

Avaliação de Parâmetros Físicos para aceleração circular de prótons para fins de terapia de tumores oculares

Luísa de Araújo Rabelo*, Tarcísio Passos Ribeiro de Campos
Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Engenharia Nuclear
Avenida Antônio Carlos, 6627, 31270-901, Pampulha, Belo Horizonte, MG, Brasil.
*luisa.rabelo@outlook.com

RESUMO: Este artigo aborda o estudo de uma unidade eletromagnética baseada em uma aceleração circular de prótons para atingir energias de 64 MeV que possa ser acoplada aos aceleradores com energia de extração de 15 MeV. Neste trabalho foram avaliados parâmetros físicos de aceleração e circulação dos prótons através de formulações da mecânica clássica e relativística e desenho técnico das principais estruturas do equipamento no AutoCAD Inventor 2013®. Os resultados mostram os principais parâmetros que envolvem a aceleração dos prótons e demonstram a viabilidade de desenvolvimento de um projeto compacto para funcionar como pós-acelerador. Reduzir os custos de fabricação, instalação e operação deste equipamento facilitará a difusão da Terapia ocular com prótons em diversos países.

PALAVRAS-CHAVE: Acelerador circular, Cíclotron, Prótons, Terapia Ocular.

ABSTRACT: This article covers the study of an electromagnetic unit based on a circular acceleration of protons to achieve 64 MeV energies that can be coupled to accelerators with energy of 15 MeV extractions. In this work we evaluated physical parameters of acceleration and movement of protons through the classical and relativistic mechanics formulations and technical project modeling in AutoCAD Inventor 2013®. The results show the main parameters that involve the acceleration of protons and demonstrate the feasibility of developing a compact unit to function as accelerator injector. Reduce costs of manufacture, installation and operation of this equipment will facilitate the dissemination of ocular Therapy with protons in various countries.

KEYWORDS: Circular Accelerator, Cyclotron, Protons, Ocular Therapy

1. INTRODUÇÃO

Nos aceleradores circulares cíclotrons, partículas com carga descrevem um movimento espiral em seu interior quando submetidas a um campo magnético perpendicular e constante. As partículas elevam sua energia cinética após passar múltiplas vezes por uma região contendo um campo elétrico oscilante, em condição de aceleração. Desde os primeiros aceleradores propostos, há um desafio em manter a harmonia entre o ciclo de oscilação do campo elétrico em condições favoráveis à aceleração e o tempo de circulação do feixe de partículas no equipamento, mantendo-se constante a radiofrequência (RF) que suporta a oscilação do campo na região de aceleração. A falta de sincronismo aparece quando ocorre alteração na massa relativística com considerável variação na velocidade angular das partículas (Kleeven *et al.*, 2011; McMillan, 1945; Strijckmans, 2001). Quando os efeitos relativísticos interferem no sincronismo, o feixe de partículas passa a encontrar um campo elétrico em condição desfavorável e ocorre desaceleração.

Nos isocrônicos cíclotrons, o sincronismo do feixe de prótons é obtido com o aumento da distância de percurso das partículas na estrutura de aceleração e variação do campo magnético através do desnivelamento dos magnetos, formando os montes e vales (Rose, 1938; Zhong *et al.*, 2010). Tais artifícios podem sincronizar o movimento dos prótons, mas limitam o tamanho do equipamento atendendo energias até 30 MeV. Estas energias são suficientes para produzir radioisótopos e radiofármacos (Ji *et al.*, 2010; Jung *et al.*, 2006; Klein *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2007).

Os sincrotrons e os isocrônicos cíclotrons supercondutores são os aceleradores circulares comumente usados quando o objetivo é a terapia com prótons, podendo acelerar feixes até 250 MeV. Esses equipamentos são de grande porte e apresentam custo elevado para aquisição e instalação. Esta é uma das causas que dificulta a introdução deste

tratamento em diversos países. (Paganetti, 2011; Peruzzo, 2008).

