



Correção do campo magnético em um eletroímã de um acelerador de prótons usando o software CST

Correction magnetic field in electromagnet of proton accelerator using CST software

L. A. Rabelo*; T. P. R. Campos

¹Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, 31270-901, Belo Horizonte-Minas Gerais, Brasil

*luisarabelo88@gmail.com

(Recebido em 22 de março de 2016; aceito em 09 de setembro de 2016)

O objetivo deste trabalho é apresentar o estudo e simulações de uniformização do campo magnético nos eletroímãs de um novo modelo de acelerador circular para prótons com intervalo de energia entre 15 MeV e 64 MeV. Bem como, investigar materiais e as alterações induzidas pela presença dos "gaps" de correção do sincronismo. As simulações do eletroímã, predefinido, foram feitas no software de simulações de campos eletromagnéticos CST EM STUDIO® 3D 2015. Os resultados mostraram uma distribuição regular do campo magnético no eletroímã compacto com estruturas de homogeneização do mesmo. Como conclusão, o modelo de eletroímã proposto demonstrou-se viável para um acelerador circular e obedece aos requisitos de sincronização.

Palavras-chave: Eletromagnetismo, aceleradores, simulações

The aim of this paper is to present the study and simulation of uniform magnetic field electromagnets new circular accelerator model for protons with energy range between 15 MeV and 64 MeV. In addition, investigating materials and the changes induced by the presence of "gaps" synchronism correction. The electromagnet simulations, predefined, were made in electromagnetic field simulation software CST EM Studio® 3D 2015. The results showed an even distribution of the magnetic field in the compact electromagnet with the same homogenization structures. The results showed regular distribution of the magnetic field in the compact electromagnet with homogenization structures. In conclusion, the electromagnetic model proposed shown to be feasible for a circular accelerator and comply the synchronization requirements.

Keywords: Electromagnetism, Accelerators, Simulations

1. INTRODUÇÃO

Vários tipos de aceleradores lineares e circulares são atualmente comercializados para diferentes fins, como produção de radioisótopos e terapia. Quando o objetivo é acelerar prótons e partículas pesadas para fins terapêuticos, são comumente usados os aceleradores circulares Síncrotrons e os Isocrônicos Cíclotrons. Com estes equipamentos é possível acelerar feixes de partículas a altas energias em uma estrutura relativamente compacta, se comparado aos aceleradores lineares [1, 2].

A terapia com prótons é interessante devido as suas características físicas de interação com tecido, onde partículas depositam alta dose de radiação no tumor e dose reduzida no tecido saudável próximo. Esta técnica é realidade em alguns países, mas sua implantação torna-se difícil devido ao alto custo dos equipamentos e instalação [3]. Novas possibilidades científicas de desenvolvimento de uma tecnologia nacional são importantes como alternativa para produção de radiofármacos e tratamento de pacientes, além do desenvolvimento científico e tecnológico do país na área aceleradores de partículas.

Nos aceleradores circulares, os prótons circulam no interior do equipamento devido a presença de um campo magnético perpendicular ao movimento dos mesmos e ganham energia cinética cada vez que atravessam um potencial elétrico oscilante, representada por uma cavidade de aceleração. Em geral, este potencial oscila por uma radiofrequência (RF) constante. Uma das maiores dificuldades em projetar um acelerador circular para altas energias é obter, com a RF constante, harmonia entre a oscilação do campo elétrico e o tempo de revolução das partículas no interior do equipamento. A medida que aumenta a energia cinética dos prótons (1,5 % a 2,0 % da energia de massa em repouso) surge alteração relativística da massa e variação na velocidade angular dessas

partículas [4–6]. Em consequência destes efeitos, os prótons passam a ser desacelerados ao atravessar a cavidade de aceleração, pois o tempo de circulação dos prótons perde o sincronismo com o tempo de oscilação do potencial elétrico favorável ao ganho de energia. Outro fator que compromete o sincronismo é a ausência de uniformidade do campo magnético no interior dos eletroímãs que afeta a focalização axial e radial do feixe [7].

Este trabalho é referente a um novo modelo de aceleração de partículas proposto para prótons com intervalo de energia entre 15 MeV e 64 MeV [8]. O objetivo é apresentar o estudo e simulações de ajuste e uniformização do campo magnético nos eletroímãs deste acelerador. Para elaboração do desenho técnico do equipamento e das simulações do campo magnético foi usado o pacote CST EM STUDIO® 3D 2015, para simulações de campos elétricos e magnéticos estáticos, do software CST STUDIO SUITE® 3D 2015.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Sabe-se que na prática o campo magnético não é uniforme em todo o eletroímã de um acelerador. Há vários fatores que interferem na homogeneidade do campo, incluindo o material escolhido. Portanto, a primeira etapa para iniciar as simulações foi definir o material que mais se adéqua a este equipamento de acordo com as possibilidades fornecidas na biblioteca do software CST EM STUDIO® 3D 2015.

