i+1)-E_volta(i);
  end

  B=Acha_elemento(n,j2);
  ganhaE(cont4, :)=delta_E;
  E_todas_voltas(cont4,:)=E_volta;
  PHI_todas_voltas(cont4,:)=PHI_volta;
  E_todas_voltas_entrada_estrutura(cont4,:)=E_volta_entrada;
  PHI_todas_voltas_entrada_estrutura(cont4,:)=PHI_volta_entrada;

  cont4=cont4+1;


end
```

Apêndice B

Arquivo de entrada comentado do PTRACE

```
% Autora: Cristiane Jahnke
% e-mail: crisjahnke@usp.br
% Data: 07/02/2012
% Arquivo de entrada comentado do PTRACE

O arquivo de entrada do PTRACE deve conter a seguinte sequencia de dados:

- Coordenadas das particulas;
- Numero de Microtrons;
- Dados Gerais do primeiro Microtron;
- Dados da primeira sequencia de elementos de injecao;
- Dados da primeira sequencia de elementos do primeiro Microtron;
- Dados da primeira sequencia de elementos de extracao;

- Dados Gerais do segundo Microtron;
- Dados da segunda sequencia de elementos de injecao;
- Dados da segunda sequencia de elementos do primeiro Microtron;
- Dados da segunda sequencia de elementos de extracao;

(... e assim por diante dependendo do numero de Microtrons)

Porem, como so vamos colocar um microtron neste arquivo de entrada, nosso arquivo
de entrada devera ter apenas a primeira parte da sequencia citada acima:

- Coordenadas das particulas;
- Numero de Microtrons;
- Dados Gerais do Microtron;
- Dados da sequencia de elementos de injecao;
- Dados da sequencia de elementos do Microtron;
```

- Dados da sequencia de elementos de extracao;

Abaixo esta um exemplo de como os elementos devem ser apresentados em cada parte desta sequencia. O arquivo de entrada e constituido apenas de numeros, todo o restante sao comentarios.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Coordenada das particulas %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

NPTS (Numero de particulas)
8
X, XS, Y, YS, PHASE, EKIN
0.000,0.000,0.000,0.000,-141.97,1.765
0.059,0.000,0.059,0.000,-141.97,1.765
0.000,0.320,0.000,0.320,-141.97,1.765
0.059,0.320,0.059,0.320,-141.97,1.765
0.059,0.320,0.000,0.000,-141.97,1.765
0.000,0.000,0.059,0.320,-141.97,1.765
0.059,0.000,0.059,0.320,-141.97,1.765
0.000,0.320,0.059,0.320,-141.97,1.765

X, Y            sao as coordenadas das particulas [cm]
XS, YS          direcao da particula com respeito ao eixo Z [mrad]
PHASE           em graus
EKIN            e a energia cinetica da particula [MeV]
```

Note que o fato de termos oito particulas foi necessario inserir oito linhas com os dados X, XS, Y, YS, PHASE, EKIN.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Numero de Microtrons %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

NMIK
1

NMIK    Numero de Microtrons

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Dados Gerais do Microtron %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

NELEM, NUMAX, IELEM, EXELEM
8,4,16,5
TOUT (1) TOUT (2) .... TOUT(100)
1111100000000000000000000000000000000000000000
1111111111111111111111111111111111111111111111

NELEM           Numero de elementos do Microtron (maximo 20)
```

```
NUMAX           Numero de voltas no Microtron (maximo 100)
IELEM           Numero de elementos de injecao (maximo 20)
EXELEM          Numero de elementos de extracao (maximo 20)

TOUT (N) = 1    output na volta N
TOUT (N) = 0    sem output na volta N

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Dados da sequencia de elementos de injecao %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

O numero 1 indica que o elemento e uma estrutura aceleradora
(veja na tabela 3.1 o codigo de cada elemento). O segundo numero 1,
depois da virgula indica que os dados serao impressos. Se o numero
apos a virgula for 0 ou se nao houver numero, nao havera output.