O cíclotron é eficiente como produtor de radiofármacos e está presente em vários países, como o Brasil. Esse acelerador pode ser usado como injetor para outra unidade aceleradora. Tais sistemas duplos podem então fornecer feixes com energia suficiente, por exemplo, para o tratamento de tumor ocular. Esta possibilidade pode reduzir o custo de implantação de um centro de terapia de prótons (Christóvão, 2010).

Os prótons possuem capacidade de fornecer doses elevadas de radiação ionizante em tumores em profundidade sem exceder a dose anterior e posterior ao tumor, minimizando a exposição dos tecidos saudáveis próximos. Os prótons são acelerados a energias suficientes para que o Pico de Bragg (máxima deposição da dose) ocorra na região do tumor. Além disso o Pico de Bragg é modulado pela conformação SOBP (*Spread-out Bragg Peak*), onde vários feixes com picos de diferentes intensidades e alcances são somados de maneira que seus picos de Bragg formem um platô de energia que será depositada em toda a extensão do tumor (SMITH, 2006).

Este trabalho propõe um método de aceleração de prótons, consistindo em uma unidade compacta com uma topologia distinta do isocrônico cíclotron. Este utiliza o cíclotron produtor de radioisótopos como um pré-acelerador para atender a feixes de prótons na faixa de 64 MeV – adequado para terapia ocular. O modelo proposto não utiliza cavidades triangulares de aceleração e o sincronismo é obtido atrasando o feixe de prótons apenas durante a circulação. A energia de aceleração dos prótons neste estudo é limitada a um intervalo entre 15 e 64 MeV, devido à dificuldade de focalização axial do feixe em altas energias.

Neste artigo são apresentados os princípios matemáticos da mecânica clássica e relativística representativos das grandezas físicas do feixe, como massa, velocidade, mo-

mento linear e energia cinética presentes nos processos de aceleração e circulação do feixe de prótons, bem como o modelo inicial e as estruturas de circulação e aceleração do equipamento, levando em consideração as alterações relativísticas das grandezas físicas do feixe. Neste momento não foi abordado o sistema de injeção e extração do feixe.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo é composto de duas regiões principais: (i) circulação, onde existe um campo magnético uniforme \mathbf{B} que permite a circulação do próton; e, (ii) aceleração, onde está presente um campo elétrico \mathbf{E} , conforme mostra a Figura 1 (a). Ambas as regiões são acopladas e distintas. Considerou-se um feixe de prótons de carga q_p e massa em repouso m_o , pré-acelerado a uma energia inicial E_o igual a 15 MeV. Este feixe passa várias vezes pela região de aceleração para atingir sua energia cinética final de 64 MeV. Cada vez que o feixe de prótons sai da unidade de aceleração ele é defletido pelo campo magnético \mathbf{B} constante na região de circulação e retorna a mesma posição inicial.

O feixe de prótons entra na estrutura de aceleração com uma velocidade inicial v_o e percorre a mesma em um tempo t_d (tempo dentro da estrutura de aceleração). Ao sair, com uma velocidade v_f , o feixe retorna ao ponto inicial após completar uma volta circular de raio R em um tempo t_f (tempo fora da estrutura de aceleração), conforme ilustra a Figura 1 (b). Sempre que a partícula com carga completar uma volta e passar pela região de aceleração, sua energia cinética aumentará, e conseqüentemente, maior será o raio R na região de circulação.

Equações que descrevem o movimento da partícula nas duas regiões são apresentadas observando correções relativísticas.