A maioria dos aceleradores utiliza o ferro como material principal para o eletroímã. Este material possui propriedades ferromagnéticas que fornecem melhor distribuição das linhas de campo magnético gerado pelas bobinas. Nos materiais ferromagnéticos, os dipolos desemparelhados alinham-se facilmente com o campo magnético aplicado. Altas magnetizações são obtidas, mesmo para campos magnéticos fracos, podendo atingir permeabilidades relativas da ordem dos 10^6 , dependendo do material [9].

O software CST EM STUDIO® 3D 2015 disponibiliza diversas opções de ferro com variações em algumas de suas propriedades. Para este trabalho foi considerado dois tipos: Ferro normal e o Ferro não linear [10].

O Ferro normal é considerado material linear ou isotrópico. Para este tipo o software define principalmente a condutividade elétrica, permissividade e permeabilidade relativa do material. Para o comportamento linear, os parâmetros dos materiais dielétricos e magnéticos determinam a relação entre o campo elétrico e a densidade de fluxo elétrico e o campo magnético e a densidade de fluxo magnético, respectivamente conforme Equação (1):

$$D = \epsilon E \text{ e } B = \mu H \quad (1)$$

onde D é a densidade de fluxo elétrico, ϵ é a constante dielétrica ou permissividade elétrica, E é a intensidade de campo elétrico, B é o campo magnético, μ é a permeabilidade magnética e H é o campo magnetizante [10].

Para o Ferro não linear, ϵ e μ passam a ser dependentes da intensidade do campo e tensores que mudam a direção do campo ao qual são aplicados. Para cálculos magnéticos estáticos, μ pode ser obtido em função de B e H , ou seja, a permeabilidade magnética nesses materiais varia conforme magnetização e intensidade do campo magnético aplicado.

Alterações geométricas na estrutura do eletroímã foram necessárias para obter o sincronismo entre a evolução do feixe de prótons e oscilação do campo elétrico de aceleração. Portanto a segunda etapa do estudo envolve definição de melhorias no projeto técnico e simulações para ajuste do campo magnético de 3T (definido previamente para este modelo de acelerador) a partir de uma otimização do eletroímã, representada pela introdução de *gaps* (regiões livres de material).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ilustração do modelo inicial do eletroímã e das bobinas de indução do campo magnético foi feita no CST EM STUDIO® 3D 2015 e é apresentada na Figura 1.

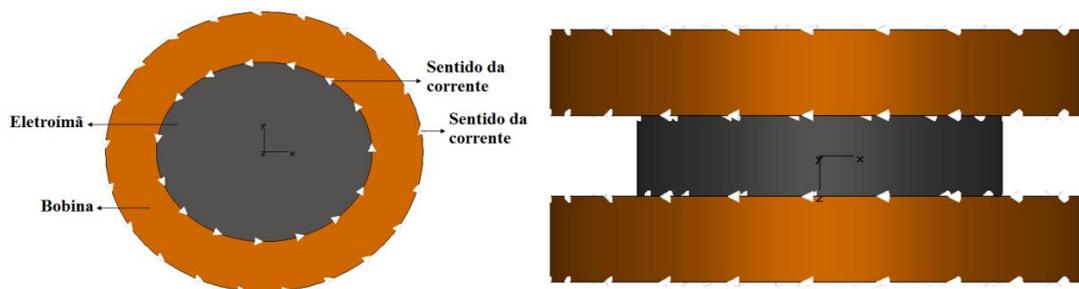
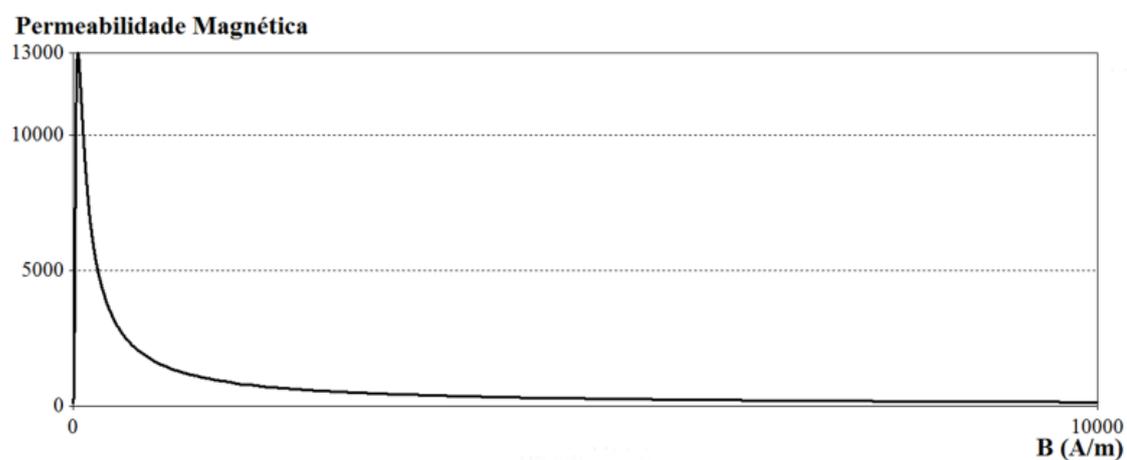