ITYPE, OUT, STP
1,1
LAMBDA, EMAX, LSEK, DTNOM, PSIO
12.1,0.00001,1.0,0.3,-180.0

ITYPE    Indica qual e o elemento. Neste caso ITYPE = 1 e a estrutura aceleradora
OUT      Se for 1 temos output, se for zero ou nada, nao temos output
STP      Se STP = 1, temos output apos cada passo de integracao
LAMBDA   Comprimento de onda [cm]
EMAX     Campo eletrico maximo no eixo [MV/cm]
LSEK     Compriemnto da secao aceleradora [cm]
DTNOM    Energia ganha na fase de ressonancia [MeV] (insignificante)
PSIO     Fase da onda de RF na secao aceleradora [graus]

O numero 5 indica que o elemento e um deslocamento e/ou uma rotacao e
o numero 1 indica que os dados serao impressos.
ITYPE, OUT, STP
5,1
X0, Y0, Z0, PHIX, PHIY, PHIZ
0.0,0.0,41.956 ,0.0,0.0,0.0

X0, Y0    Deslocamento das coordenadas do feixe na direcao X ou Y [cm]
Z0        Desvio na direcao Z [cm]
PHIX, PHIY, PHIZ   Rotacao do feixe em torno dos eixos x, y e z [graus]

O numero 9 indica que o elemento e um quadrupolo.
ITYPE, OUT, STP
9,1
LQ, RAD, BF
7.0,3.2,.002884

LQ              Comprimento efetivo do quadrupolo [cm]
RAD             Raio de abertura do quadrupolo [cm]
BF              Forca do campo na face polar [Tesla]
```

```
Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,30.0,0.0,0.0,0.0

Quadrupolo (ver acima)
9,1
7.0,3.2,-.00785

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,30.0,0.0,0.0,0.0

Quadrupolo (ver acima)
9,1
7.0,3.2,.006837

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0, 58.00,0.0,0.0,0.0

O numero 2 indica que o elemento e um dipolo.
ITYPE, OUT, STP
2,1
LF1, LUI, LF2, DG, 0.0
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
A, B, D, RB, BF
16.381,0.0,12.4,7.5032,0.0986
PHI, ALPHA, BETA, NDX
75.0,-15.0,0.0,0.0
BET1, BET2, BET3, RAP1, RAP2
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
Z11, Z12, Z21, Z22
9.16,-3.25,0.0,0.0
NRMAX
27
ZRA(1).... ZRA(8)
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
ZRA(9).... ZRA(16)
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
ZRA(17).... ZRA(24)
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
ZRA(25).... ZRA(32)
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
ZRA(33).... ZRA(40)
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
ZRA(41).... ZRA(48)
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
BRA(1).... BRA(8)
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
```

```
BRA(9).... BRA(16)
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
BRA(17).... BRA(24)
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
BRA(25).... BRA(32)
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
BRA(33).... BRA(40)
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
BRA(41).... BRA(48)
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

LF1     Passo de integracao para transferencia da particula
        no campo de borda da entrada [cm]
LUI     Passo de integracao para transferencia da particula
        na regiao homogenea [cm]
LF2     Passo de integracao para transferencia da particula
        no campo de borda da saida [cm]
DG      Passo para calcular Bx e By (y=0) [cm]
A       Distancia entre coordenadas do sistema (1) e (2) [cm] (ver Manual do PTRACE)
B       Distancia entre coordenadas do sistema (3) e (4) [cm]
D       Distancia do gap ao longo do caminho central
RB      Raio entre o sistema (2) e (3) [cm]
BF      Campo magnetico dentro do magneto no caminho central [Tesla]
PHI     Angulo de deflexao [graus]
ALPHA   Angulo de rotacao da face polar na entrada do magneto
BETA    Angulo de rotacao da face polar na saida do magneto
NDX     Coordenada radial perpendicular a trajetoria central
BET1, BET2, BET  Coeficientes descrevendo o campo magnetico acima de
                 quarta ordem na vizinhanca da particula central
RAP1, RAP2            Coeficientes descrevendo a curvatura do campo
                      de borda virtual
Z11, Z12, Z21, Z22    Coordenadas dando o comeco e final do campo de
                      borda na entrada e saida
NRMAX                 Numero de pontos do campo de borda
ZRA(N)                Coordenadas z do campo de borda no ponto N
                      dividido pelo gap
BRA(N)                Valor do campo no ponto NR dividido por BF