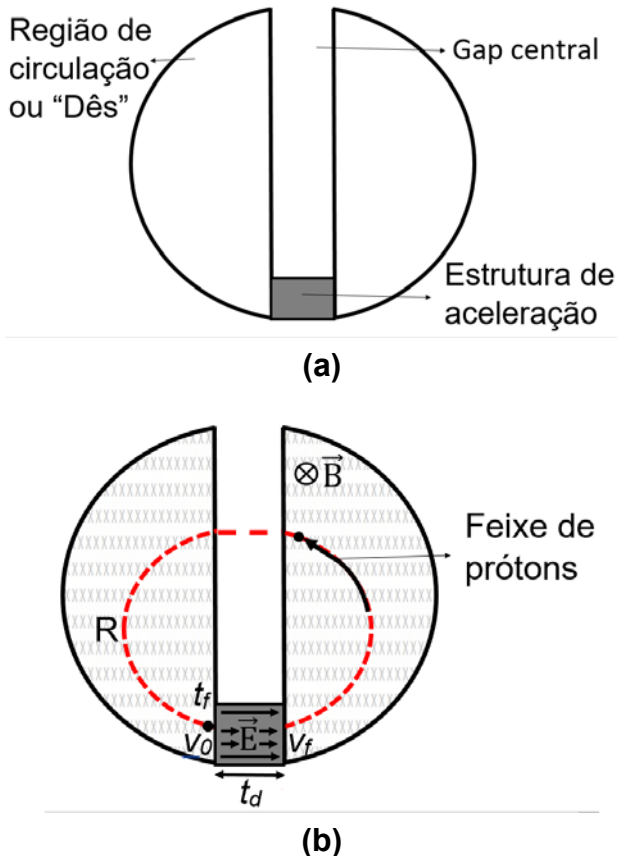


Fig 1. Ilustração da estrutura básica de aceleração de prótons (a) e circulação dos prótons nesta estrutura (b).

2.1 Região de Circulação

Considerando que a velocidade v está perpendicular ao campo magnético \mathbf{B} , a partícula evoluirá para uma trajetória circular, recebendo uma força centrípeta. O módulo da força atuante na partícula pode ser descrito pela Equação de Lorentz, considerando o campo elétrico \mathbf{E} nulo nesta região:

$$F = q_p B v \quad (1)$$

onde B e v são os módulos do campo magnético e velocidade da partícula, perpendiculares entre si. E q_p é a carga do próton. Sabe-se que o módulo da aceleração a é fornecida pela relação:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

Logo é possível calcular o raio R da trajetória do próton na região de circulação, a cada volta, substituindo as Equações (2) e (1). O valor do raio R de cada órbita i , R^i , será avaliado por:

$$Ri = \frac{p^i}{q_p B} \quad (3)$$

Foi considerado i como sendo cada órbita descrita pelo feixe ($i = 1, \dots, n$) com uma velocidade e energia distinta, e p^i é o módulo do momento linear relativístico da partícula de cada órbita i , equivalente a mv . Em termos de energia cinética da partícula em cada órbita i , dito E_c^i , é obtido o módulo do momento linear p^i , como:

$$p^i = \sqrt{2m_o E_c^i} \quad (4)$$

onde m_o é a massa da partícula. Por sua vez, o módulo do momento linear relativístico p_r^i pode ser encontrado pela Equação (5):

$$p^i = \frac{1}{c} \sqrt{E_c^{i2} + E_c^i m_o c^2} \quad (5)$$

Substituindo a Equação (4) em (3) ou (5) em (3), obtém-se o raio do movimento circular, levando em consideração a mecânica clássica R^i , ou relativística R_r^i , tal que:

$$Ri = \frac{i = \sqrt{2m_p E_c^i}}{q_p B} \quad \text{ou} \quad R_r^i = \frac{p_r^i}{q_p B} \quad (6)$$

2.2 Região de aceleração

Na região de aceleração, por simplificação adotou-se um potencial V e um campo elétrico \mathbf{E} constante. A energia cinética E_c da partícula no início da região de aceleração é avaliada como:

$$E_c = \frac{1}{c} m_0 v^2 \quad (7)$$

Sendo a energia cinética inicial E_c^1 da partícula incidente igual a 15 MeV, cada vez que o próton passar pela região de aceleração receberá energia de $q_p \Delta V$ em Joules, assim expressa:

$$E_c^1 = E_0 + q_p \Delta V \quad (8)$$

Para calcular a velocidade v^i da partícula em cada órbita, aplica-se a seguinte expressão:

$$v^i = \frac{\sqrt{2m_0 E_c^i}}{m_0} \quad (9)$$

Por sua vez, a velocidade relativística v_r^i pode ser calculada pela Equação (10), onde p_r^i é o momento linear relativístico e pode ser substituído pela Equação (5).

$$v_r^i = \frac{p_r c}{\sqrt{m_0^2 c^2 + p_r^2}} \quad (10)$$

sendo c a velocidade da luz igual a 3×10^8 m/s.