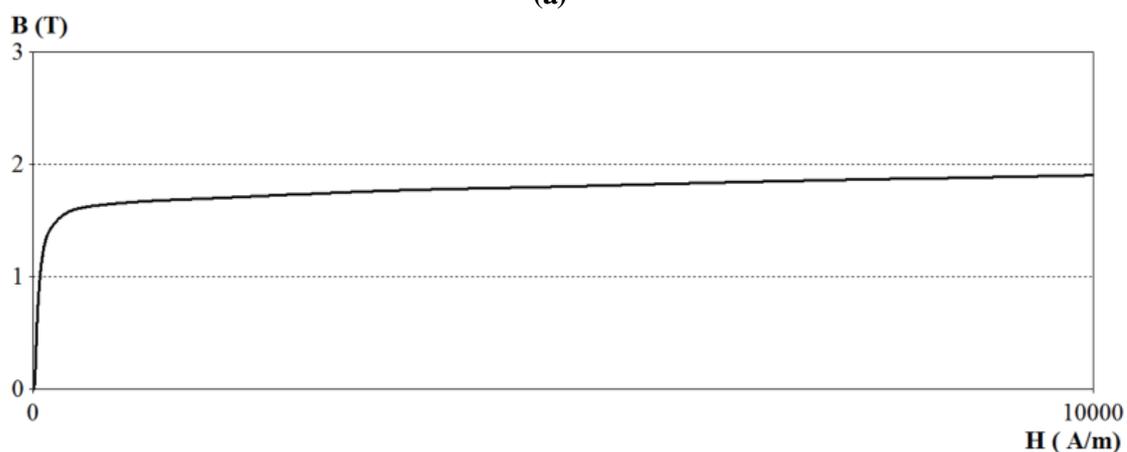
Figura 1. Ilustração do modelo inicial das bobinas principais e eletroímã do acelerador.

3.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

A Figura 2 (a) mostra o gráfico que descreve a curva de magnetização (H) em relação à variação da permeabilidade magnética (μ) e do campo magnético (B) para o Ferro não linear, definido da biblioteca do software CST EM STUDIO® 3D 2015. Para o mesmo material a Figura 2 (b) mostra os valores correspondentes a μ em relação à variação de H e B .



(a)



(b)

Figura 2. Curva de magnetização (a) e variação da permeabilidade magnética (b) para o Ferro não linear

A Figura 3 (a-b) mostra a distribuição de um campo magnético no eletroímã apresentado na Figura 1, para dois tipos de Ferro: normal (Figura 3-a) e não linear (Figura 3-b).