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
0.0,5.109,12.124,7.5032,0.0986
75.0,0.0,-15.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-3.782,5.058
20
0.5599,0.5488,0.4944,0.4417,0.3840,0.3313,0.2769,0.2241
0.1681,0.1104,0.0560,0.0000,-0.0544,-0.1104,-0.1648,-0.2192
-0.2752,-0.3296,-0.3890,-0.4401,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
```

```
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.04681,-0.05156,-0.08397,-0.13904,-0.20369,-0.22244,-0.18875,-0.06870
0.12326,0.32185,0.50747,0.67517,0.80373,0.89488,0.94534,0.97781
0.98896,0.99378,0.99541,1.00194,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
5.109,0.0,8.094,38.026,0.0157
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
5.082,-2.765,0.0,0.0
22
0.6312,0.6245,0.5701,0.5156,0.4611,0.4066,0.3521,0.2976
0.2431,0.1887,0.1342,0.0797,0.0252,0.0000,-0.0293,-0.0419
-0.0964,-0.1509,-0.2053,-0.2598,-0.3143,-0.3688,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.29528,-0.27806,-0.15589,-0.06943,-0.02448,0.02402,0.08419,0.12912
0.18376,0.25472,0.33701,0.44824,0.59898,0.78996,0.77218,0.89482
0.95346,0.97687,0.98432,0.98822,0.98858,0.98976,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
0.0,15.0,14.214,38.026,0.0157
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-1.883,13.041
35
0.852,0.821,0.790,0.759,0.728,0.697,0.666,0.635
0.604,0.573,0.542,0.511,0.480,0.449,0.418,0.387
0.356,0.325,0.294,0.263,0.232,0.201,0.169,0.138
0.107,0.076,0.045,0.014,0.000,-0.017,-0.024,-0.055
-0.086,-0.117,-0.14800,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.01,0.02,0.02,0.02,0.02,0.02,0.02,0.02
0.03,0.03,0.03,0.04,0.04,0.05,0.05,0.06
0.07,0.08,0.09,0.11,0.13,0.16,0.19,0.24
0.30,0.38,0.49,0.63,0.78,0.81,0.91,0.96
0.99,0.99,1.00,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
```

```
Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,105.8089,0.0,0.0,0.0

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.5032,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

O numero 6 indica que o elemento e um solenoide
ITYPE, OUT, STP
6,1
BF, L
0.0350,4.5000

BF      Forca maxima do campo [Tesla]
L       Comprimento efetivo do solenoide [cm]

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,5.89800,0.0,0.0,0.0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Dados da sequencia de elementos do Microtron %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Estrutura aceleradora (ver acima)
1,1
12.1,0.009,78.65,0.3,0.0

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,15.9218,0.0,0.0,0.0
```

```
Solenoide (ver acima)
6,1
0.035,4.5

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,14.0,12.4,7.4121,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,126.5388,0.0,0.0,0.0

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.4121,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
```

```
Solenoide (ver acima)
6,1
0.035,4.5

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,5.898,0.0,0.0,0.0

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Dados da sequencia de elementos de extracao %%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Estrutura aceleradora (ver acima)
1,1
12.1,0.009,78.65,0.3,0.0

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,15.9218,0.0,0.0,0.0

Solenoide (ver acima)
6,1
0.035,4.5

Dipolo (ver acima)
2,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,15.0,12.4,18.202,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.02,-0.028
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0