Para conhecer o tempo total de cada órbita t^i , necessário para que a partícula complete o percurso/órbita, basta somar os dois tempos: dentro da região de aceleração (t_a) e o tempo na região de circulação (t_f), tal que:

$$t^i = t_a^i + t_f^i \quad (11)$$

Para uma aceleração a constante, dependente apenas de um campo elétrico constante (capacitivo), a velocidade v na estrutura de aceleração dependerá da velocidade inicial v_0 e da aceleração a da partícula, tal que:

$$v = v_0 + at \quad (12)$$

Sabendo que:

$$m(v - v_0) = p - p_0 \quad (13)$$

onde p é o momento linear da partícula, têm-se:

$$t_a^i = \frac{p^i - p^1}{\frac{V_a}{d}} \quad (14)$$

onde d é a distância percorrida no *gap* central e p^1 é o momento linear da primeira órbita. O tempo de circulação é fornecido por:

$$t_f^i = 2 \frac{\pi R^1}{v_r^i} - d \quad (15)$$

onde $2\pi R^i$ representa a trajetória dos prótons de cada órbita i nos semicírculos ou “Dês” e v_r^i é a velocidade relativística na região de circulação. A distância d é subtraída, pois o tempo de aceleração e o tempo no *gap* central é calculado separada-

mente.

Na Tabela 1 são apresentadas as condições envolvidas na aceleração e circulação das partículas, adequadas à metodologia proposta.

Tab 1. Condições envolvidas de aceleração e circulação das partículas.

Região de circulação	Campo magnético	3 T
Região de aceleração	Distância entre eletrodos	20 cm
	Diferença de potencial entre eletrodos	200 kV
Característica do Feixe	Energia Inicial	15 MeV
	Energia Final	64 MeV
	Massa do próton	$1,67 \times 10^{-27}$ kg
	Carga do próton	$1,6 \times 10^{-19}$ C

2.3 Definição do modelo do acelerador e sincronismo de evolução das partículas

Considerou-se a região de circulação composta por dois setores magnéticos em forma de “Dês” separados por uma distância constante. A região de aceleração foi definida como uma cavidade em um formato cilíndrico com tubo interno, tipo *drift-tube*, carregado eletricamente e com a carcaça externa aterrada, ocupando a posição comum tangencial ao conjunto de trajetórias circulares das partículas com carga. Logo, todas as partículas (de menor e maior energia) percorrem a mesma distância dentro da região de aceleração posicionada no meio dos dois setores magnéticos em forma de “Dês”. Para que a partícula seja acelerada, a frequência de oscilação do eletrodo interno deve ser igual à frequência de revolução da partícula (ressonância/sincronismo).

Na região de aceleração, as partículas gastam tempos diferentes de percurso, e logo saem em fase/tempo distintos. As partículas de maior energia saem adiantadas e consequentemente chegam adiantadas à fase ideal de aceleração ao retornar à estrutura. O modelo descrito acima, de aceleração/circulação, não produz sincronismo, pois cada vez que a partícula retornar a estrutura de aceleração encontrará um erro de fase acumulativo, devido ao tempo de revolução que varia com a massa relativística e velocidade do próton.

Como solução é necessário compensar essa diferença de tempo e fazer com que as partículas entrem no mesmo momento, ou na fase ideal para cada energia. Essa compensação consiste em “atrasar” a partícula na região de circulação aumentando a distância de percurso, através de intervalos quase lineares acoplados ao movimento circular da partícula. O “atraso” é feito acrescentando regiões com campo magnético fraco de forma a reproduzir um movimento quase linear para a partícula.

Conhecendo os valores do raio relativístico, tempo de passagem do feixe pela região de aceleração e a velocidade da partícula para cada órbita, é possível calcular as distâncias para acréscimos de tempos de atrasos necessários para que os feixes de todas as energias cheguem na mesma fase, ou seja, gastem o mesmo tempo para completar o percurso fora da região de aceleração.