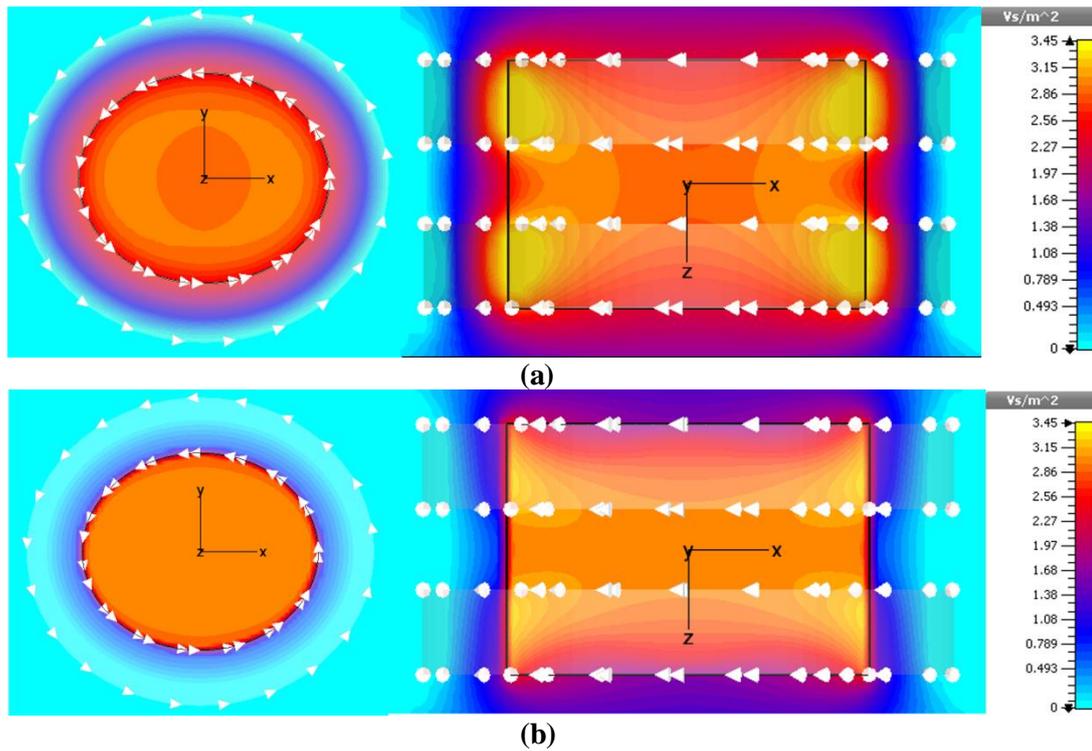


Figura 3. Distribuição do campo magnético do eletroímã para o Ferro normal (a) e não linear (b)

Os gráficos apresentados nas Figuras 4 (a-b) auxiliam na comparação entre os dois tipos de Ferro: normal (Figura 4-a) e não linear (Figura 4-b).

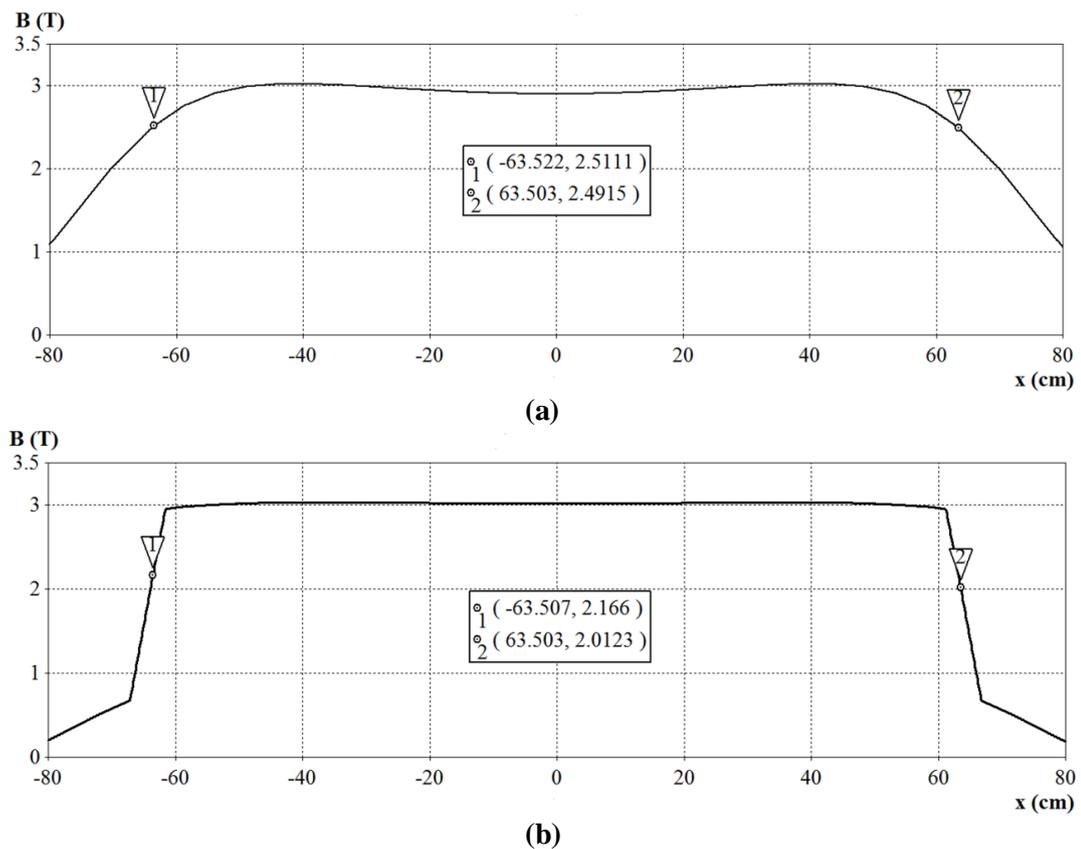


Figura 4. Gráfico de distribuição do campo magnético em função da distância radial do eletroímã para o Ferro normal (a) e não linear (b). Os pontos 1 e 2 representam as extremidades do eletroímã.

