



**UFMG**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

**GUSTAVO LOBATO CAMPOS**

**ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE  
PARÂMETROS DE ACELERADOR CIRCULAR DE  
PRÓTONS COM CAVIDADE CILÍNDRICA RESSONANTE**

Belo Horizonte

2017

GUSTAVO LOBATO CAMPOS

**ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE  
PARÂMETROS DE ACELERADOR CIRCULAR DE  
PRÓTONS COM CAVIDADE CILÍNDRICA RESSONANTE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências e Técnicas Nucleares.

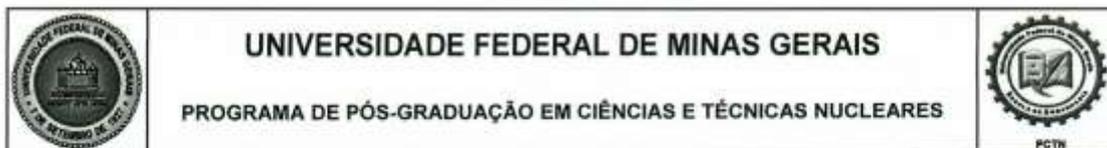
Área de concentração: Ciências das Radiações/Engenharia Nuclear e da Energia.

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Passos Ribeiro de Campos

Belo Horizonte

2017

C198a	<p>Campos, Gustavo Lobato. Algoritmo genético para otimização de parâmetros de acelerador circular de prótons com cavidade cilíndrica ressonante [manuscrito] / Gustavo Lobato Campos. – 2017. 90 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Tarcisio Passos Ribeiro de Campos.</p> <p>Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui anexos.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Algoritmos genéticos - Teses. 3. Aceleradores de partículas - Teses. I. Campos, Tarcisio Passos Ribeiro de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.039(043)</p>
-------	---



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES**

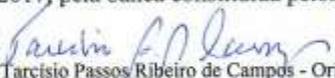
## FOLHA DE APROVAÇÃO

**ALGORITMO GENÉTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE ACELERADOR CIRCULAR DE PRÓTONS COM CAVIDADE CILÍNDRICA RESSONANTE**

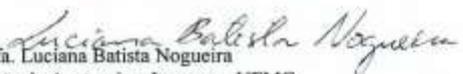
**GUSTAVO LOBATO CAMPOS**

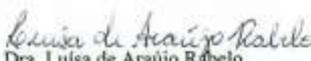
Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES.

Aprovada em 05 de julho de 2017, pela banca constituída pelos membros:

  
 Prof. Tarcísio Passos Ribeiro de Campos - Orientador  
 Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

  
 Prof. Wagner Leite Araújo  
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia

  
 Profa. Luciana Batista Nogueira  
 Departamento de Anatomia e Imagem - UFMG

  
 Dra. Lúcia de Araújo Rabelo  
 UFMG

  
 Prof. Carlos Bernardes Rosa Junior  
 IFMG

Belo Horizonte, 5 de julho de 2017.

Dedico esse trabalho primeiramente a minha família, meus pais e minha irmã em especial, pela presença constante nos momentos de maior dificuldade. Aproveito para me desculpar pela falta de paciência em vários momentos dessa caminhada. Dedico também a meus amigos de Formiga, a todos, pois cada um de vocês faz a caminhada ser muito mais leve. Por fim agradeço de forma especial ao Prof. Tarcísio, pela ajuda, incentivo e orientação.

## RESUMO

Os aceleradores de partículas circulares são equipamentos com grande aplicação em áreas da medicina, seja para a produção de radioisótopos ou fins terapêuticos. Contudo observa-se ao longo dos últimos anos cada vez mais especificidades dos projetos desses equipamentos em função de sua aplicação, com o intuito de redução de dimensões e custos, mas com aumento de desempenho. Entretanto tais equipamentos seguem requisitos já presentes em projetos anteriores, tornando-os não otimizados para a prática proposta. Assim o presente trabalho aborda a computação evolutiva, especificamente algoritmos genéticos (AG), como função geradora de parâmetros otimizados para projeto de aceleradores de partículas circulares (AC). Foi empregado o modelo de AC com cavidade cilíndrica ressonante, como estrutura de aceleração. Um modelamento analítico físico-matemático foi proposto e implementado computacionalmente, dito código ACEL. O código ACEL gerou dados para o AG, ambos implementados no *software* Matlab®, com uma função *fitness* minimizada. Foram impostas restrições à função *fitness* para garantia de todas as condições mandatórias ao problema, obtendo então somente soluções em domínio válido para o mesmo. Os resultados mostram a viabilidade do emprego de uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração, assim como do modelo completo do acelerador de partículas circular proposto neste trabalho. Além disso, destaca-se o AG desenvolvido e os parâmetros propostos otimizados para projetos específicos de ACs. Foram apresentados parâmetros físicos básicos otimizados dos seguintes aceleradores: AC produtor de radioisótopos emissor de pósitron, assim como radioisótopos que sofrem decaimento por captura eletrônica (ACPR - 35); AC dedicado a produção de radioisótopo carbono-11 (ACC - 11); assim como ACs para terapia por feixe de prótons, em energias de 65 MeV e 250 MeV (ACPT - 65 e ACPT - 250).

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Cavidade Cilíndrica Ressonante; Algoritmo Genético.

## ABSTRACT

Circular particle accelerators are devices with wide application in medical areas, like in the radioisotopes production or for therapeutic purposes. However, over the last few years, more and more specifics of the projects of these equipments have been observed due to their application, with the purpose of reducing dimensions and costs, but increasing their performance. Although, such equipment follows requirements already present in previous projects, making them not optimized for the proposed practice. Thus the present work deals with evolutionary computation, specifically genetic algorithms (GA), as a generator of parameters optimized for the design of a circular particle accelerator (AC). The AC model with resonant cylindrical cavity was used as the acceleration structure. A physical-mathematical analytical modeling was proposed and implemented computationally, known as the ACEL code. The ACEL code generated data for the GA, both implemented in Matlab® software, with a minimized fitness function. Restrictions were imposed on the fitness function to guarantee all conditions to the problem, obtaining only valid domain solutions. The results show the feasibility of using a resonant cylindrical cavity as an acceleration structure, as well as the complete model of the circular particle accelerator proposed in this work. In addition, the developed AG and the proposed parameters optimized for specific AC projects are highlighted. Basic optimized physical parameters of the following accelerators were presented: AC generator of positron emitting radioisotopes, as well as radioisotopes that suffer decay by electronic capture (ACPR - 35); AC dedicated to the production of carbon-11 radioisotope (ACC - 11); As well as ACs for proton beam therapy at energies of 65 MeV and 250 MeV (ACPT - 65 and ACPT - 250).

**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Resonant Cylindrical Cavity; Genetic Algorithm.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Representação da ideia do projeto desenvolvido. ....	17
Figura 2.1: Representação do Ciclotron.....	20
Figura 2.2: Representação do modelo do acelerador de partículas circular desenvolvido pelo NRI DEN, UFMG. ....	21
Figura 2.3: Representação da cavidade cilíndrica ressonante com a composição de campos elétricos e magnéticos em seu interior, como resultado do modo de propagação $TM_{010}$ . ....	22
Figura 2.4: Fluxograma do algoritmo ACEL.....	26
Figura 3.1: Vista angular da representação do modelo do AC-CR.....	35
Figura 3.2: Resumo da metaheurística desenvolvida nesta pesquisa.....	35
Figura 3.3: Fluxograma para desenvolvimento de um algoritmo genético. ....	36
Figura 3.4: Parte do código responsável por gerar a população inicial. ....	37
Figura 3.5: Parte do código associado com o cálculo do aptidão de cada indivíduo.....	39
Figura 3.6: Parte do código responsável seleção dos indivíduos.....	41
Figura 3.7: Parte do código responsável pelo operador mutação. ....	42
Figura 3.8: Parte do código responsável pelo operador cruzamento. ....	43
Figura 3.9: Evolução da fitness ao logo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. ....	46
Figura 3.10: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPR - 35. ....	47
Figura 4.1: Representação da deposição de energia de feixe de fótons e de prótons. ....	51
Figura 4.2: Representação do desenvolvimento dos algoritmos genéticos.....	54
Figura 4.3: Pseudocódigo de um algoritmo genético.....	54
Figura 4.4: Evolução da fitness ao logo das 100 gerações para todas as rodadas. ....	59
Figura 4.5: Evolução da fitness ao logo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. ....	59
Figura 4.6: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPT - 65.....	61
Figura 4.7: Evolução da fitness ao logo das 100 gerações para todas as rodadas. ....	63
Figura 4.8: Evolução da fitness ao logo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. ....	63

Figura 4.9: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPT - 250.....	65
Figura 5.1: Função de excitação para a reação $14N(p,\alpha)11C$ .....	71
Figura 5.2: Evolução da fitness ao longo das 100 gerações para todas as rodadas. ....	75
Figura 5.3: Evolução da fitness ao longo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. ....	75
Figura 5.4: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda por raio da partícula no ACC - 11.....	77
Figura 5.5: Vista angular representativa do modelo do equipamento. ....	77
Figura 6.1: Representação do campo elétrico no interior de uma cavidade cilíndrica ressonante, quando em ressonância e com a presença do modo de propagação $TM_{010}$ . ....	81
Figura 6.2: Resultado de método gráfico para determinação do $T_{acel}$ . ....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Representação dos domínios energéticos para emprego de aceleradores de partículas circular.....	15
Tabela 2.1: Constantes aplicadas para validar algoritmo desenvolvido em Matlab®.....	27
Tabela 2.2: Valores presentes na literatura de referência RABELO (2016), e erro % para valores obtidos por meio do algoritmo ACEL.. .....	28
Tabela 2.3: Resultados analíticos comparativos entre referência empregada, RABELO (2016), e algoritmo Matlab® para variáveis associados ao tempo da partícula por volta no equipamento. ....	29
Tabela 3.1: Radioisótopos de comum produção em Cíclotrons. ....	33
Tabela 3.2: Variáveis da função de geração da população inicial. ....	37
Tabela 3.3: Formato da população inicial gerada pelo AG desenvolvido. ....	38
Tabela 3.4: População inicial com valor da função objetivo calculado pelo AG desenvolvido. ....	40
Tabela 3.5: Valores recomendados para parâmetros de configuração de um AG. ....	43
Tabela 3.6: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. ....	45
Tabela 4.1: Energias avaliadas nesse trabalho, para terapia ocular e do tórax. ....	53
Tabela 5.1: Variáveis da função de geração da população. ....	73
Tabela 5.2: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. ....	74
Tabela 5.3: Melhor resposta para os parâmetros do ACC - 11 de acordo com o AG.....	76
Tabela 5.4: Características do ACC - 11. ....	76
Tabela 6.1: Comparação entre consideração original e alternativa para comportamento do campo elétrico no interior da cavidade ressonante.....	85

## SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
CAPÍTULO 1.....	13
APRESENTAÇÃO DO TEMA.....	13
1.1. INTRODUÇÃO.....	13
1.2. RELEVÂNCIA.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
1.3.1. Objetivo Geral.....	16
1.3.2. Objetivo Específico.....	17
1.4. ESTRUTURA DO TEXTO.....	18
CAPÍTULO 2.....	19
PROGRAMA COMPUTACIONAL <i>ACEL</i> PARA MODELAMENTO DE ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR COM CAVIDADE CILÍNDRICA RESSONANTE.....	19
2.1. INTRODUÇÃO.....	19
2.2. MODELAMENTO MATEMÁTICO E ALGORITMO COMPUTACIONAL.....	20
2.2.1. Descrição do AC-CR.....	20
2.2.2. Equacionamento Matemático do AC-CR.....	23
2.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO.....	27
2.4. CONCLUSÃO.....	30
2.5. REFERÊNCIAS.....	30
CAPÍTULO 3.....	32
ALGORITMO GENÉTICO PARA MODELAMENTO OTIMIZADO DE UM ACELERADOR CIRCULAR DE 35 MeV PARA PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS...32	
3.1. INTRODUÇÃO.....	33
3.2. DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> AG-ACPR.....	34
3.2.1. Modelo do Acelerador de Partículas para Produção de Radioisótopos (ACPR - 35)...34	
3.2.2. Desenvolvimento do Algoritmo Genético (AG).....	35
3.2.3. Geração da População Inicial.....	36
3.2.4. Avaliação dos Indivíduos da População.....	38
3.2.5. Método de Seleção da População.....	41

3.2.6. Operadores Genéticos .....	42
3.2.7. Parâmetros de Configuração do AG .....	43
3.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ACPR - 35 .....	44
3.4. CONCLUSÃO .....	47
3.5. REFERÊNCIAS.....	48
CAPÍTULO 4.....	50
PARÂMETROS FÍSICOS DE UM ACELERADOR CIRCULAR PARA TERAPIA DE PRÓTONS OBTIDOS POR ALGORITMO GENÉTICO .....	50
4.1. INTRODUÇÃO .....	50
4.1.1. Considerações sobre a Terapia de Prótons.....	50
4.1.2. Considerações sobre os Aceleradores Circulares .....	52
4.2. DESENSOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i> AG - ACPT .....	53
4.2.1. Terapia .....	53
4.2.2. Algoritmo Genético (AG).....	53
4.2.2.1. População.....	54
4.2.2.2. Função Objetivo ou <i>fitness</i> .....	55
4.2.2.3. Seleção da População .....	55
4.2.2.4. Operadores Genéticos.....	56
4.2.2.5. Parâmetros de Configuração do AG .....	57
4.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACPT .....	57
4.3.1. Terapia Ocular .....	57
4.3.2. Terapia de Tórax .....	61
4.4. CONCLUSÃO .....	65
4.5. REFERÊNCIAS.....	66
CAPÍTULO 5.....	69
ACELERADOR CIRCULAR DE PRÓTONS OTIMIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO PARA PRODUÇÃO DE C-11.....	69
5.1. INTRODUÇÃO .....	69
5.2. DESENSOLVIMENTO.....	70
5.2.1. Reação para Produção do C-11.....	70
5.2.2. Metaheurística AG.....	71
5.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACC - 11.....	72
5.3.1. Dados de Entrada e Configuração da Metaheurística .....	72
5.3.2. Parâmetros ACC - 11 .....	73

5.4. CONCLUSÃO .....	78
5.5. REFERÊNCIAS.....	78
CAPÍTULO 6.....	80
CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMPO DA PARTÍCULA NA CAVIDADE RESSONANTE DE UM ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR.....	80
6.1. INTRODUÇÃO .....	80
6.2. COMPORTAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO.....	81
6.2.1. Campo Elétrico Constante no Tempo .....	81
6.2.2. Campo Elétrico Variante no Tempo .....	82
6.3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	84
6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	84
6.5. CONCLUSÃO .....	86
6.6. REFERÊNCIAS.....	87
CAPÍTULO 7.....	88
CONCLUSÃO GERAL.....	88
ANEXOS .....	90
Anexo A - Artigos.....	90

## CAPÍTULO 1

### APRESENTAÇÃO DO TEMA

#### 1.1. INTRODUÇÃO

O ciclotron é um acelerador de partículas desenvolvido nos anos trinta. Sua característica principal é prover gradientes de energia à partícula a ser acelerada enquanto tal partícula percorre um caminho circular em sua estrutura (ERNEST LAWRENCE, 2017). Seu conceito fundamental se encontra bastante difundido em aplicações na medicina nuclear (IAEA, 2008), como na produção de radioisótopos, onde foi um dos grandes responsáveis pela descoberta de novos radionuclídeos; na radioterapia, como exemplo, para terapias por feixe de prótons e de carbono; e mais recentemente em processos de queima de resíduos oriundo de fissão nuclear, na área de combustíveis nucleares.

O acelerador circular, concebido por Lawrence e Livingston, mantém até o presente sua característica fundamental, de aplicação da equação de força de Lorentz para possibilitar a aceleração de uma partícula carregada (KAPLAN, 1978). Para tal o equipamento pode ser subdividido em dois sistemas principais: de aceleração responsável pela entrega de energia potencial à partícula a ser acelerada; e de circulação, responsável por manter a partícula com carga em uma órbita circular.

O tipo de partícula a ser acelerada tem grande influência na estrutura do equipamento, uma vez que a massa “relativística” do elétron, do próton, ou de um íon pesado, sofre alteração quando em velocidades, ditas “relativísticas”. Essa diferença de massa “relativística” da partícula avaliada em velocidade “relativística” e “clássica” determina características construtivas distintas para o acelerador circular, sendo dependente do tipo de partícula a ser acelerada (CAMPOS e CAMPOS, 2017). Um dos motivos é que a diferença de massa impacta na velocidade da partícula e em seu raio de convolução, características que afetam o sincronismo, isto é a constante de tempo que se deve manter no processo de aceleração em um ciclotron. Destaca-se então a maior complexidade em acelerar prótons e íons pesados, em altas energias, pelo maior impacto de suas massas, quando em velocidades próximas à da luz. Mas

vale ressaltar que determinadas reações nucleares tem por precursores justamente partículas de maior massa.

Outro fator relevante no projeto de um ciclotron está na energia final necessária a ser entregue à partícula a ser acelerada. Usualmente tal energia está relacionada ao limiar da reação nuclear que a mesma irá provocar, ao considerar a probabilidade de ocorrência desta. A energia de limiar, associada a uma determinada aplicação, assim como a manutenção do sincronismo, destaca-se como fatores fundamentais no projeto de um acelerador circular. Observa-se que quanto maior a energia final da partícula, mais complexo será o desenvolvimento do equipamento.

Mesmo sendo possível prover a aceleração desejada a uma partícula carregada, independentemente do impacto de sua massa (dita “relativística”), e sempre garantindo o sincronismo do processo, outro ponto a ser avaliado é quão grande o equipamento precisará ser para tal atribuição. O motivo é que quanto maior a energia necessária a ser entregue a uma partícula carregada, principalmente sendo essa um próton ou um íon pesado, maior será o número de voltas desta partícula no acelerador, o que influencia diretamente nas dimensões do equipamento.

Assim, como são notórias as questões anteriormente citadas, também é crescente a busca de um acelerador circular que viabilize a aceleração de partículas carregadas pesadas em altas energias, mas cuja solução não resulte em um equipamento de grandes dimensões. Os problemas acima podem ser estudados de forma separada, ou isolada, uma vez que é viável, por exemplo, prover a aceleração das partículas carregadas pesadas, a energias não tão impactantes para a dimensão do equipamento. Para reduzir o impacto do tamanho do equipamento, bobinas supercondutoras podem ser introduzidas, entretanto afetará a complexidade de operação do mesmo.

Observa-se que tal problema pode ser tratado como um problema de otimização computacional, onde são aplicadas técnicas para determinar os extremos, sejam eles máximos ou mínimos, em regiões determinadas (CUNHA, 2012).

Dentro deste contexto apresenta-se neste trabalho, como foco principal, o desenvolvimento de uma rotina computacional baseada em computação evolutiva, mais especificamente uma metaheurística onde se aplica algoritmos genéticos, para proposição de um conjunto ótimo, talvez o melhor, de parâmetros iniciais para desenvolvimento de um

acelerador de partículas circular com cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração, que trabalhe com nível energético final que o habilite para a produção de radioisótopos, ou mesmo para fins de terapia.

## 1.2.RELEVÂNCIA

Como mencionado os aceleradores de partículas circulares são aplicados nos mais diversos domínios, sendo estes dependentes da energia final do seu feixe de partículas. Em especial destacam-se duas áreas específicas, sendo a produção de radioisótopos e a radioterapia. Os valores energéticos apresentados a seguir são referentes a próton como partícula acelerada.

Considera-se para produção dos radioisótopos Fluor-18 e Carbono-11, a energia de extração da ordem de 15 MeV, e para os radioisótopos Iodo-123 e Tálcio-201 feixes de aproximadamente 30 MeV. Para fins de terapia, onde pode-se destacar uma energia final da partícula a partir de 65 MeV para terapia ocular e na ordem de 250 MeV para terapia de tórax. Na Tabela 1.1 são resumidos os domínios funcionais e níveis energéticos associados.

**Tabela 1.1: Representação dos domínios energéticos para emprego de aceleradores de partículas circular.**

**Fonte: Acervo do autor.**

<b>Aplicação</b>	<b>Energia (MeV)</b>
Produção de Radioisótopos	15 a 35
Terapia	65 a 250

Observa-se que no processo de desenvolvimento de aceleradores de partículas circulares, diversas das variáveis de entrada seguem padrões e valores pré-estabelecidos em modelos ou versões anteriores de equipamentos similares. Contudo, seria possível fazer com que tais variáveis fossem dependentes de determinadas condições, ou características esperadas para o equipamento em questão, ou seja, individualizadas. Neste contexto observa-se potencial área para aplicação de computação evolutiva no desenvolvimento de algoritmo computacional capaz de entregar, ou apresentar como resultado um melhor conjunto de parâmetros para o desenvolvimento de um acelerador de partículas circular.

Um dos pontos que ratifica a relevância do trabalho proposto nessa área está em pesquisa bibliométrica realizada com mais de 30 composições de buscas associadas à:

“acelerador de partícula”, “acelerador de partícula circular”, “cíclotron”, “nuclear”, “otimização computacional”, “computação evolutiva”, “heurísticas”, “metaheurísticas”, “algoritmos” e “algoritmos genéticos”, tanto em português quanto em inglês. Ao trabalhar com os resultados destas buscas, reportados como os mais relevantes, não se identificou nada similar ao proposto nessa pesquisa, no que se refere à proposição de parâmetros para um acelerador de partículas circular por meio de técnica de computação evolutiva. Contudo destacam-se pesquisas recentes que indicam uso de algoritmos genéticos e outras técnicas de computação evolutiva na área de aceleradores de partículas, como nas referências MURKHERJEE (2000) e TIAN, SAFRANEK e YAN (2014), dentre outros, que citam inclusive resultados “encorajadores”, “robustos”, e “eficientes”.