O tempo gasto pela partícula no *gap* central (t_{gap}), entre os “Dês” pode ser encontrado pela relação:

$$t_{gap\ c} = \frac{L}{v^i} \quad (16)$$

onde L é a distância do *gap* central, considerada neste projeto igual a 20 cm e v^i a velocidade do feixe para cada órbita.

A partícula percorre inicialmente a estrutura de aceleração em um tempo t_d^i com uma velocidade v^i . Ao sair dessa região, ela entra na região de circulação onde existe um campo magnético constante e perpendicular à sua trajetória, descrevendo um movimento semicircular igual a πR no primeiro “Dê”. Em seguida, ela passa pelo *gap* central L em uma trajetória linear no tempo dado pela Equação (16). E então, ela entra no segundo “Dê” percorrendo novamente uma trajetória igual a πR até chegar ao ponto de partida (entrada na estrutura de aceleração).

O próximo passo é calcular uma região de atraso, dito *gap* lateral, específico para cada órbita para que todas as partículas gastem o mesmo tempo de percurso.

Conhecendo a velocidade da partícula, o tempo gasto para ela atravessar a região de aceleração e o tempo no *gap* central, o *gap* lateral pode ser encontrado pela relação:

$$t^i = t_d^i + 2 \frac{\pi R}{v^i} + t_{gap\ c}^i \quad (17)$$

onde t_d^i é o tempo na região de aceleração, $\left(\frac{\pi R}{v^i}\right)$ é o tempo em cada um dos “Dês” e $t_{gap\ c}^i$ é o tempo no *gap* central.

Para saber quanto tempo um feixe de partículas é mais adiantado que o outro foram subtraídos os tempos das órbitas de maior energia do tempo da primeira órbita de 15 MeV (t_d^1 , onde $i = 1$).

$$\Delta t = t_d^i - t_d^1 \quad (18)$$

Com os valores da variação de tempo entre as órbitas Δt é possível encontrar a distância adicional de cada órbita para que todas tenham o mesmo tempo de percurso na unidade aceleradora. A Equação (19) fornece a diferença de tempos Δt em termos de distância Δx , tal que:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t \quad (19)$$

Calculando o tempo total que o feixe de partículas gasta para percorrer a distância Δx e substituindo junto aos demais tempos na Equação 17, obtém-se o período de revolução no próton neste equipamento para todas as órbitas.

$$t_x^i = \frac{\Delta x}{v^i} \quad (20)$$

Com esses resultados é possível então definir uma estrutura eletromagnética com sincronismo atendendo a flutuações relativísticas do movimento das partículas.

3. RESULTADOS

3.1 Circulação e Aceleração dos prótons

Os resultados da aplicação de algumas das Equações (1) a (15) são apresentados na Tabela 2. São eles: Energia cinética (E); de cada órbita i ; raio relativístico (R_r) em; momento linear relativístico (p_r); velocidade relativística (v_r); e o tempo de aceleração (t_d).

Tab 2. Resultado dos cálculos analíticos sobre a trajetória dos prótons

i	E (MeV)	Rr (m)	pr (10-19) kg.m/s	vr (107) m/s	td (10-9) s
1	15	0,19	0,90	5,32	3,88
2	20	0,22	1,04	6,12	3,38
3	25	0,24	1,16	6,80	3,03
4	30	0,27	1,28	7,42	2,78
5	35	0,29	1,38	7,98	2,58
6	40	0,31	1,48	8,49	2,43
7	45	0,33	1,57	8,97	2,30
8	50	0,35	1,66	9,42	2,19
9	55	0,36	1,74	9,84	2,09
10	60	0,38	1,82	10,2	2,01
11	64	0,39	1,88	10,5	1,96

Os prótons se movem entre duas estruturas de material ferromagnético em forma de “Dês”, separados por uma distância L , igual a 20 cm (*gap* central), como demonstrado na Figura 2. No espaço entre os “Dês”, o campo magnético é fraco.

3.2 Definição do modelo do acelerador e sincronismo de evolução das partículas

O sincronismo é obtido quando a distância x^i é adicionada na trajetória dos prótons. Este deslocamento representa um comprimento adicional para o feixe de cada órbita que é a tradução do aumento de tempo de circulação do feixe. Essa distância foi introduzida com cortes laterais feitos em cada um dos “Dês” onde o campo magnético é reduzido, como apresentado na Figura 3 (a). Dessa forma o feixe de partículas ao sair da estrutura de aceleração, irá percorrer uma trajetória igual a $2\pi R + L + x^i$.