A partir dos resultados das simulações apresentadas nas Figuras 3 e 4, o Ferro não linear foi definido como material do eletroímã principal, pois este apresentou uma distribuição mais uniforme do campo magnético. Logo, é esperado que os efeitos de perda de focalização do feixe sejam minimizados. Outra vantagem desta escolha é a queda acentuada do campo magnético da borda do eletroímã (Figura 4b), ou seja, redução dos campos de borda. Para o Ferro normal (Figura 4a), esses campos são significativos e podem distorcer as órbitas e diminuir a estabilidade axial do feixe. Além disso, usando o Ferro não linear é possível aplicar uma corrente de alimentação das bobinas reduzida e obter linhas de campo menos dispersas, conforme mostra a Tabela 1. O número de espiras e corrente foi avaliado empiricamente para se adequar ao campo magnético desejado de 3 T.

Tabela 1. Propriedades das bobinas definidas na simulação

	Bobina Principal (Ferro não linear)	Bobina Principal (Ferro normal)
Corrente (A)	12	24
Número de espiras	90000	90000
Material	Cobre	Cobre

3.2 VARIAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO COM A INTRODUÇÃO DOS GAPS

Os *gaps* são cortes feitos no eletroímã com total remoção do material e dimensões específicas para cada órbita, ou energia, do feixe de prótons. O objetivo de introduzir essas regiões com vácuo é provocar alteração no tempo de circulação e trajetória do feixe através da variação do campo magnético. Além disso, os *gaps* auxiliam na correção radial do feixe. O ideal é que nessas regiões o campo magnético se aproxime de zero e o campo de borda seja o menor possível. Para que, ao atravessá-las, o feixe de prótons seja desviado tangencialmente em uma trajetória retilínea e perpendicular a borda do eletroímã.

A distribuição do campo magnético no eletroímã, após a introdução dos *gaps*, é mostrada na Figura 5 e no gráfico apresentado na Figura 6.

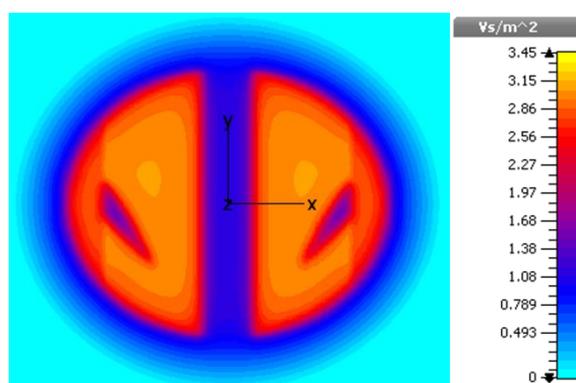


Figura 5. Distribuição do campo magnético no eletroímã após introdução dos *gaps*

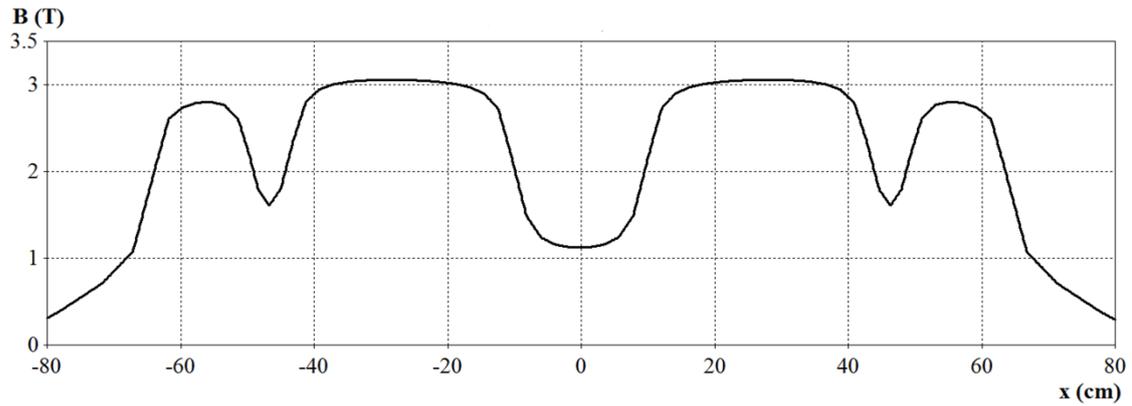


Figura 6. Gráfico de distribuição do campo magnético em função da distância radial do eletroímã após a introdução dos gaps

As Figuras 5 e 6 mostram um considerável campo de borda nas extremidades do eletroímã e intenso campo magnético no *gap* central (que divide o eletroímã em duas partes). Essa distribuição do campo prejudica o sincronismo do equipamento. Logo, é necessário uma otimização da geometria dos eletroímãs para reduzir os efeitos dos campos de borda e reduzir a intensidade do campo magnético no *gap* central do eletroímã.