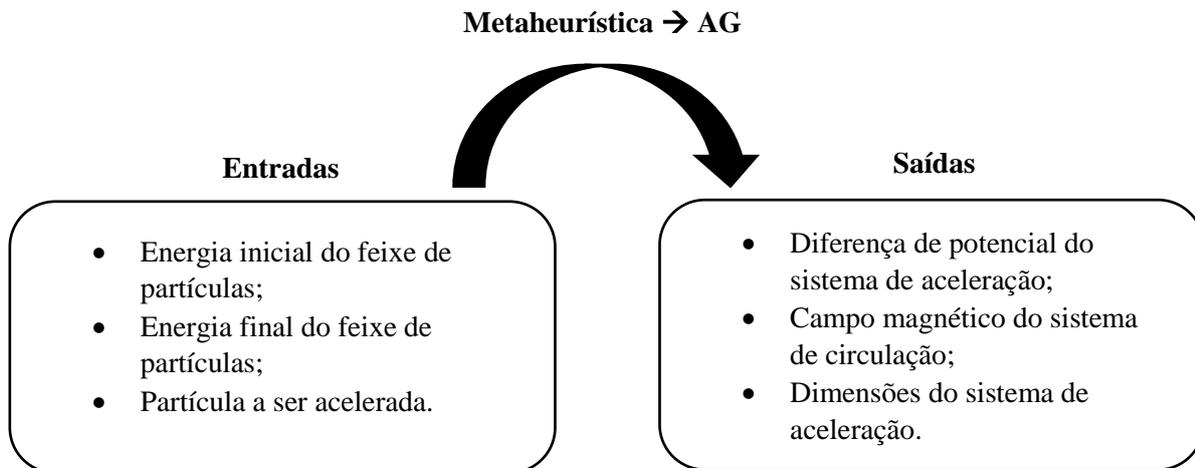
Assim, observa-se potencial no desenvolvimento de metaheurística com a aplicação de algoritmos genéticos para determinar parâmetros de um acelerador de partículas circular, independentemente da sua área de aplicação, para assim viabilizar fases iniciais de modelamento e projeto do equipamento em questão. Associa-se ainda o emprego de uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração do equipamento.

### 1.3.OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Para desenvolvimento de um acelerador de partículas circular alguns parâmetros são de grande importância, sendo básicos e fundamentais: a energia inicial, a energia final do feixe de partículas, assim como o tipo de partícula a ser acelerada. Tem-se também a presença de variáveis que podem assumir diferentes valores, e que irão impactar diretamente no desenvolvimento do equipamento. Para este trabalho foi considerado um total de quatro variáveis, a saber: diferença de potencial aplicável à estrutura de aceleração; campo magnético aplicado à estrutura de circulação; geometria da estrutura de aceleração, mais especificamente comprimento e raio da cavidade cilíndrica ressonante.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um algoritmo computacional, baseado em computação evolutiva, especificamente algoritmo genético (AG), que ao ser apresentado aos três parâmetros fundamentais do equipamento, a saber: energia inicial, energia final, e partícula acelerada, apresente a melhor composição de variáveis para construção do mesmo. A estrutura base deste trabalho segue representada pela Figura 1.1.



**Figura 1.1: Representação da ideia do projeto desenvolvido. Fonte: Acervo do autor.**

Destaca-se a importância deste trabalho para aplicação em fases iniciais de projetos de aceleradores circulares, assim como uma base para desenvolvimento de metaheurísticas mais robustas e elaboradas, com presença e análise de maior número de variáveis de um acelerador de partículas circular, com inclusão de mais características reais dos mesmos.

### 1.3.2. Objetivo Específico

- Equacionar características de um acelerador de partículas circular, baseado no modelo desenvolvido pelo Núcleo de Radiações Ionizantes, NRI, do Departamento de Engenharia Nuclear, DEN, da UFMG (RABELO, 2016), porém modificado através de introdução de um sistema de aceleração composto por cavidade cilíndrica ressonante;
- Determinar restrições aplicáveis ao projeto de um acelerador de partículas circular, considerando suas duas estruturas fundamentais, sistema de aceleração via cavidade cilíndrica ressonante e sistema de circulação da partícula;
- Validar algoritmo base de acordo com literatura da área;
- Desenvolver e aplicar a computação evolutiva, mais precisamente algoritmos genéticos, ao equacionamento fundamental desenvolvido para o modelo do acelerador de partículas circular proposto;

- Simular computacionalmente e apresentar modelo para aceleradores de partículas circulares com distintos propósitos, sendo, produção de radioisótopos, produção de radioisótopo específico e terapia médica.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TEXTO

Esta tese está estruturada no formato de artigos; entretanto o primeiro capítulo trata da apresentação do tema, relevância e objetivos da pesquisa. Em seguida será apresentado uma série de artigos que tem por objetivo destacar a metodologia empregada assim como os resultados obtidos durante do desenvolvimento do trabalho de pesquisa, cobrindo os seguintes tópicos:

- Algoritmo computacional utilizado para modelar um acelerador de partículas circular com cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração;
- Aplicação de um algoritmo genético empregado para modelamento otimizado de um acelerador de partículas circular para produção de radioisótopos;
- Aplicação de um algoritmo genético empregado para determinar parâmetros para um acelerador de partículas circular para terapia por feixe de prótons;
- Aplicação de um algoritmo genético empregado para modelamento otimizado de um acelerador de partículas circular dedicado à produção do radioisótopo carbono 11, C-11;
- Avaliação de considerações relativas ao tempo da partícula pela estrutura de aceleração do modelo de acelerador de partículas circular adotado nesta pesquisa.

## CAPÍTULO 2

# PROGRAMA COMPUTACIONAL *ACEL* PARA MODELAMENTO DE ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR COM CAVIDADE CILÍNDRICA RESSONANTE

### RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um código, dito *ACEL*, para modelamento de um acelerador de partículas circular (AC) com cavidade cilíndrica ressonante (CR) como estrutura de aceleração. O modelo de AC tem por base o proposto pelo Núcleo de Radiações Ionizantes (NRI) do Departamento de Engenharia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), modificado com a presença de uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração. Como resultados apresenta-se o modelo de AC base para desenvolvimento; o formalismo matemático para definição dos parâmetros físicos; o fluxograma para o algoritmo computacional implementado; assim como a validação do algoritmo desenvolvido de acordo com dados da literatura, referente ao modelo do NRI.

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Cavidade Ressonante; Simulação Computacional.

### ABSTRACT

The purpose of this article is present a computational code, named as *ACEL*, for modeling a circular particle accelerator (AC) with a cylindrical resonant cavity (CR) as accelerator structure. The development of this work showed, the AC base model applied in this project, provided by Nucleus Ionizing Radiation (NRI) of the Nuclear Engineering Department (DEN) of the Federal University of Minas Gerais (UFMG), modified with the presence of cylindrical resonant cavity as an acceleration structure. As a result, this paper showed the AC base used for development; the mathematical formalism applied for the definition of physical parameters of the equipment; the flowchart for the computational algorithm implemented; as well the validation of the algorithm developed according to literature data, referring to the NRI model.

**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Resonant Cavity; Computational Simulation.

## 2.1. INTRODUÇÃO

Aceleradores de partículas circulares são equipamentos de alta tecnologia empregados nas mais diversas áreas como: pesquisas relacionadas com a origem do universo (NÓBREGA e MACKEDANZ, 2013); medicina nuclear envolvendo aspectos de diagnóstico e tratamento (IAEA, 2009); além de aplicações na área de combustíveis nucleares, como na eliminação dos resíduos oriundos do processo de fissão nuclear para obtenção de energia (NEA, 2002).

Os aceleradores cíclicos possuem característica construtiva que permitem a trajetória em curva das partículas pela ação de campos magnéticos. Este tipo de acelerador força a partícula a passar diversas vezes pelo sistema de aceleração. Sendo que a energia final da partícula depende da amplitude da diferença de potencial percebida pela partícula em cada volta e do número de voltas que estas percorrem no dispositivo. Na Figura 2.1 (CYCLOTRON PATENT, 2012), tem-se representação do ciclotron, ou acelerador magnético ressonante, proposto por Ernest Lawrence em 1929, porém construído somente em 1932 (TAKAHASHI, 1997). Pode-se dizer que tal equipamento é composto fundamentalmente pelos seguintes itens: fonte de partículas; estrutura de aceleração; estrutura de circulação e estrutura de extração.

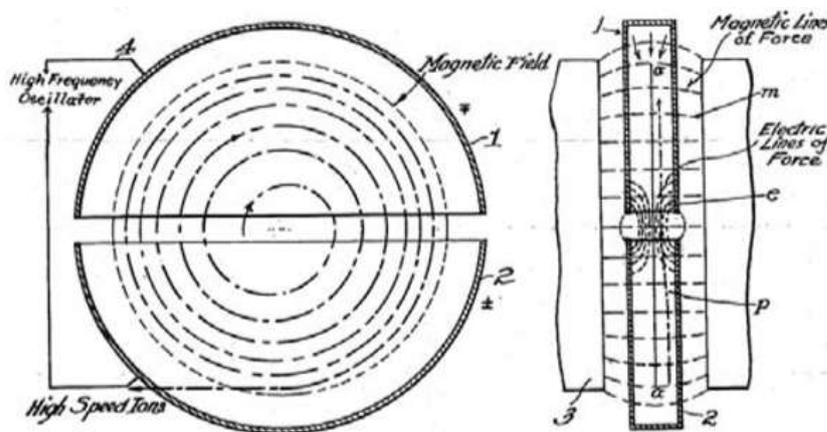


Figura 2.1: Representação do Ciclotron. Fonte: CYCLOTRON PATENT, 2012.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um programa computacional, dito Programa Computacional de Cálculo de Acelerador Circular – ACEL, que modela um acelerador de partículas circular, com cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração, AC-CR. Será apresentada uma breve descrição do modelo, formalismo matemático, seguido pelo algoritmo computacional desenvolvido no *software* Matlab®, e por fim a validação do mesmo.

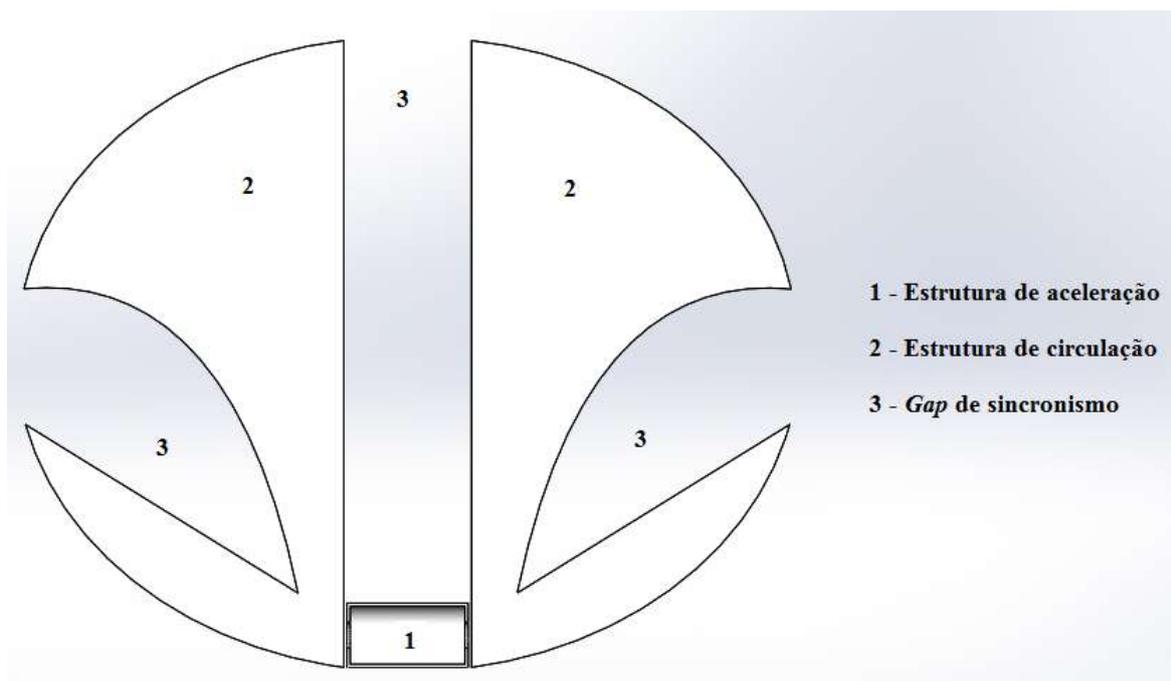
## 2.2.MODELAMENTO MATEMÁTICO E ALGORITIMO COMPUTACIONAL

### 2.2.1. Descrição do AC-CR

O modelo AC-CR é composto fundamentalmente por duas estruturas: a estrutura de aceleração (no caso uma CR) e a estrutura de circulação do feixe de partículas (magnetos, dito MG). A estrutura de aceleração CR é onde será provido o gradiente de energia à partícula a ser

acelerada, mediante a aplicação de um campo elétrico, ou mais especificamente devido a uma oscilação na diferença de potencial presente. Já a estrutura de circulação MG é aquela onde a partícula sofre ação de um campo magnético, para poder após um ciclo completo pelo equipamento retornar à região de estrutura de aceleração.