Os valores de x^i (*gaps* laterais) foram avaliados analiticamente para o feixe das órbitas de 15, 20, 25, ..., 64 MeV. Eles foram acrescidos nos “Dês” aumento o raio dos pólos magnéticos para $R^i + x^i$ (x) e $R^i + x^i$ (y), considerando que a origem do sistema de coordenadas foi definida na linha do centro da estrutura de aceleração (Figura 2).

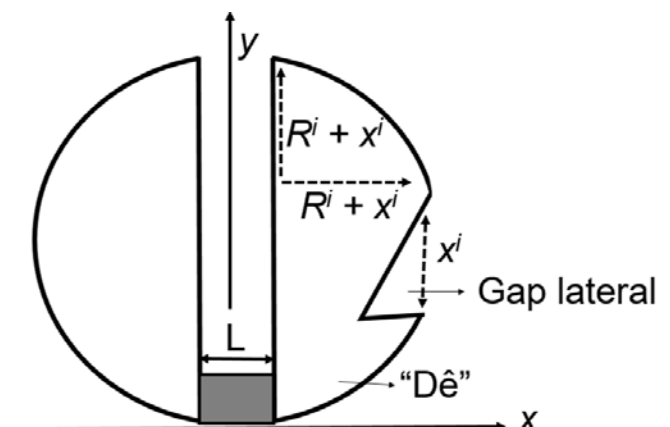


Fig 2. Esquema ilustrativo dos gaps laterais com as relações matemáticas.

Por sua vez, cada “Dê” é composto por duas regiões: uma onde o campo magnético está presente e outra onde ele é reduzido. De acordo com a Fig. 2, essa região foi definida como *gap* lateral. Ambos os *gaps*, central e lateral, têm como objetivo atrasar o feixe ao desviá-lo em uma trajetória mais retilínea como mostra a Figura 3 (b). A variação do campo magnético nas bordas promove a correção do raio da partícula para que a mesma entre na estrutura de aceleração na posição correta.

Logo, é esperado que as partículas percorram trajetórias distintas com o mesmo tempo de circulação. O sincronismo é demonstrado teoricamente com a resolução das Equações (16) a (20) e os resultados são apresentados na Tabela 3. Os valores apresentados são referentes à energia cinética E_c^i da órbita i , tempo da órbita i no *gap* central ($t_{gap\ c}$), tempo de cada órbita i no primeiro e no secundo semicírculo (“Dês”) dado por dt , tempo total de circulação dos prótons em uma órbita (t^i) variação de tempo de cada órbita com relação à primeira (Δt^i) e variação de tempo traduzida em distância x^i a ser adicionada em cada órbita.

Tab 3. Resolução das equações que envolvem a circulação dos prótons

i	E_c (MeV)	$t_{gap\ c}$ (10 ⁻⁹ s)	dt (10 ⁻⁸ s)	t^i (10 ⁻⁸ s)	Δt^i (10 ⁻⁹ s)	x^i (m)
1	15	3,76	2,22	2,98	0,00	0,00
2	20	3,27	2,24	2,90	-0,77	0,02
3	25	2,94	2,25	2,85	-1,30	0,04
4	30	2,70	2,26	2,81	-1,70	0,06
5	35	2,51	2,27	2,78	-1,97	0,08
6	40	2,36	2,29	2,76	-2,15	0,09
7	45	2,23	2,30	2,75	-2,29	0,10
8	50	2,12	2,31	2,74	-2,40	0,11
9	55	2,03	2,32	2,73	-2,46	0,12
10	60	1,95	2,33	2,73	-2,52	0,13
11	64	1,90	2,34	2,73	-2,54	0,13

Ao somar o tempo gasto para atravessar a região x^i nos dois “Dês” ao tempo total, obtém-se a sincronização temporal. O tempo de circulação das partículas nas órbitas de cada energia se igualou a $2,98 \times 10^{-8}$ s. Este valor representa o período de circulação do feixe, ou período deste acelerador. Com este resultado é possível definir a frequência (f) de oscilação ideal do potencial elétrico na estrutura de aceleração, sendo:

$$f = \frac{1}{T} = 33,5 \text{ MHz} \quad (21)$$

onde T é o período de revolução do próton no acelerador, igual a $2,98 \times 10^{-8}$ s.