3.3 INTRODUÇÃO DE CALÇOS HOMOGENEIZADORES

A primeira correção introduzida é o desnivelamento dos polos de circulação do feixe de prótons (Figura 7). Esta alteração é feita para aumentar o campo magnético nas bordas da extremidade central do eletroímã e reduzir os efeitos dos campos de borda.

Em seguida são introduzidos calços homogeneizadores do campo na extremidade da borda central do eletroímã e nas bordas externas do mesmo, conforme mostra a Figura 8. Os calços são placas do mesmo material do eletroímã, dispostas em regiões que se pretende aumentar a intensidade do campo magnético.

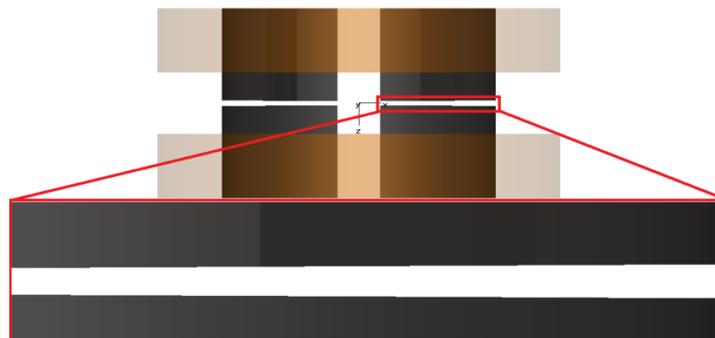


Figura 7. A área destacada representa o polo de circulação dos prótons com pequena variação radial na altura

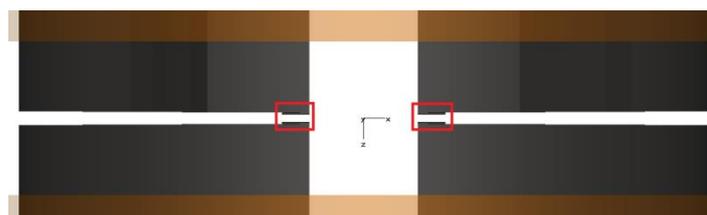


Figura 8. Calços homogeneizadores do campo magnético

As Figuras 9 e 10 mostram a distribuição do campo magnético após a introdução dos calços e o gráfico correspondente.

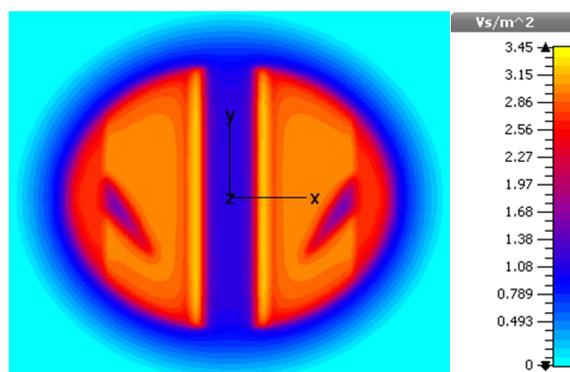


Figura 9. Distribuição do campo magnético no eletroímã após introdução dos calços

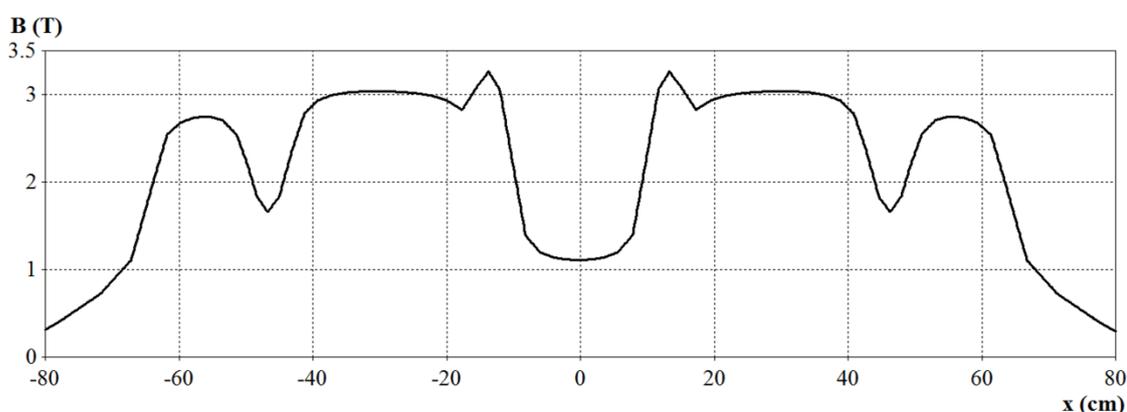


Figura 10. Gráfico de distribuição do campo magnético em função da distância radial do eletroímã após introdução dos calços homogeneizadores