O modelo AC adotado seguiu o modelo desenvolvido pelo NRI do DEN da UFMG, ilustrado na Figura 2.2, e apresentado pelo trabalho de RABELO (2016).



**Figura 2.2: Representação do modelo do acelerador de partículas circular desenvolvido pelo NRI DEN, UFMG. Fonte: Acervo do autor.**

O diferencial na modelagem do AC proposto por este trabalho é a aplicação de uma cavidade cilíndrica ressonante (CR) como estrutura de aceleração, uma vez que o modelo original do NRI emprega um sistema do tipo “*drift tube*”. Está é feita uma vez que a cavidade ressonante apresenta uma melhor transferência de energia do que o “*drift tube*”, já que nesta última a partícula precisa “perder” tempo no interior da estrutura para poder “ganhar” energia tanto ao entrar quanto sair da mesma. De forma contrária em uma CR a partícula estaria “ganhando” energia por todo o comprimento dessa estrutura, sendo assim mais eficiente nessa transferência de energia.

A estrutura do tipo cavidade cilíndrica ressonante empregada é conhecida por “*Pillbox Cavity*” (IAEA, 2008 e PHYSICS, 2015), constituída de um cilindro vazio com uma superfície

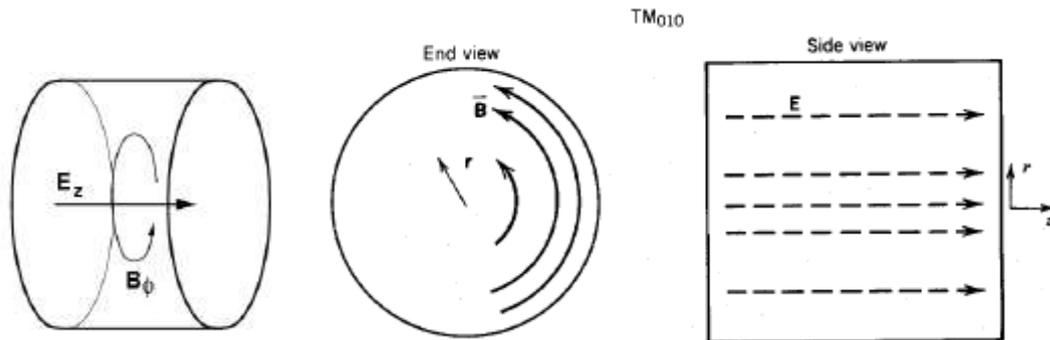
condutora. Destaca-se o modo  $TM_{010}$  como o modo de onda ideal para essa estrutura. Para este modo de propagação apresentam-se as Eqs. 2.1 (CAMPOS e CAMPOS, 2016):

$$\begin{aligned} E_r &= 0 \\ E_z &= E_0 \cdot J_0(k_r \cdot r) \cdot \cos(\omega t) \\ H_\phi &= -\frac{E_0}{Z_0} J_1(k_r \cdot r) \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

A frequência angular da cavidade “*Pillbox Cavity*” pode ser determinada pelo seu raio,  $r = R_{cav}$ , uma vez que não há nenhuma dependência do campo com  $z$  e  $\phi$ , conforme destacado em detalhe por CAMPOS e CAMPOS (2016), e apresentado na Eq. 2.2.

$$\omega_0 = k_r \cdot c = \frac{2,405 \cdot c}{R_{cav}} \quad (2.2)$$

Desta forma, será empregado uma cavidade cilíndrica ressonante que apresente em seu interior uma composição de campos eletromagnéticos capazes de garantir o modo de propagação  $TM_{010}$ , mantendo assim a condição adequada e ideal para prover ganho de gradiente energético à partícula a ser acelerada, conforme ilustra a Figura 2.3 (IAEA, 2008).



**Figura 2.3: Representação da cavidade cilíndrica ressonante com a composição de campos elétricos e magnéticos em seu interior, como resultado do modo de propagação  $TM_{010}$ . Fonte: modificado de IAEA, 2008.**

Tal condição para ser aceita, só é viável mediante características geométricas bem definidas da cavidade ressonante, sendo essas características impostas ao algoritmo computacional desenvolvido e abordado nas próximas seções.

### 2.2.2. Equacionamento Matemático do AC-CR

O formalismo matemático do AC-CR será apresentado na sequência em que foi aplicado para o desenvolvimento do algoritmo computacional, com tais equações presente em referências como KAPLAN (1968), RABELO (2016) e CAMPOS e CAMPOS (2017).

Para adoção de uma estrutura de aceleração do tipo cavidade cilíndrica ressonante, CR, dois requisitos foram fundamentais: avaliação da frequência de ressonância da estrutura,  $f_{cr}$ , seguido do cálculo para garantia da presença do modo de propagação  $TM_{010}$  em seu interior. Tais condições são reproduzidas pelas Eqs. 2.3 e 2.4 a seguir:

$$f_{cr} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{2,405 \cdot c}{R_{cav}} \quad (2.3)$$

$$\frac{L_{cav}}{R_{cav}} < 2 \quad TM_{010} \quad (2.4)$$

Onde,  $c$  trata-se da velocidade da luz no vácuo,  $L_{cav}$  comprimento e  $R_{cav}$  raio da cavidade cilíndrica ressonante.

Tomando por base a energia inicial da partícula, são calculados alguns dos parâmetros físicos do acelerador de partículas circular, mais especificamente momento linear, velocidade e raio da partícula, dados pelas Eqs. 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente. O índice “r” refere-se a “relativístico”, introduzido para indicar a compensação da variação da massa em altas energias.

$$p_r = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 + (2 \cdot E \cdot m_0 \cdot c^2)} \quad (2.5)$$

$$v_r = \frac{p_r \cdot c}{\sqrt{m_0^2 \cdot c^2 + p_r^2}} \quad (2.6)$$

$$r_r = \frac{p_r}{q \cdot T} \quad (2.7)$$

Onde  $p_r$  trata-se do momento linear,  $v_r$  da velocidade, e  $r_r$  do raio, todos estes “relativísticos”.  $m_0$  a massa em repouso da partícula com  $q$  carga, e energia  $E$ . Por fim,  $T$  trata-se do campo magnético ao qual está submetida na região de circulação.

É também fundamental no equacionamento do AC-CR, a avaliação dos tempos associados com a passagem da partícula por cada uma das estruturas componentes do

equipamento, CR e MG. Basicamente trata-se do tempo gasto pela partícula para passar pela estrutura de aceleração, CR (Eq. 2.8); tempo gasto pela partícula para percorrer internamente os magnetos, MG, na forma de “dês”, região onde estão submetidos à ação do campo magnético (Eq. 2.9); e tempo da partícula para percorrer pela distância entre o espaçamento entre dês, dito desvio principal, de mesma dimensão do comprimento da estrutura de aceleração (Eq. 2.10), como segue:

$$T_{acel} = \frac{p_r(i+1) - p_r(i)}{\frac{q \cdot ddp}{L_{cav}}} \quad (2.8)$$

$$T_{circD} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot r_r}{v_r} \quad (2.9)$$

$$T_{des\_1} = \frac{L_{cav}}{v_r} \quad (2.10)$$

Onde,  $T_{acel}$  é o tempo da partícula com carga  $q$ , no interior da estrutura de aceleração com comprimento  $L_{cav}$  e submetida à diferença de potencial  $ddp$ . Já  $p_r(i+1)$  e  $p_r(i)$ , são respectivamente os momentos lineares da partícula antes e após passar pela estrutura de aceleração.  $T_{circD}$ , trata-se do tempo da partícula no percurso pelos “dês” do equipamento, e  $T_{des\_1}$  o tempo ao percorrer o desvio principal devido à presença da estrutura de aceleração.

Fica evidente que o tempo total gasto pela partícula para percorrer a região de circulação,  $T_{circ}$ , será dado pela soma do tempo ao passar pelos “dês”,  $T_{circD}$ , com o tempo que demanda para atravessar a região do desvio principal,  $T_{des\_1}$ , conforme segue na Eq. 2.11:

$$T_{circ} = T_{circD} + T_{des\_1} \quad (2.11)$$

Fica também claro que o tempo total da partícula pelo acelerador circular,  $T_{tot}$ , será o tempo gasto na passagem da região de aceleração, acrescido do tempo pela passagem pela região de circulação, descrito pela Eq. 2.12 a seguir:

$$T_{tot} = T_{acel} + T_{circ} \quad (2.12)$$

Para o desenvolvimento do algoritmo apresentado tomou-se como referência que o tempo ideal,  $T_{ideal}$ , para a partícula percorrer uma volta por toda a estrutura do equipamento, e associando este com o tempo total,  $T_{tot}$ , gasto pela partícula em sua primeira volta, ou seja,

quando ela foi submetida a somente um gradiente de energia na região de aceleração. A este tempo ideal está também associado a frequência da partícula a ser acelerada,  $f_{part}$ . Observa-se que desta forma garante-se um comprimento zero para a aleta da primeira volta da partícula, conforme representado abaixo pelas Eqs. 2.13 e 2.14:

$$T_{ideal} = T_{tot} \quad (2.13)$$

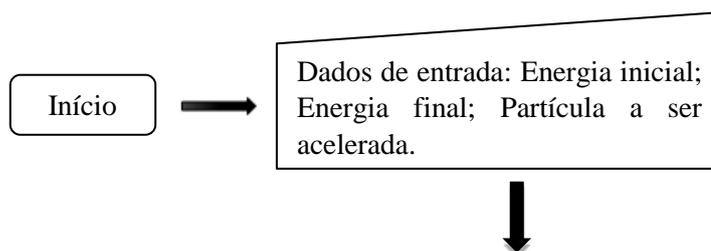
$$f_{part} = \frac{1}{T_{ideal}} \quad (2.14)$$

Neste ponto tem-se uma das características fundamentais do modelo de acelerador circular proposto pelo NRI do DEN da UFMG, que está na presença de “aletas” ou “gaps” na região de circulação da partícula. A presença dessas “aletas” é caracterizada por região onde as partículas não são submetidas à ação do campo magnético, ou seja, elas não sofrem ação do campo vetorial responsável por defletí-las. A ideia por trás dessas “aletas” é prover um caminho por onde a partícula perca tempo ao passar pela região de circulação do equipamento, e desta forma chegue na região de aceleração atingindo o sincronismo entre a frequência da partícula e a frequência da cavidade ressonante. Assim para cada volta uma “aleta” com dimensão “ $dx$ ” será acrescida aos magnetos para garantia do sincronismo, cujo comprimento está associado com a diferença entre o tempo de volta ideal e real da partícula,  $dif_T$ , assim como com sua velocidade de convolução,  $v_r$ , sendo “ $dx$ ” representado a seguir pela Eq. 2.15:

$$dx = dif_T \cdot v_r \quad (2.15)$$

É também calculada a quantidade de voltas necessárias para a partícula atingir energia superior à energia final estipulada do projeto do AC-CR.