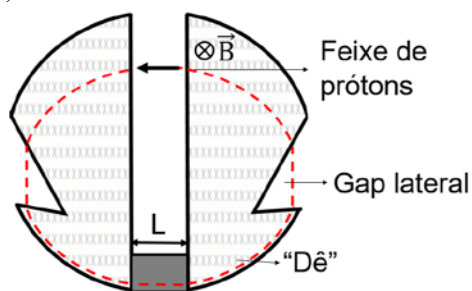


Fig 3. Esquema ilustrativo do gap lateral e circulação ideal do feixe de prótons.

A Figura 4 mostra o pré-projeto do acelerador de prótons e suas principais estruturas: os gaps lateral (1) e central (2) para desvio e atraso do feixe de prótons; (3) as bobinas principais de indução do campo magnético; e os “Dês” (4), onde está presente o campo magnético perpendicular de 3 T.

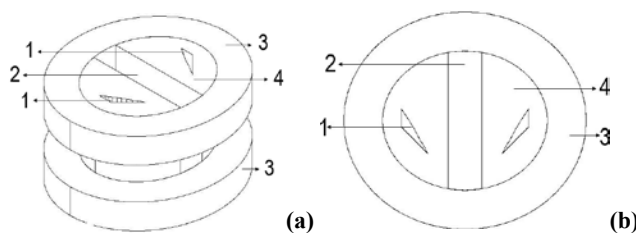


Fig 4. Design e pré-projeto do acelerador circular de prótons proposto e suas principais estruturas

A Figura 5 mostra o projeto inicial da estrutura de aceleração. Sendo: (1) a abertura para entrada e saída do feixe; (2) abertura de passagem do feixe no cilindro interno; (3) cilindro interno tipo *drift-tube*, onde é aplicado o potencial elétrico de 200 kV; e (4) cilindro externo aterrado.

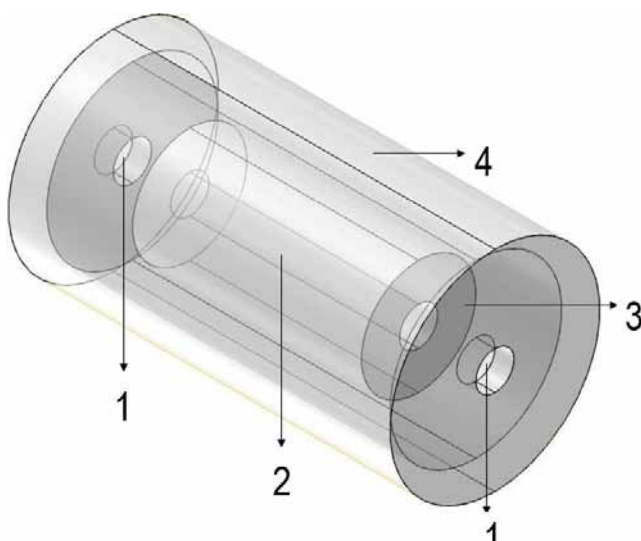


Fig 5. Modelo inicial da estrutura de aceleração

4. CONCLUSÃO

A proposta deste novo método de aceleração demonstra-se ser viável para acelerar feixe de prótons no intervalo de energia de 15 a 64 MeV, onde o sincronismo do movimento das partículas foi ajustado com a frequência de oscilação da cavidade de aceleração. Este equipamento apresenta um modelo estrutural diferenciado do ciclotron. A proposta é ideal para funcionar como um pós-acelerador de ciclotrons existentes e torna-se interessante devido à faixa de energia, que atende às exigências para o tratamento de tumores oculares com prótons. Novos estudos e simulações podem ser feitos para complementar a demonstração da viabilidade da proposta, bem como ajustes de correção do feixe e do campo magnético que são considerados no estudo teórico apresentado neste artigo.