Nota-se que ainda há uma falta de uniformização do campo. Esta uniformização torna-se difícil de obter devido à introdução dos *gaps*, pois as linhas de campo magnético que se distribuem nessas regiões são desviadas e concentram-se nas regiões onde o Ferro do eletroímã está presente. No entanto, na região de circulação (que vai até o fim da borda dos *gaps* laterais) o campo magnético varia aproximadamente entre 2,8 T até 3,1 T. Observa-se que nos calços o campo é mais intenso podendo atingir até aproximadamente 3,4 T. Essas regiões onde o campo é mais intenso são importantes para compensar a perda de focalização do feixe devido à diminuição do campo magnético nas bordas do eletroímã. Logo, apesar de o campo magnético não apresentar uma uniformização de toda a região o eletroímã, que é extremamente difícil nesta configuração, foi possível obter uma variação pequena do campo e pontos de campo intenso nas bordas centrais que vão compensar os erros ocasionados nas regiões de campo mais fraco.

Estes ajustes favorecem a distribuição do campo ao longo do eletroímã, no entanto o campo magnético presente no centro dos *gaps* ainda é significativo e compromete a circulação e focalização do feixe de prótons. Como solução, nessas regiões foi introduzido um material considerado bom (não perfeito) condutor elétrico, ou *Lossy Metal* como denominado no CST EM STUDIO® 3D 2015 (Figura 11). O objetivo de introduzir o *Lossy Metal* é desviar as linhas de campo dos *gaps*. Este tipo de material simula os sólidos associados com o uso de um modelo de impedância de superfície unidimensional. Campos elétricos irão penetrar uma camada muito pequena deste tipo de material, cuja espessura (normalmente denominada "profundidade da pele") pode ser definida pela Equação (2):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu\sigma}} \quad (2)$$

onde δ é a profundidade de penetração, ω é a frequência de pulsação do campo indutor externo, μ_0 e μ é a permeabilidade magnética do vácuo e relativa do material e σ é a condutividade elétrica do material. Nessa circunstância $\sigma \gg \varepsilon_0\varepsilon$, sendo ε a permissividade elétrica do material [10].

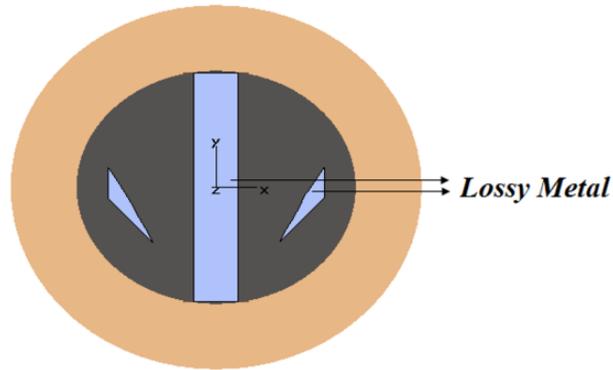


Figura 11. Ilustração do eletroímã com introdução do Lossy Metal nos gaps central e lateral

Na prática pode-se definir qualquer material deste tipo, e novas simulações e testes específicos podem ser feitos para ajustar o campo a uma situação real.

O resultado da introdução do *Lossy Metal* nos *gaps* mostra regiões em que a intensidade do campo magnético é nula, conforme mostra a Figura 12 e o gráfico da Figura 13.

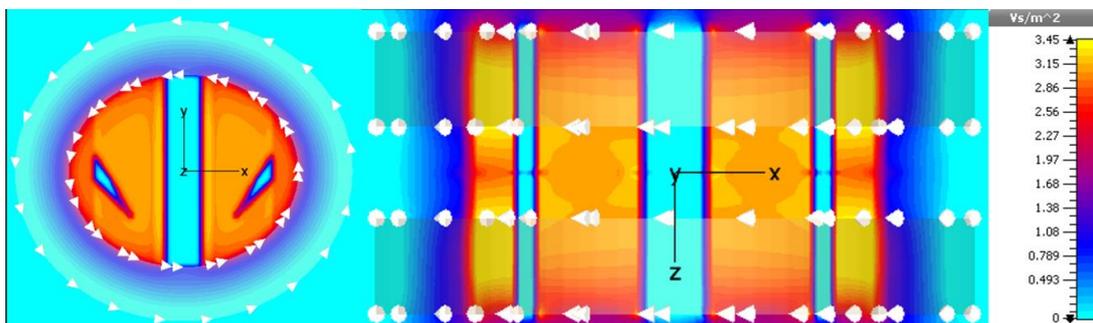


Figura 12. Distribuição do campo magnético no eletroímã após introdução do Lossy Metal nos gaps central e lateral