Já o fluxograma com a descrição da sequência de cálculos matemáticos realizados pelo algoritmo computacional é apresentado na Figura 2.4.



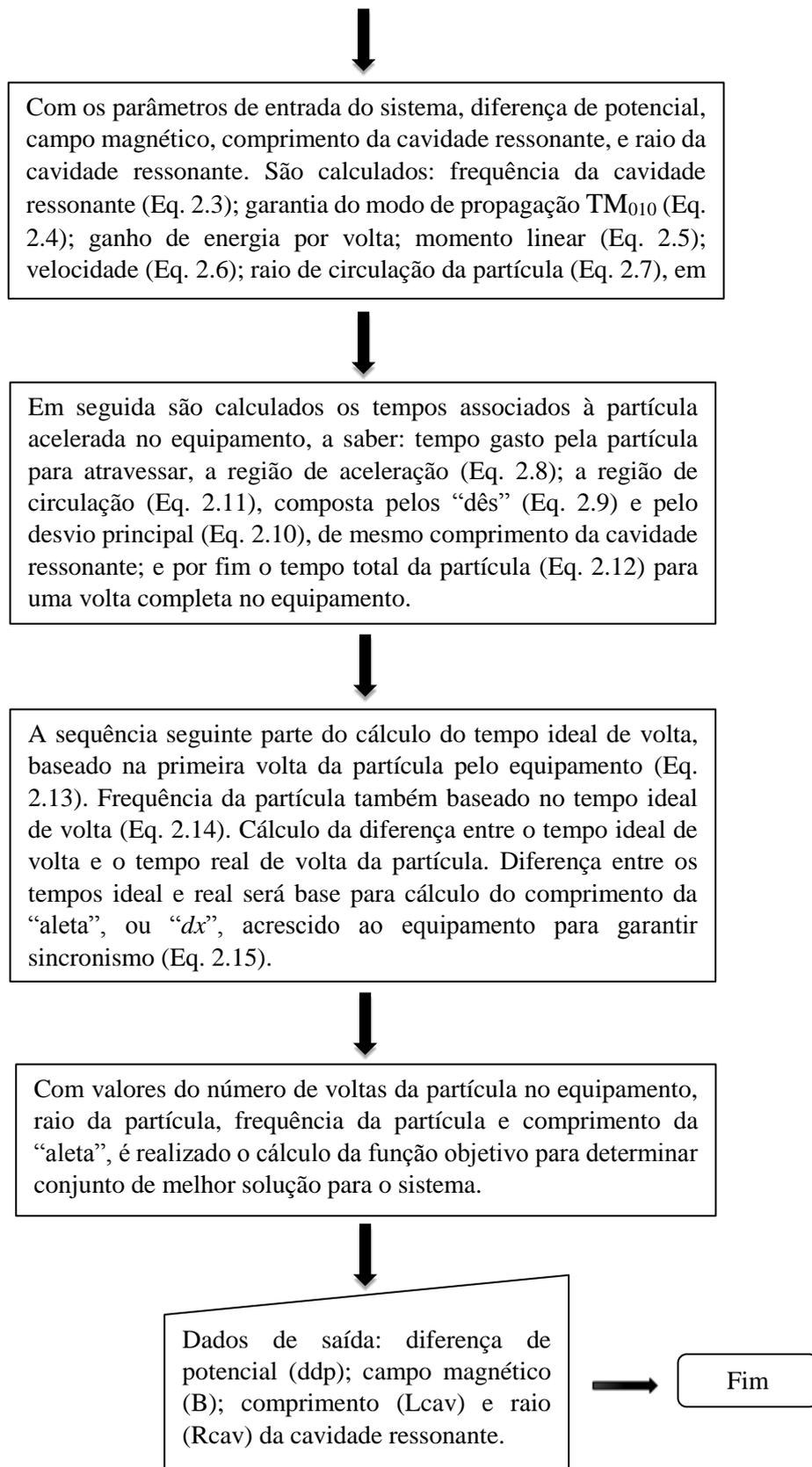


Figura 2.4: Fluxograma do algoritmo ACEL. Fonte: Acervo do autor.

## 2.3.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO

Conforme apresentado na seção anterior, fundamentalmente o algoritmo desenvolvido segue o proposto no fluxograma. O ponto de partida está na escolha da energia inicial, final e partícula a ser acelerada. Em seguida são estipulados valores para os parâmetros, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da estrutura de aceleração. De posse desses valores são calculados inicialmente a frequência de ressonância da cavidade, assim como se estará presente em seu interior o modo de propagação  $TM_{010}$ . Em seguida calcula-se o momento linear, velocidade, raio e ganho de energia da partícula a cada volta pelo equipamento até ser alcançada a energia final estipulada. Com as grandezas físicas calculadas tem-se na sequência o cálculo dos tempos da partícula pelo equipamento, como pela região de aceleração e circulação, para assim ter o tempo total da partícula em cada volta no equipamento. Adota-se então o tempo da partícula em sua primeira volta como o tempo ideal para todas as partículas no equipamento. Com este são calculados a frequência da partícula, assim como o acréscimo de comprimento “ $dx$ ” a ser provido a todas as demais voltas das partículas para que elas “percam” tempo e se tenha o sincronismo desejado no equipamento. Esses comprimentos acrescidos por órbita, forma a aleta ou “gap” de sincronismo inseridos em cada um dos “dês” do equipamento, conforme ilustrado na Figura 2.2. Destaca-se que para cada conjunto de parâmetros estipulados, tem-se toda essa sequência de cálculo respeitada.

Com o algoritmo ACEL implementado foram realizadas simulações computacionais com objetivo de validação. Tal processo de avaliação foi realizado por meio de comparação com resultados apresentados na tese “Projeto Eletromagnético de um Pós-Acelerador de Prótons para Tratamento de Tumor Ocular” de RABELO (2016). Mais especificamente para resultados dos cálculos analíticos da trajetória dos prótons apresentados na referida referência. Os valores das constantes aplicados são apresentados na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Constantes aplicadas para validar algoritmo desenvolvido em Matlab®. Fonte: Acervo do autor.**

Grandezas	Valores
Velocidade da luz (m/s)	$3,0 \times 10^8$
Massa do próton (kg)	$1,673 \times 10^{-27}$
Carga do próton (C)	$1,602 \times 10^{-19}$
Energia inicial da partícula (MeV)	15

Na Tabela 2.2 são apresentados os resultados extraídos da referência empregada, assim como os obtidos via algoritmo elaborado.

**Tabela 2.2: Valores presentes na literatura de referência RABELO (2016), e erro % para valores obtidos por meio do algoritmo ACEL. Fonte: Acervo do autor.**

	<b>Energia (MeV)</b>	<b>Número de voltas</b>	<b>r<sub>r</sub> (m)</b>	<b>p<sub>r</sub> (kg m s<sup>-1</sup>)</b>	<b>v<sub>r</sub> (m s<sup>-1</sup>)</b>
<b>Referencia</b>	15	1	0,18	$9,0 \times 10^{-20}$	$5,29 \times 10^7$
<b>% Erro ACEL</b>		0%	0%	0%	0%
<b>Referencia</b>	40	~128	0,30	$1,48 \times 10^{-19}$	$8,50 \times 10^7$
<b>% Erro ACEL</b>		1,56%	0%	0%	0%
<b>Referencia</b>	64	~248	0,39	$1,88 \times 10^{-19}$	$10,5 \times 10^7$
<b>% Erro ACEL</b>		0,81%	0%	0%	0%

Ambos os modelos de AC são similares, mas a diferença fundamental está nas distintas estruturas de acelerações empregadas. Contudo o erro percentual verificado para a quantidade de voltas necessárias para a partícula, no caso próton, atingir a energia final determinada, justifica-se por que no equipamento da referência empregou-se valores exatos para a energia final, já neste trabalho o algoritmo desenvolvido deve garantir que a partícula atinja no mínimo essa energia final.

Na Tabela 2.3 são apresentados valores extraídos da mesma referência, com os obtidos via ACEL, desenvolvido em Matlab®, tendo como foco a comparação relacionada com as variáveis associadas ao tempo de volta da partícula pelo equipamento proposto.

**Tabela 2.3: Resultados analíticos comparativos entre referência empregada, RABELO (2016), e algoritmo Matlab® para variáveis associados ao tempo da partícula por volta no equipamento. Fonte: Acervo do autor.**