Deslocamento e/ou uma rotacao (ver acima)
5,1
0.0,0.0,62.7694,0.0,0.0,0.0
```

Apêndice C

Desenho da câmara de vácuo

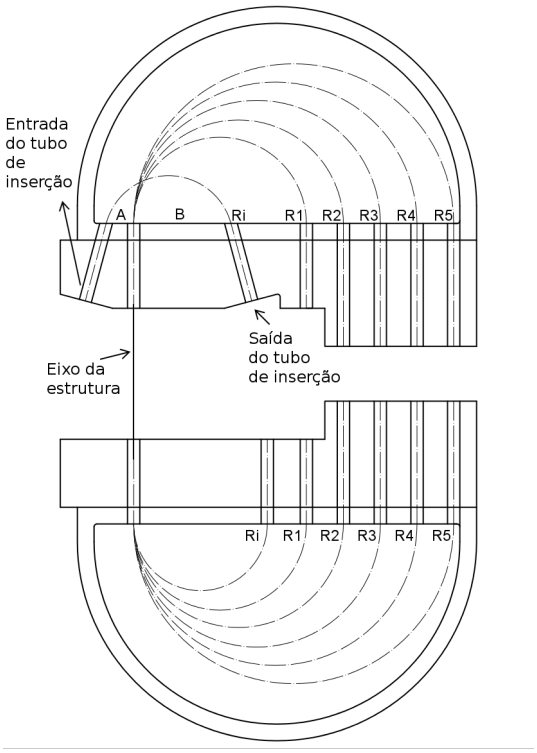

Figura C.1: Esquema da câmara de vácuo atual.

A e B são as distâncias (na face polar) entre a prolongação do eixo da estrutura aceleradora e a entrada e saída, respectivamente, dos tubos da inserção.

Tabela C.1: Medidas da câmara de vácuo

	mm
A	31,4
B	110,7
Ri	76,0
R1	98,2
R2	119,3
R3	140,3
R4	161,2
R5	182,0

Apêndice D

Arquivo de entrada final para o feixe de 1,765 MeV

```
1
8,4,10,5
1111111111111111111111111100000000000000000000
111111111111111111111111111111111111111111111111
1,1
12.1,0.00001,1.0,0.3,-180.0
5,1
0.0,0.0,10,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
16.381,0.0,12.4,7.5032,0.0986
75.0,-15.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,0.0,0.0
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
```

```
0.0,3.9680,7.71,7.5032,0.0986
75.0,0.0,-15.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-3.727,3.82
48
0.5060,0.4848,0.4635,0.4422,0.4209,0.3996,0.3784,0.3571
0.3358,0.3145,0.2933,0.2720,0.2507,0.2294,0.2082,0.1869
0.1656,0.1443,0.1230,0.1018,0.0805,0.0592,0.0379,0.0167
-0.0046,-0.0259,-0.0472,-0.0684,-0.0897,-0.1110,-0.1323,-0.1535
-0.1748,-0.1961,-0.2174,-0.2387,-0.2599,-0.2812,-0.3025,-0.3238
-0.3450,-0.3663,-0.3876,-0.4089,-0.4301,-0.4514,-0.4727,-0.4940
-0.14789,-0.16800,-0.18655,-0.20225,-0.21376,-0.21982,-0.21931,-0.21131
-0.19518,-0.17060,-0.13759,-0.09650,-0.04800,0.00694,0.06717,0.13137
0.19815,0.26614,0.33400,0.40057,0.46483,0.52597,0.58339,0.63669
0.68567,0.73029,0.77060,0.80678,0.83903,0.86758,0.89264,0.91442
0.93311,0.94888,0.96190,0.97233,0.98039,0.98630,0.99036,0.99290
0.99427,0.99487,0.99508,0.99524,0.99561,0.99636,0.99753,0.99901
2,1,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
4.65,0.0,7.71,47.089,0.015569
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
4.47,3.08,0.0,0.0
48
0.5903,0.5690,0.5477,0.5264,0.5052,0.4839,0.4626,0.4413
0.4201,0.3988,0.3775,0.3562,0.3350,0.3137,0.2924,0.2711
0.2498,0.2286,0.2073,0.1860,0.1647,0.1435,0.1222,0.1009
0.0796,0.0584,0.0371,0.0158,-0.0055,-0.0268,-0.0480,-0.0693
-0.0906,-0.1119,-0.1331,-0.1544,-0.1757,-0.1970,-0.2182,-0.2395
-0.2608,-0.2821,-0.3033,-0.3246,-0.3459,-0.3672,-0.3885,-0.4097
-0.78521,-0.66325,-0.55048,-0.45042,-0.36505,-0.29484,-0.23898,-0.19562
-0.16226,-0.13603,-0.11411,-0.09400,-0.07375,-0.05210,-0.02850,-0.00309
0.02347,0.05020,0.07599,0.09989,0.12125,0.13986,0.15608,0.17074
0.18511,0.20071,0.21915,0.24188,0.27004,0.30430,0.34479,0.39109
0.44227,0.49706,0.55394,0.61137,0.66786,0.72210,0.77302,0.81970
0.86144,0.89761,0.92773,0.95142,0.96859,0.97952,0.98504,0.98655
2,1,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
0.0,15,16.91,47.089,0.015569
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-4.38,12.17
48
0.7422,0.7209,0.6997,0.6784,0.6571,0.6358,0.6146,0.5933
0.5720,0.5507,0.5294,0.5082,0.4869,0.4656,0.4443,0.4231
0.4018,0.3805,0.3592,0.3380,0.3167,0.2954,0.2741,0.2529
0.2316,0.2103,0.1890,0.1677,0.1465,0.1252,0.1039,0.0826
0.0614,0.0401,0.0188,-0.0025,-0.0237,-0.0450,-0.0663,-0.0876
-0.1088,-0.1301,-0.1514,-0.1727,-0.1940,-0.2152,-0.2365,-0.2578
0.01188,0.01067,0.01459,0.01111,0.01356,0.01553,0.01357,0.01334
```