5. AGRADECIMENTOS

CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio institucional e ao grupo NRI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kleeven, W., Abs, M., Delvaux, J.L., Forton, E., Jongen, Y., Me-deiros, R. L., Nactergal, B., Nuttens, V., Servais, T., Vanderlin-den, T., Zaremba, S. Recent development and progress of IBA cyclotrons. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 269(24), p. 2857–62, **2011**.
- [2] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X1100382X>, acessada em março de 2016.
- [3] McMillan, E. The Synchrotron: A Proposed High Energy Particle Accelerator. *Physics Review*. 68 (5-6). p. 143–144, **1945**.
- [4] <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.68.14>, acessada em janeiro de 2016
- [5] Smith, A. R. Proton therapy. *Physics in Medicine and Biology*, v. 51, n. 13, p. R491-R504, **2006**.
- [6] Strijckmans, K. The isochronous cyclotron: principles and recent developments. *Computerized Medical Imaging Graphics*. 25(2), p. 69–78, **2001**.
- [7] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895611100000562>, acessada em novembro de 2015.
- [8] Rose, M. E. Magnetic Field Corrections in the Cyclotron. *Physics Review*. 53(9), p. 715–9, **1938**.
- [9] <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.53.715>, acessada em janeiro de 2016.
- [10] Zhong, J. Z. J., Lv, Y. L. Y., Yin, Z. Y. Z., Zhang, T. Z. T., Xing, J. X. J. The Design of Magnetic Field Measurements System for CYCIAE-100. *IEEE Transactions Applied Superconductivity*. 20(3), p. 2019–2022, **2010**.
- [11] Ji, B., Yin, Z., Zhang, T., Xing, J., Zhao, Z., Lin, J., Zheng, X., Li, P., Liu, G., Wang, Z., Pan, G., Zhang, S. Design and Primary Test of Full Scale Cavity of Cyciae-100. Proceedings of Cyclo-trons, Lanzhou, China, p: 183–185, 2010.
- [12] Jung, I. S., An, D. H., Hong, B. H., Kang, J. S., Hur, M. G., Jang, H. S., Yang, T. G., Lee, M. Y., Hong, S. S., Kim, Y. S., Chai, J. S. Design of the rf system for a 30 MeV cyclotron. Proceedings of EPAC, Edinburgh, Scotland, p. 1340–2.
- [13] Klein, H. U., Baumgarten, C., Geisler, A., Heese, J., Hobl, A., Krischel, D., Schillo, M., Schmidt, S., Timmer, J. New supercon-ducting cyclotron driven scanning proton therapy systems. *Nu-clear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 241(1-4), p: 721–6, **2005**.
- [14] Zhang, T., Chu, C., Zhong, J., Yang, J., Xing, J., Y., L., Wei, S., Chen, R., Li, Z. M. F. Magnet design and construction prepara-tion for CYCIANE-100 at CIAE. *Nuclear Instruments and Me-thods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 261, p. 25–30, **2007**.
- [15] http://ac.els-cdn.com/S0168583X07008798/1-s2.0-S0168583X07008798-main.pdf?_tid=08880aa6-4047-11e5-bcb3-00000aacb360&acdnat=1439311133_baf922a9b6df98ecc92ddec1db-0d0e28, acessada em fevereiro de 2016
- [16] Paganetti, H. Proton Therapy Physics. U.S., CRC Press, p. 704. 2011. <https://books.google.com/books?id=IGPRBQAAQBAJ&pgis=1>, acessada em: novembro de 2015.
- [17] Peruzzo, J. Fundamentos De Energia Nuclear. Clube de Auto-res, p. 100, 2008
- [18] <https://books.google.com/books?id=5YtJBQAAQBAJ&pgis=1>, acessada em novembro de 2015.
- [19] Christóvão, M. T. PROPLAN: Sistema Computacional para o Planejamento da Protonterapia em Tumores Oculares. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2010.
- [20] http://biblioteca.cdtm.br/cdtm/arpel/adobe/tese_marilia_tchristovao.pdf, acessada em julho de 2015