	$E_c(\text{MeV})$	$v_r(\text{m s}^{-1})$	$T_{\text{acel}}(\text{s})$	$T_{\text{desvio}}(\text{s})$	$T_{\text{des}}(\text{s})$	$T_{\text{Total}}(\text{s})$
<b>Referência</b>	15	$5,29 \times 10^7$	$3,75 \times 10^{-9}$	$3,76 \times 10^{-9}$	$2,22 \times 10^{-8}$	$2,97 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$5,29 \times 10^7$	$3,76 \times 10^{-9}$	$3,75 \times 10^{-9}$	$2,22 \times 10^{-8}$	$2,97 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	20	$6,13 \times 10^7$	$3,26 \times 10^{-9}$	$3,27 \times 10^{-9}$	$2,24 \times 10^{-8}$	$2,89 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$6,09 \times 10^7$	$3,29 \times 10^{-9}$	$3,28 \times 10^{-9}$	$2,23 \times 10^{-8}$	$2,89 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	25	$6,80 \times 10^7$	$2,96 \times 10^{-9}$	$2,94 \times 10^{-9}$	$2,25 \times 10^{-8}$	$2,84 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$6,79 \times 10^7$	$2,95 \times 10^{-9}$	$2,95 \times 10^{-9}$	$2,24 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	30	$7,42 \times 10^7$	$2,71 \times 10^{-9}$	$2,70 \times 10^{-9}$	$2,26 \times 10^{-8}$	$2,80 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$7,38 \times 10^7$	$2,71 \times 10^{-9}$	$2,71 \times 10^{-9}$	$2,26 \times 10^{-8}$	$2,80 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	35	$7,98 \times 10^7$	$2,52 \times 10^{-9}$	$2,51 \times 10^{-9}$	$2,27 \times 10^{-8}$	$2,78 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$7,95 \times 10^7$	$2,52 \times 10^{-9}$	$2,52 \times 10^{-9}$	$2,27 \times 10^{-8}$	$2,77 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	40	$8,50 \times 10^7$	$2,37 \times 10^{-9}$	$2,36 \times 10^{-9}$	$2,29 \times 10^{-8}$	$2,76 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$8,47 \times 10^7$	$2,37 \times 10^{-9}$	$2,36 \times 10^{-9}$	$2,28 \times 10^{-8}$	$2,75 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	45	$8,97 \times 10^7$	$2,24 \times 10^{-9}$	$2,23 \times 10^{-9}$	$2,30 \times 10^{-8}$	$2,74 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$8,95 \times 10^7$	$2,24 \times 10^{-9}$	$2,24 \times 10^{-9}$	$2,29 \times 10^{-8}$	$2,74 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	50	$9,42 \times 10^7$	$2,13 \times 10^{-9}$	$2,12 \times 10^{-9}$	$2,31 \times 10^{-8}$	$2,73 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$9,40 \times 10^7$	$2,13 \times 10^{-9}$	$2,13 \times 10^{-9}$	$2,30 \times 10^{-8}$	$2,73 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	55	$9,84 \times 10^7$	$2,04 \times 10^{-9}$	$2,03 \times 10^{-9}$	$2,32 \times 10^{-8}$	$2,73 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$9,82 \times 10^7$	$2,04 \times 10^{-9}$	$2,04 \times 10^{-9}$	$2,31 \times 10^{-8}$	$2,72 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	60	$10,2 \times 10^7$	$1,96 \times 10^{-9}$	$1,95 \times 10^{-9}$	$2,33 \times 10^{-8}$	$2,72 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$10,2 \times 10^7$	$1,96 \times 10^{-9}$	$1,95 \times 10^{-9}$	$2,33 \times 10^{-8}$	$2,72 \times 10^{-8}$
<b>Referência</b>	64	$10,5 \times 10^7$	$1,91 \times 10^{-9}$	$1,90 \times 10^{-9}$	$2,34 \times 10^{-8}$	$2,72 \times 10^{-8}$
<b>ACEL</b>		$10,5 \times 10^7$	$1,90 \times 10^{-9}$	$1,90 \times 10^{-9}$	$2,34 \times 10^{-8}$	$2,72 \times 10^{-8}$

É importante destacar que a velocidade empregada pela referência, assim como o tempo da partícula pela estrutura de aceleração, foi extraída do *software* CST®, enquanto que neste trabalho foram obtidos via modelamento matemático, descrito na seção 2.2.2. Cita-se ainda que a variável que apresentou maior discrepância de valores foi a velocidade da partícula, com a maior diferença entre o valor extraído da referência e o encontrado no algoritmo ACEL de 0,5%.

Nos dados de referência, empregado na validação, encontra-se, que o tempo total representativo do período de circulação do feixe de partículas foi de  $2,97 \times 10^{-8}$  s. Com este

resultado determinou-se a frequência da partícula de 33,7 MHz. Para o algoritmo ACEL encontraram-se  $2,97 \times 10^{-8}$  s e 33,6328 MHz para o tempo total e frequência do feixe de partículas, respectivamente. Assim entende-se que o algoritmo ACEL, juntamente com a metodologia empregada, foram validados.

## 2.4.CONCLUSÃO

Um dos aspectos que limita o emprego dos aceleradores circulares, ou cíclotrons, está relacionado com a perda de sincronismo da partícula carregada durante o processo de ganho de energia. Com o modelo de acelerador proposto, as aletas inseridas na estrutura de circulação tiveram por princípio garantir esse sincronismo. O emprego como estrutura de aceleração de uma cavidade cilíndrica ressonante, com operação no modo de propagação  $TM_{010}$ , trouxe evolução proposta do AC, ao garantir condição propícia para ganho de energia da partícula carregada ao atravessar a região de aceleração.

Acredita-se desta forma que com o modelo proposto e o algoritmo computacional ACEL, desenvolvido em Matlab®, tem-se grande potencial no modelamento de aceleradores de partículas circulares, seguindo o modelo desenvolvido pelo grupo de pesquisa NRI da UFMG apresentado por RABELO (2016).

## 2.5.REFERÊNCIAS

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Análise Eletromagnética em Cavidade Cilíndrica Ressonante**. Revista Ciência e Tecnologia, RCT, UNISAL, v.19, n.34, 2016.

Cyclotron Patent. ([http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyclotron\\_patent.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyclotron_patent.png)). Acesso em 28/10/2012.

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2008. **Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice**. Vienna.

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2009. **Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods**. Vienna.

KAPLAN, I., **Nuclear Physics**, 2 ed. Ed. Guanabara Dois, 1978. 636 p.

NEA, NUCLEAR ENERGY AGENCY. **Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles – A Comparative Study**. 2002.

NÓBREGA, Fábio Kopp; MACKEDANZ, Luiz Fernando. **O LHC (*Large Hadron Collider*) e nossa física de cada dia.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v.35, n.1, 2013.

PHYSICS. Disponível em: ([www.pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator\\_option/3\\_RF\\_and\\_linear\\_acceleration.pdf](http://www.pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator_option/3_RF_and_linear_acceleration.pdf)). Acesso em 03/02/2015.

RABELO, Luísa de Araújo. **Projeto Eletromagnético de um Pós-Acelerador de Prótons para Tratamento de Tumor Ocular.** Tese de Doutorado em Engenharia Nuclear na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Julho de 2016.

TAKAHASHI, Jiro. **Projeto e construção de uma estrutura aceleradora de elétrons de onda contínua.** Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, 1997.

## CAPÍTULO 3

# ALGORITMO GENÉTICO PARA MODELAMENTO OTIMIZADO DE UM ACELERADOR CIRCULAR DE 35 MeV PARA PRODUÇÃO DE RADIOISÓTOPOS

### RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a proposta otimizada de um acelerador de partículas circular (AC) para produção de radioisótopos (PR) de meia via curta, emissores de pósitrons como C-11, N-13, O-15 e F-18, e outros que sofrem decaimento por captura eletrônica, como In-11, Ga-67, Ta-201 e I-124, gerados por reações tendo próton (p) de até 35MeV como precursor. Para a otimização foi utilizado metaheurística computacional fundamentada em algoritmos genéticos (AG). Foram desenvolvidos e apresentados os conceitos fundamentais dos algoritmos genéticos empregados no programa, assim como o processo para desenvolvimento da metaheurística. O programa foi implementado no *software* Matlab®. Os seguintes parâmetros de minimização foram considerados: diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante, no intuito de atender ao melhor modelamento do acelerador. Como resultados destaca-se, código de otimização desenvolvido assim como um modelo otimizado obtido, representativo do ACPR - 35 MeV. As características físicas do equipamento proposto mediante os valores obtidos provenientes do AG, foram apresentadas. Assim a ferramenta computacional baseada em AG foi capaz de gerar um adequado modelo de acelerador de prótons circular de 35 MeV para produção de radioisótopos.

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Algoritmos Genéticos; Radioisótopos.

### ABSTRACT

The objective of this work is to present the optimized proposal of a circular particle accelerator (AC) for the production of short half-life radioisotopes (PR), such as C-11, N-13, O-15 and F-18, and others that decay by electron capture, such as In-11, Ga-67, Ta-201 and I-124, both group generated by reactions having proton (P) of up to 35MeV as precursor. For the optimization, a computational metaheuristics routine based on genetic algorithms (GA) was used. The fundamental concepts of the genetic algorithms used in the computational program were presented, as well as the process for the development of metaheuristics. The algorithm was implemented in Matlab® software. The following minimization parameters were considered: potential difference, magnetic field, length and radius of the resonant cavity, in order to meet the best accelerator modeling. As results, the optimization code was developed and an optimized model was obtained representative of the ACPR-35 MeV. The physical characteristics of the equipment proposed using the values obtained from the GA were presented. Important mention the GA-based computational tool was able to generate a suitable 35 MeV circular proton accelerator model for the production of radioisotopes.

**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Genetic Algorithm; Radioisotopes.

### 3.1.INTRODUÇÃO

É de conhecimento que os cíclotrons, ou aceleradores de partículas circulares, são o principal elemento facilitador de reações nucleares para prover a produção de radioisótopos, de meia vida curta e ricos em prótons, empregados na medicina nuclear. Destaca-se o uso dos ACs na produção de radioisótopos para aplicação em procedimentos de diagnóstico médico, como tomografia por emissão de pósitrons (PET – *Positron Emitted Tomography*) e tomografia computadorizada por emissão de fóton único (SPECT – *Single Photon Emission Computed Tomography*) SCHMOR (2010).

A partícula acelerada por um cíclotron, com determinada energia cinética final, é a precursora de reações nucleares que poderão ocorrer com núclídeos específicos em um alvo, para assim dar origem a um radioisótopo de interesse. Na Tabela 3.1, conforme dados de IAEA (2009), apresentam-se alguns dos radioisótopos mais empregados na atualidade, detalhes da reação envolvida, meia vida, tipo de decaimento (no caso, emissão de pósitron e captura eletrônica). É reconhecido que a energia cinética dos prótons acelerados, necessária para atender as reações nucleares, ou energia da reação (ER) na Tabela 3.1, tem valores de até 35MeV.

**Tabela 3.1: Radioisótopos de comum produção em Cíclotrons. Fonte: Acervo do autor.**

Radioisótopo	$t_{1/2}$ (m)	Decaimento	Reação	ER (MeV) IAEA (2009)
C-11	20,3 (m)	$\beta^+$	$^{14}\text{N}(p,\alpha)$	25
N-13	9,97 (m)	$\beta^+$	$^{16}\text{O}(p,\alpha)$	15
			$^{13}\text{C}(p,n)$	9
O-15	2,03 (m)	$\beta^+$	$^{15}\text{N}(p,n)$	10
			$^{16}\text{O}(p,pn)$	26.5
F-18	110 (m)	$\beta^+$	$^{18}\text{O}(p,n)$	20
Ga-127	20,3 (d)	e.c	$^{68}\text{Zn}(p,2n)$	25
In-111	2,83 (d)	e.c	$^{112}\text{Cd}(p,2n)$	25
I-124	4,2 (d)	$\beta^+$	$^{124}\text{Te}(p,n)$	20
Ta-201	73,06 (h)	e.c	$^{203}\text{Tl}(p,3n)$ $^{201}\text{Pb}$	30

Destaca-se a necessidade de atender a um espectro e intensidade, e em especial energia cinética, dependentes das seções de choque das reações em questão, vinculado ao radioisótopo de interesse. Ou seja, é relevante o controle dos parâmetros do acelerador de partículas circular, para entregar um feixe com as características físicas necessárias que otimize a probabilidade de ocorrência da reação nuclear esperada, conforme descrito em CAMPOS e CAMPOS (2014).