```
0.01648,0.01903,0.01879,0.01807,0.01983,0.02388,0.02757,0.02909
0.02946,0.03123,0.03576,0.04195,0.04742,0.05096,0.05373,0.05833
0.06643,0.07739,0.08887,0.09926,0.10965,0.12346,0.14402,0.17196
0.20516,0.24197,0.28540,0.34405,0.42743,0.53760,0.66324,0.78250
0.87457,0.93198,0.96299,0.98109,0.99247,0.99623,0.99591,0.99976
5,1
0.0,0.0,106.6480,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.5032,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
6,1
0.0350,4.5000
5,1
0.0,0.0,5.89800,0.0,0.0,0.0
1,1
12.1,0.009,78.65,0.3,0.0
5,1
0.0,0.0,16.3218,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,14.0,12.4,7.4121,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
```

```
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
5,1
0.0,0.0,126.9388,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.4121,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
5,1
0.0,0.0,5.898,0.0,0.0,0.0
1,1
12.1,0.009,78.65,0.3,0.0
5,1
0.0,0.0,16.3218,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,15.0,12.4,18.202,0.0986
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.02,-0.028
```

```
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
5,1
0.0,0.0,62.7694,0.0,0.0,0.0
```

Apêndice E

Arquivo de entrada final para o feixe de 1,9 MeV

```
1
8,4,10,5
1111111111111111111111111100000000000000000000
111111111111111111111111111111111111111111111
1,1
12.1,0.00001,1.0,0.3,-180.0
5,1
0.0,0.0,10,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
16.381,0.0,12.4,7.5032,0.104750
75.0,-15.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,0.0,0.0
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
```