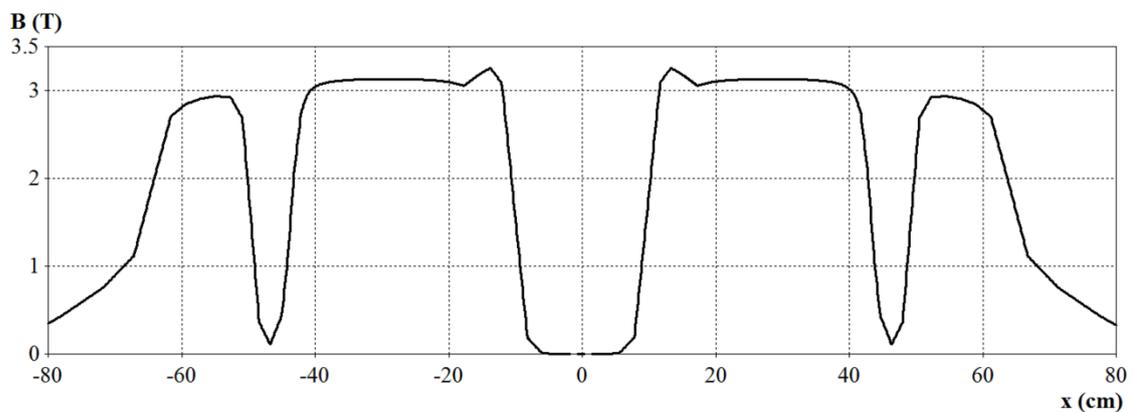


Figura 13. Gráfico de distribuição do campo magnético em função da distância radial do eletroímã após introdução do Lossy Metal nos gaps central e lateral

4. CONCLUSÃO

A distribuição do campo magnético no eletroímã proposto neste modelo de acelerador demonstrou-se viável para aceleração de prótons. Os ajustes do campo magnético foram possíveis e o modelo atende as exigências para sincronismo do feixe de partículas. De forma simplificada foi possível reduzir, consideravelmente, a intensidade do campo nas regiões de correção do feixe (*gaps*). O processo de simulação do campo magnético foi ajustado e pode ser futuramente inserido em novas simulações envolvendo a trajetória de feixes de prótons e modelagem da cavidade de aceleração.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Paganetti H. Proton Therapy Physics. United States: CRC Press, 2011. 668 p.
2. Peruzzo J. Fundamentos De Energia Nuclear. 1 ed. Irani (Santa Catarina): Clube de Autores, 2008. 100 p.
3. Jermann PSM. Particle Therapy Patient Statistics (per end of 2014). PTCOG, 2014. In: <<http://www.ptcog.ch/index.php/ptcog-patient-statistics>>
4. McMillan E. The Synchrotron: A Proposed High Energy Particle Accelerator. *Phys. Rev.* 1945, vol. 68, no. 5–6, pp. 143–144, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.69.126.2>.
5. Strijkmans K. The isochronous cyclotron: principles and recent developments, *Comput. Med. Imaging Graph.* 2001, vol. 25, no. 2, pp. 69–78, [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-6111\(00\)00056-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-6111(00)00056-2).
6. Kleeven W, Abs M., Delvaux JL, Forton E, Jongen Y, Romao LM, Nactergal B, Nuttens V, Servais T, Vanderlinden T, Zaremba S. Recent development and progress of IBA cyclotrons, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 2011, vol. 269, no. 24, pp. 2857–2862, [10.1016/j.nimb.2011.04.031](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.04.031).
7. Rose ME. Magnetic Field Corrections in the Cyclotron. *Phys. Rev.* vol. 1938, 53, no. 9, pp. 715–719, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.53.715>.
8. Rabelo LA, Campos TPR. Recircular accelerator to proton ocular therapy. Proceedings of the International Nuclear Atomic Conference, 2013 Nov 24-29; Recife, PE. ABEN; 10 p.
9. Carlos L, Bastos A. Materiais Magnéticos e suas Aplicações. Universidade do Porto, 2009.
10. CST©. 2015. Rights Reserved. CST (Computer Simulation Technology). 2015.