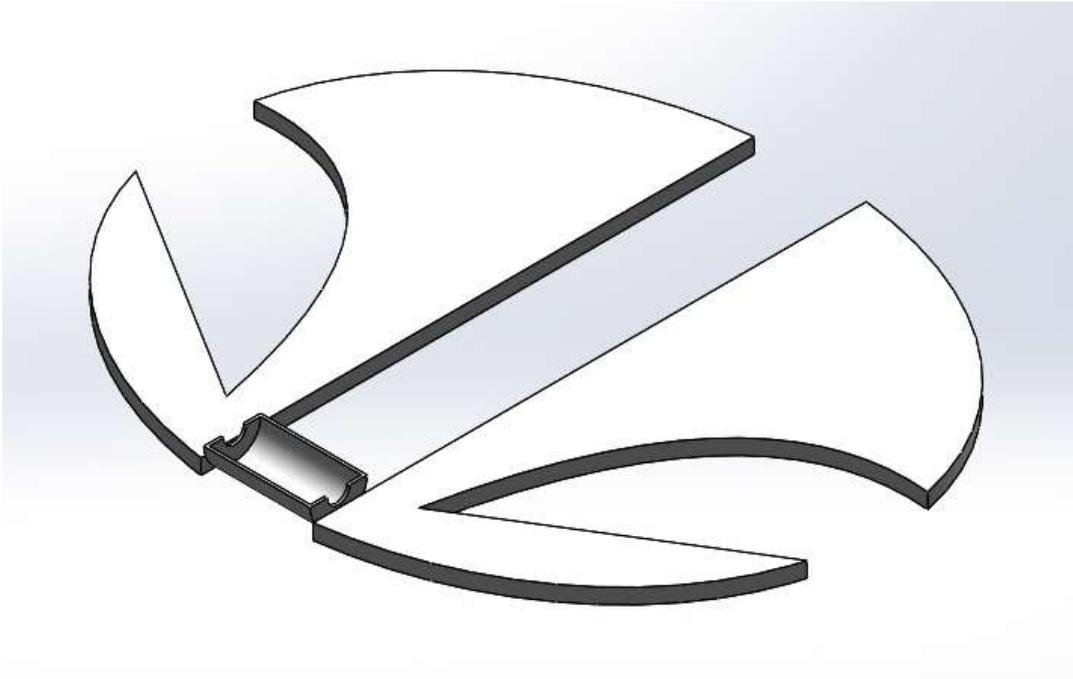
A área de otimização computacional envolve um campo de conhecimentos cujas técnicas visam determinar os extremos de funções em domínios determinados. Nesse contexto são aplicadas heurísticas e metaheurísticas inspiradas em mecanismos de adaptação dos seres vivos, conforme observados na natureza. A justificativa é que tais mecanismos devem produzir respostas adequadas para problemas de relativa complexidade. Transportado para o contexto da computação, implica que agentes que executam tarefas computacionalmente simples podem resolver problemas de grande complexidade quando agrupados coletivamente (CUNHA, 2012). Assim, os conceitos fundamentais de algoritmos genéticos podem ser empregados no desenvolvimento de uma metaheurística capaz de solucionar de forma eficiente o problema de composição de parâmetros físicos no modelamento de um acelerador de partículas circular.

Este trabalho tem por objetivo abordar o processo de desenvolvimento de uma metaheurística fundamentada em algoritmos genéticos, implementada no *software* Matlab®, com a proposta de gerar um conjunto de parâmetros adequados para um acelerador de partículas circular produtor de radioisótopos, dito ACPR - 35, que atenda a produção de radioisótopos presentes na Tabela 3.1.

## 3.2. DESENVOLVIMENTO DO *SOFTWARE* AG-ACPR

### 3.2.1. Modelo do Acelerador de Partículas para Produção de Radioisótopos (ACPR - 35)

O modelo de acelerador de partículas circular adotado segue o modelamento descrito no capítulo anterior, conforme ilustrado na Figura 2.2. Importante destacar que este modelo foi proposto pelo Núcleo de Radiações Ionizantes (NRI) do Departamento de Engenharia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), conforme trabalho de RABELO (2016), porém modificado com introdução de uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração em lugar do sistema do tipo “*drift tube*”, e com modificações da topologia do magneto obtida em condições de otimização, conforme representado pela Figura 3.1.

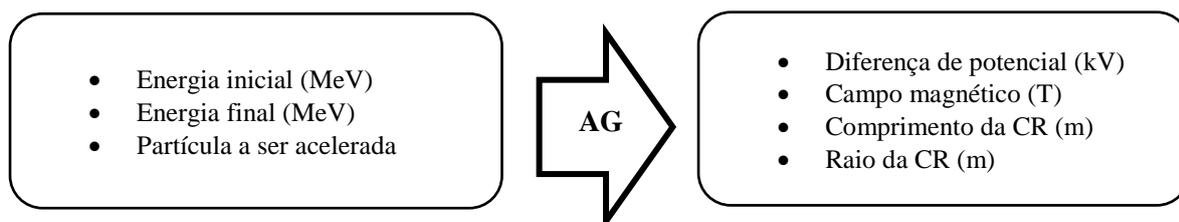


**Figura 3.1: Vista angular da representação do modelo do AC-CR. Fonte: Acervo do autor.**

Uma cavidade cilíndrica ressonante (CR) foi empregada como cavidade de aceleração no ACPR, mais especificamente uma estrutura conhecida por “*Pillbox Cavity*” (IAEA, 2008; e PHYSICS, 2015), e com garantia de operação no modo de propagação  $TM_{010}$ . Tal modo de operação apresenta melhor resposta no processo de aceleração da partícula carregada devido à composição de campos eletromagnéticos no interior da estrutura (CAMPOS e CAMPOS, 2016).

### 3.2.2. Desenvolvimento do Algoritmo Genético (AG)

Valores para energia inicial, energia final e tipo de partícula a ser acelerada, com massa  $m_0$  e carga  $q$  definidas, são inicialmente informadas ao AG. O AG apresenta então qual o melhor conjunto de parâmetros físicos, a saber: diferença de potencial (ddp), campo magnético (B) e geometria da cavidade CR, tendo comprimento ( $L_{cav}$ ) e raio ( $R_{cav}$ ), ideais para o propósito requerido, conforme diagrama ilustrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2: Resumo da metaheurística desenvolvida nesta pesquisa. Fonte: Acervo do autor.**

A metaheurística desenvolvida foi elaborada no *software* Matlab®, com o emprego de funções. O fluxograma da Figura 3.3 discrimina as funções e etapas necessárias para o desenvolvimento do algoritmo.

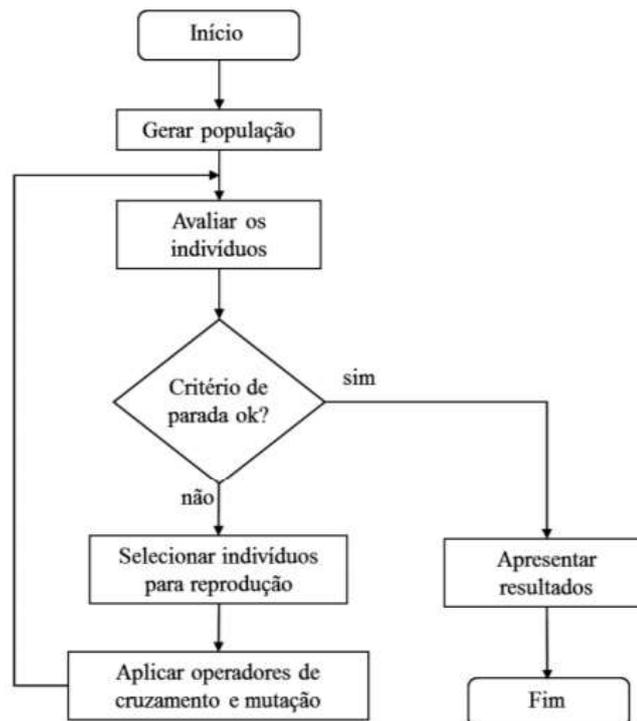


Figura 3.3: Fluxograma para desenvolvimento de um algoritmo genético. Fonte: LOPES et al., 2012.

### 3.2.3. Geração da População Inicial

O primeiro passo foi gerar a população inicial do problema, sendo esta composta pelos parâmetros: diferença de potencial (ddp); campo magnético (B); comprimento (Lcav) e raio (Rcav) da cavidade cilíndrica ressonante.

As grandezas que definiram o domínio do problema foram:

- Número de indivíduos (NI) → descreve quantas soluções serão geradas;
- Número de variáveis (NV) → descreve quantas variáveis compõe o problema;
- Limites inferiores (Linf) → valor inferior do range das variáveis;
- Limites superiores (Lsup) → valor superior do range das variáveis.

Na Tabela 3.2 são apresentados os valores atribuídos às quatro variáveis de entrada, seguidas pelas condições de domínio. Observe que foram geradas 150 soluções iniciais, composta por: ddp, B, Lcav e Rcav, dentro dos limites definidos (Linf, Lsup) estabelecidos nos domínios das variáveis.

**Tabela 3.2: Variáveis da função de geração da população inicial. Fonte: Acervo do autor.**

Número de indivíduos – NI		150
Número de variáveis – NV		4
Limite inferior – Linf	ddp [kV]	100
	B [T]	0,5
	Lcav [m]	0,1
	Rcav [m]	0,1
Limite superior – Lsup	ddp [kV]	400
	B [T]	3
	Lcav [m]	0,6
	Rcav [m]	0,6

A formação da população inicial, Pop, tem início através de processamento randômico, dependendo do número de indivíduos (NI) e número de variáveis (NV). A cada ciclo, Pop é alterado sendo adotado o limite inferior Linf, acrescido da diferença entre o Lsup e Linf e multiplicado pela população Pop no ciclo anterior, conforme destacado na Figura 3.4 a seguir.

$$\mathbf{Pop(i, j) = Linf(j) + (Lsup(j) - Linf(j)) * Pop(i, j) ;}$$

**Figura 3.4: Parte do código responsável por gerar a população inicial. Fonte: Acervo do autor.**

Destaca-se na Tabela 3.3 uma representação de conjuntos dos parâmetros da população composto pela diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante.

**Tabela 3.3: Formato da população inicial gerada pelo AG desenvolvido. Fonte: Acervo do autor.**

	<b>ddp (kV)</b>	<b>B (T)</b>	<b>Lcav (m)</b>	<b>Rcav (m)</b>
<b>Indivíduo 1</b>	340,4414	0,7086	0,1083	0,1881
<b>Indivíduo 2</b>	228,4269	1,4220	0,2922	0,1697
<b>Indivíduo 3</b>	323,3531	0,7835	0,1842	0,3336
<b>Indivíduo 4</b>	288,9641	0,7390	0,1877	0,3228
<b>Indivíduo 5</b>	388,2062	1,2709	0,1382	0,1658

### 3.2.4. Avaliação dos Indivíduos da População

O próximo passo consiste na avaliação dos indivíduos gerados na população. Optou-se por construção de função específica no Matlab® que represente o equacionamento matemático (EM) do modelamento do acelerador de partículas circular apresentado no item 2.2.2. A função EM faz o cálculo de todos os parâmetros físicos do acelerador. Esta função alimenta a função objetivo do problema denominada de *fitness*.

A função *fitness* envolveu um total de sete argumentos, sendo que quatro provenientes diretamente de EM para atender a uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração. A seguir destacam-se os parâmetros oriundos do EM:

- Voltas (Voltasout) → quantidade de voltas da partícula para atingir a energia final;
- Raio (Rrout) → raio da partícula ao atingir a energia final;
- dx (dxout) → dimensão das aletas relativo a cada volta da partícula, até atingir a energia final;
- Frequência (fout) → frequência da partícula, associada ao seu tempo de convolução inicial.

Na Figura 3.5 apresenta-se a estrutura que representa a função de avaliação da população, com destaque para os sete termos que compõe a mesma. Apresenta-se ainda como cada um dos quatro primeiros argumentos é calculado.