```
0.0,3.9680,7.71,7.5032,0.104750
75.0,0.0,-15.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-3.727,3.82
48
0.5060,0.4848,0.4635,0.4422,0.4209,0.3996,0.3784,0.3571
0.3358,0.3145,0.2933,0.2720,0.2507,0.2294,0.2082,0.1869
0.1656,0.1443,0.1230,0.1018,0.0805,0.0592,0.0379,0.0167
-0.0046,-0.0259,-0.0472,-0.0684,-0.0897,-0.1110,-0.1323,-0.1535
-0.1748,-0.1961,-0.2174,-0.2387,-0.2599,-0.2812,-0.3025,-0.3238
-0.3450,-0.3663,-0.3876,-0.4089,-0.4301,-0.4514,-0.4727,-0.4940
-0.14789,-0.16800,-0.18655,-0.20225,-0.21376,-0.21982,-0.21931,-0.21131
-0.19518,-0.17060,-0.13759,-0.09650,-0.04800,0.00694,0.06717,0.13137
0.19815,0.26614,0.33400,0.40057,0.46483,0.52597,0.58339,0.63669
0.68567,0.73029,0.77060,0.80678,0.83903,0.86758,0.89264,0.91442
0.93311,0.94888,0.96190,0.97233,0.98039,0.98630,0.99036,0.99290
0.99427,0.99487,0.99508,0.99524,0.99561,0.99636,0.99753,0.99901
2,1,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
4.65,0.0,7.71,47.089,0.01654
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
4.47,3.08,0.0,0.0
48
0.5903,0.5690,0.5477,0.5264,0.5052,0.4839,0.4626,0.4413
0.4201,0.3988,0.3775,0.3562,0.3350,0.3137,0.2924,0.2711
0.2498,0.2286,0.2073,0.1860,0.1647,0.1435,0.1222,0.1009
0.0796,0.0584,0.0371,0.0158,-0.0055,-0.0268,-0.0480,-0.0693
-0.0906,-0.1119,-0.1331,-0.1544,-0.1757,-0.1970,-0.2182,-0.2395
-0.2608,-0.2821,-0.3033,-0.3246,-0.3459,-0.3672,-0.3885,-0.4097
-0.78521,-0.66325,-0.55048,-0.45042,-0.36505,-0.29484,-0.23898,-0.19562
-0.16226,-0.13603,-0.11411,-0.09400,-0.07375,-0.05210,-0.02850,-0.00309
0.02347,0.05020,0.07599,0.09989,0.12125,0.13986,0.15608,0.17074
0.18511,0.20071,0.21915,0.24188,0.27004,0.30430,0.34479,0.39109
0.44227,0.49706,0.55394,0.61137,0.66786,0.72210,0.77302,0.81970
0.86144,0.89761,0.92773,0.95142,0.96859,0.97952,0.98504,0.98655
2,1,1
0.1,0.1,0.1,0.1,0.0
0.0,15,16.91,47.089,0.01654
7.5,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,-4.38,12.17
48
0.7422,0.7209,0.6997,0.6784,0.6571,0.6358,0.6146,0.5933
0.5720,0.5507,0.5294,0.5082,0.4869,0.4656,0.4443,0.4231
0.4018,0.3805,0.3592,0.3380,0.3167,0.2954,0.2741,0.2529
0.2316,0.2103,0.1890,0.1677,0.1465,0.1252,0.1039,0.0826
0.0614,0.0401,0.0188,-0.0025,-0.0237,-0.0450,-0.0663,-0.0876
-0.1088,-0.1301,-0.1514,-0.1727,-0.1940,-0.2152,-0.2365,-0.2578
0.01188,0.01067,0.01459,0.01111,0.01356,0.01553,0.01357,0.01334
```

```
0.01648,0.01903,0.01879,0.01807,0.01983,0.02388,0.02757,0.02909
0.02946,0.03123,0.03576,0.04195,0.04742,0.05096,0.05373,0.05833
0.06643,0.07739,0.08887,0.09926,0.10965,0.12346,0.14402,0.17196
0.20516,0.24197,0.28540,0.34405,0.42743,0.53760,0.66324,0.78250
0.87457,0.93198,0.96299,0.98109,0.99247,0.99623,0.99591,0.99976
5,1
0.0,0.0,106.8480,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.5032,0.104750
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
6,1
0.0350,4.5000
5,1
0.0,0.0,5.89800,0.0,0.0,0.0
1,1
12.1,0.0092,78.65,0.3,0.0
5,1
0.0,0.0,16.3218,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,14.0,12.4,7.4121,0.104750
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.020,-0.028
```

```
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
5,1
0.0,0.0,126.9388,0.0,0.0,0.0
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
15.0,18.048,14.53,7.4121,0.104750
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
10.27,-3.78,-3.78,10.27
30
0.7236,0.6905,0.6563,0.6222,0.5859,0.5528,0.5166,0.4814
0.4472,0.4141,0.3778,0.3447,0.3106,0.2774,0.2412,0.2081
0.1739,0.1408,0.1056,0.0694,0.0352,0.0000,-0.0342,-0.0694
-0.1035,-0.1377,-0.1729,-0.2070,-0.2443,-0.2764,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.0016,-0.0049,-0.0065,-0.0065,-0.0065,-0.0098,-0.0098,-0.0163
-0.0212,-0.0261,-0.0408,-0.0620,-0.0930,-0.1468,-0.2104,-0.2284
-0.1941,-0.0734,0.1191,0.3181,0.5041,0.6721,0.8010,0.8923
0.9429,0.9755,0.9869,0.9918,0.9935,1.0000,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
5,1
0.0,0.0,5.898,0.0,0.0,0.0
1,1
12.1,0.0092,78.65,0.3,0.0
5,1
0.0,0.0,16.3218,0.0,0.0,0.0
6,1
0.035,4.5
2,1,1
0.1,0.2,0.1,0.1,0.0
28.021,15.0,12.4,18.07,0.104750
180.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
9.16,-3.25,-3.25,9.16
27
0.759,0.717,0.675,0.639,0.599,0.556,0.519,0.479
0.438,0.398,0.360,0.319,0.278,0.241,0.200,0.160
0.120,0.079,0.040,0.000,-0.042,-0.081,-0.120,-0.162
-0.200,-0.242,-0.283,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
-0.002,-0.005,-0.005,-0.008,-0.008,-0.013,-0.02,-0.028
```

```
-0.038,-0.060,-0.093,-0.144,-0.207,-0.225,-0.191,-0.073
0.119,0.318,0.504,0.670,0.801,0.894,0.945,0.976
0.987,0.995,1.000,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0
5,1
0.0,0.0,62.7694,0.0,0.0,0.0
```

Apêndice F

Desenho da câmara de vácuo proposta

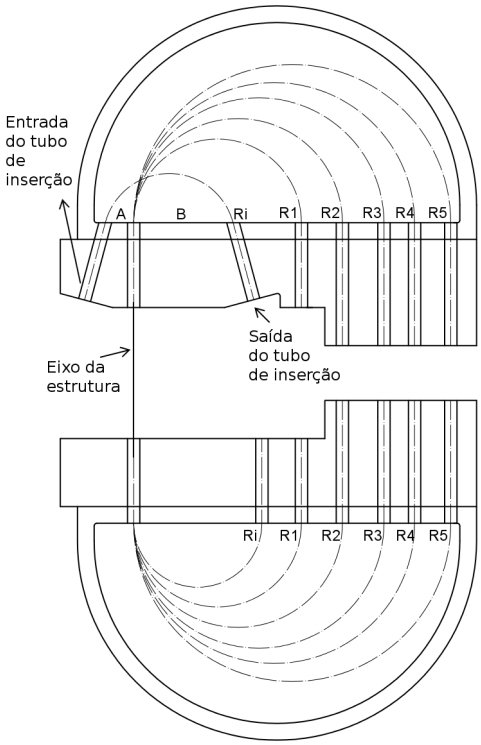

Figura F.1: Esquema proposto para projeto de uma nova câmara de vácuo.

A e B são as distâncias (na face polar) entre a prolongação do eixo da estrutura aceleradora e a entrada e saída, respectivamente, dos tubos da inserção.

Tabela F.1: Medidas da câmara de vácuo proposta

	mm
A	34,8
B	110,4
Ri	72,9
R1	95,4
R2	118,7
R3	142,4
R4	159,8
R5	180,4

Referências Bibliográficas

[1] J. Takahashi L. A. A. Terremoto M. N. Marcos, P. B. Rios: *Design of a racetrack microtron to operate outside the phase stability region.* In ***Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference**, Oregon, EUA*, 2003.

[2] P. A. Redhead: *Microtrons in Canada.* Physics in Canada, 2003.

[3] E. Branen e H. R. Froelich: *Preliminary operation of a four-sector racetrack microtron.* Journal of Applied Physics, 32:1179, 1961.

[4] Vito R. Vanin, Nora L. Maidana, Neivy L. Pino, Viktor Jahnke, José M. Fernández-Varea, Josep Sempau, Marcos N. Martins, Jiro Takahashi, Alexandre A. Malafronte, Alfredo L. Bonini, Roberto R. Lima e Tiago F. Silva: *First Experiments with the IFUSP Microtron Injector.* AIP Conference Proceedings, 1351(1):105–116, 2011. `http://link.aip.org/link/?APC/1351/105/1`.

[5] M. L. Lopes: *Projeto do Mícrotron Principal do IFUSP.* Tese de Doutoramento, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2005.

[6] N. L. Pino: *Bremsstrahlung de elétrons no microtron do IFUSP: medidas, simulação e proposta de aplicação ao estudo da ressonância fluorescente nuclear.* Tese de Doutoramento, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2011.

[7] T. F. Silva: *Sistema de monitoramento de feixe baseado em Radiação Óptica de Transição (ROT).* Tese de Doutoramento, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2011.

[8] A.P. Poseryaev Yu.A. Kubyshin e V.I. Shvedunov: *Longitudinal beam dynamics with phase slip in race-track microtrons.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 596(2):147 – 156, 2008, ISSN 0168-9002. `http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900208011364`.

[9] S. P. Kapitza Y. M. Tsipenyuk: *The Mícrotron.* Taylor and Francis, 2002.

[10] J. Takahashi: *Projeto e construção de uma estrutura aceleradora de elétrons de onda contínua.* Tese de Doutoramento, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1996.

[11] V. I. Veksler: *A new method of acceleration of relativistic particles.* J. Phys., 9:153–158, 1945.

[12] E. M. Moroz: *A cyclotron with section magnet.* Soviet Physics - Doklady, 1:326, 1956.

[13] A. Roberts: *The microtron as a high-energy, high current particle accelerator.* Annals of Physics, 4:115, 1958.

[14] H. Wiedemann: *Particle Accelerator Physics.* Springer, 2007.

[15] T. F. Silva: *Início de operação e caracterização do sistema injetor do Mícrotron do IFUSP.* Tese de Mestrado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 2006.

[16] M. Reiser: *Theory and Design of Charged Particle Beams.* Wiley-VCH, 2008.

[17] R. E. Rand: *Classical electrodynamics.* John Wiley and Sons, 3rd Edition, 1985.

[18] P. B. Rios: *Linha de Transporte de Feixe do acelerador Mícrotron do IFUSP.* Tese de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2002.

[19] S. Y. Lee: *Accelerator Physics.* World Scientific, 2004.

[20] P. Emma, Z. Huang, K. J. Kim e P. Piot: *Transverse-to-longitudinal emittance exchange to improve performance of high-gain free-electron lasers.* Phys. Rev. ST Accel. Beams, 9:100702, Oct 2006. `http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevSTAB.9.100702`.

[21] S. Cohen: *Notes for PTRACE users.* IASA Internal note: 1997, Atenas, Grécia.

[22] *MATLAB® 7, Copyright © The MathWorks, Inc.*

[23] H. Herminghaus, KH. Kaiser e U. Ludwig: *Beam optics and magnet technology of the microtron in Mainz.* **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, 187:103–107, 1981.

[24] *Manual do PTRACE.*

[25] *GNU Compiler Collection – Copyright © Free Software Foundation, Inc. URL: http://gcc.gnu.org/fortran.*

[26] J. T. Toromaru: *Projeto e construção da linha de transporte do feixe do injetor ao booster do mícrotron.* Monografia de Final de Curso apresentada à FATEC em 2000.

[27] L. R. P. Kassab: *Projeto, construção e teste do sistema de ímãs principais do acelerador Mícrotron booster do IFUSP.* Tese de Doutoramento, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1996.