`fitness = Termo 1 + Termo 2 + Termo 3 + Termo 4 + Termo 5 + Termo 6 + Termo 7`

sendo:

Termo 1 = razão do número de voltas do indivíduo atual, pelo maior número de voltas de todos os indivíduos;

Termo 2 = razão do raio da última órbita do indivíduo atual, pelo maior raio de última órbita de todos os indivíduos;

Termo 3 = razão do valor médio de "dx" do indivíduo atual, pela maior média de "dx" de todos os indivíduos;

Termo 4 = razão da frequência da partícula do indivíduo atual, pela maior frequência da partícula de todos os indivíduos;

Termo 5 = Primeira restrição ou penalidade;

Termo 6 = Segunda restrição ou penalidade;

Termo 7 = Terceira restrição ou penalidade.

**Figura 3.5: Parte do código associado com o cálculo do aptidão de cada indivíduo. Fonte: Acervo do autor.**

Destaca-se aqui a importância do quinto termo em diante presentes na função *fitness*, caracterizados por serem restrições ou penalidades impostas à função objetivo. Essas restrições, como segue, são fundamentais para manter as soluções propostas pelo AG dentro do domínio válido de soluções impostas ao problema em questão.

Presente como quinto termo da função objetivo, apresenta-se a primeira penalidade imposta a esta função. Essa penalidade tem por requisito tornar válido e apresentável como resposta somente conjuntos de parâmetros em que houver "casamento" entre as frequências de ressonância da cavidade cilíndrica e da partícula em movimento pelo equipamento, definida pelo inverso do tempo total de percurso. Ou seja, são aceitas respostas, isto é, população, onde a frequência da cavidade ressonante seja múltipla da frequência da partícula em movimento. Quando essa condição não é satisfeita, a *fitness* das soluções assume valor muito alto induzido pela penalidade representada por este termo, sendo assim descartadas.

A segunda penalidade imposta à função objetivo está descrita no sexto termo da mesma. Este está associado à validação do AG, pois foi observado que o algoritmo apresentava soluções que não atendiam a energia final estipulada para o equipamento, fruto da não análise dos tempos ideal e real da partícula em circulação pelo acelerador proposto na avaliação metaheurística. Tal averiguação foi feita por meio de uma ação condicional no AG, onde somente foram aceitas respostas que atendiam a condição de sincronismo. Enfatiza-se que a

possibilidade de aplicar restrições ou penalidades na função objetivo, permite a seleção somente de respostas adequadas ao problema.

Como terceira restrição ou penalidade tem-se presente o Termo 7, responsável por avaliar se o raio da partícula em sua primeira volta pelo equipamento é inferior ao raio da estrutura de aceleração, o que acarretaria em choque da partícula com a cavidade ressonante. Mais uma vez aplicou-se condicional no AG, onde respostas, ou indivíduos com parâmetros que acarretariam a colisão mencionada são penalizados, sendo assim excluídos como respostas factíveis pelo AG.

Cada um dos quatro primeiros termos da *fitness* pode assumir como valor máximo a unidade. Mas composições dos parâmetros do equipamento podem reduzir esse valor para cada um dos termos citados. Já do quinto ao sétimo termo, idealmente possuem valor zero, ou próximo a este, assumindo uma solução válida para o problema. Logo o valor da *fitness* parte teoricamente de quatro (04).

Observe na Tabela 3.4 a inclusão do valor da função *fitness*, em conjunto com a impressão das variáveis de saída ddp, B, Lcav, Rcav. Destaque que quanto menor o valor dessa função objetivo, melhor é a resposta para o modelamento do ACPR com cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração. Esta resposta apresenta o menor número de voltas da partícula para atingir a energia final; menor raio da partícula associado com sua última convolução pelo equipamento; menor média dos valores de “*dx*”, referente à soma de cada aleta acrescida para gerar sincronismo; assim como menor a frequência da partícula pelo acelerador.

**Tabela 3.4: População inicial com valor da função objetivo calculado pelo AG desenvolvido. Fonte: Acervo do autor.**

	<b>ddp (kV)</b>	<b>B (T)</b>	<b>Lcav (m)</b>	<b>Rcav (m)</b>	<b><i>fitness</i></b>
<b>Indivíduo 1</b>	340,4414	0,7086	0,1083	0,1881	1,4690
<b>Indivíduo 2</b>	228,4269	1,4220	0,2922	0,1697	1,6534
<b>Indivíduo 3</b>	323,3531	0,7835	0,1842	0,3336	1,5503
<b>Indivíduo 4</b>	288,9641	0,7390	0,1877	0,3228	1,7540
<b>Indivíduo 5</b>	388,2062	1,2709	0,1382	0,1658	1,3489

Observa-se que nesta simulação trabalha-se com a otimização, mais especificamente a busca pelo mínimo, da função objetiva ou *fitness* apresentada, pois foi considerado que tais valores mínimos para os parâmetros do equipamento representam uma melhor escolha de projeto, ou equipamento compacto. Assim, por exemplo, na Tabela 3.4, o melhor conjunto de parâmetros é composto pelo “Indivíduo 5”.

### 3.2.5. Método de Seleção da População

Nesta etapa aplica-se técnica para para direcionar o processo de seleção para as melhores regiões no espaço de busca, de acordo com LOPES et al. (2012). Para o trabalho aqui apresentado adotou-se o método de seleção por torneio, conhecido por sua eficiência e relativa simplicidade. O método por roleta também foi avaliado, porém não apresentou resultados promissores.

Na seleção por torneio existe um parâmetro, denominado tamanho do torneio ( $k$ ), que define quantos indivíduos serão selecionados de forma aleatória dentro da população para competir, sendo escolhido aquele que apresente maior aptidão, para então ser submetido às operações genéticas como cruzamento e mutação (LINDEN, 2012).

Na função desenvolvida, com parte do código apresentado na Figura 3.6, para operar o torneio decidiu-se por selecionar 15 das melhores soluções, sendo que este número pode ser alterado para busca de melhor resposta. A partir de então são selecionados dois indivíduos, para a escolha do melhor, com probabilidade de 75%, mas passível de ser alterado. Resumindo, ao avaliar os dois indivíduos selecionados, se  $k$  for inferior a 0,75, foi selecionado o indivíduo com melhor *fitness*. Já se  $k$  for acima de 0,75, foi selecionado o indivíduo com pior *fitness*. A justificativa para tal ação está na busca global pela melhor solução. Uma outra característica da função torneio desenvolvida está na garantia que não são selecionados os mesmos indivíduos.

```
"if rand < k
    Pop_Aux(i, :) = Pai_1;
else
    Pop_Aux(i, :) = Pai_2;"
```

Figura 3.6: Parte do código responsável seleção dos indivíduos. Fonte: Acervo do autor.

A ideia por trás da seleção por torneio implementada na metaheurística foi selecionar as soluções que irão participar do processo de cruzamento e mutação. O importante nessa etapa de seleção foi garantir que a melhor resposta da geração atual, no caso, com menor valor da *fitness*, não se perca para a próxima geração. Logo a metaheurística só pode evoluir, e assim garantiu-se o chamado elitismo presente nesse tipo de seleção.

### 3.2.6. Operadores Genéticos

Com as melhores soluções selecionadas, o próximo passo consistiu em aplicar operadores genéticos nas mesmas para produzir novas soluções, diferentes das soluções originais, mas ainda pertencentes ao domínio.

Foram aplicados os dois principais operadores genéticos conforme citado em literatura da área, sendo eles o *cruzamento* e a *mutação*. O operador de *cruzamento* foi aplicado para que a partir de dois indivíduos sejam formados novos indivíduos. Já o operador *mutação* introduziu mudanças aleatórias em determinadas características dos indivíduos, sendo que os indivíduos produzidos por este operador não foram muito diferentes dos originais. No entanto a mutação reintroduz a diversidade genética de volta à população e auxilia o algoritmo a fugir de máximos ou mínimos locais segundo KONAK et al. (2006).

Para o operador *mutação* adotou-se a estratégia de criar uma perturbação para ser aplicada na operação matemática, responsável por “criar” um novo indivíduo, mas sempre garantindo que este novo indivíduo esteja dentro dos limites adotados no início do problema, conforme parte da codificação apresentada na Figura 3.7.

```
``New_Ind(i) = 0.05*beta*(LSup(i)-LInf(i))+Pai(i);``
```

**Figura 3.7: Parte do código responsável pelo operador mutação. Fonte: Acervo do autor.**

Para o operador *cruzamento* adotou-se a seguinte estratégia: a partir da escolha de três indivíduos, e somente após garantir que os mesmos não são iguais, efetua-se a operação matemática entre os três e a partir dessa apresenta-se um novo indivíduo. A operação matemática aplicada consistiu na diferença entre dois indivíduos, multiplicado por um fator randômico entre 0 e 1, e este resultado acrescido do terceiro indivíduo. Desta forma foi aplicado o conceito de cruzamento para “criar” um novo indivíduo, conforme parte da codificação em destaque na Figura 3.8.

```
"New_Ind(j) = Pai_3(j) + F*(Pai_1(j)-Pai_2(j));"
```

**Figura 3.8: Parte do código responsável pelo operador cruzamento. Fonte: Acervo do autor.**

Assim operadores genéticos foram aplicados ao AG, para que, em resumo, de posse da população original, com os indivíduos originais, seja aplicado a “mutação”, para “produzir”, ou “criar” novos indivíduos distintos dos originais, mas ainda dentro dos limites estabelecidos para o problema. Em sequência, esses novos indivíduos e os indivíduos originais foram “cruzados”, dando origem a novas gerações de indivíduos, ou seja, novas soluções possíveis de serem avaliadas para o problema. Observa-se que desta forma estão sendo criadas diferentes gerações, similar aos “pais”, “filhos” e assim sucessivamente. Logo foi possível ter várias gerações distintas de soluções para o problema, e para cada novo indivíduo, ou nova solução, a função *fitness* foi avaliada e a solução ranqueada.

### 3.2.7. Parâmetros de Configuração do AG

Apesar dos algoritmos genéticos resolverem os mais diversos tipos de problemas de otimização de forma eficaz, os AGs são sensíveis aos seus principais parâmetros de configuração, a saber: tamanho da população; número de gerações; taxa de cruzamento; e taxa de mutação (YANG et al., 2007).

Para a definição de valores para cada um dos parâmetros de configuração do AG citados anteriormente, foram considerados os valores recomendados, conforme literatura, de acordo Tabela 3.5.

**Tabela 3.5: Valores recomendados para parâmetros de configuração de um AG. Fonte: Acervo do autor.**

Parâmetro de configuração	Valores recomendados
População	50 e 100 indivíduos (MITCHELL, 1996).
Gerações	Deve ser determinado experimentalmente (YUN e GEN, 2003).
Cruzamentos	Entre 0 e 1, podendo citar 0,6 e 0,7 (MITCHELL, 1996; TANOMARU, 1995).
Mutação	Entre 0 e 1, podendo citar 0,01 e 0,1 (MITCHELL, 1996; e TANOMARU, 1995).

Destaca-se aqui que o critério de parada adotado para o algoritmo desenvolvido está relacionado a quantidade de respostas avaliadas, para dentre elas determinar a melhor. Assim são dois os parâmetros do AG associados ao critério de parada escolhido, a saber, número de indivíduos e número de gerações.

### 3.3.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ACPR - 35

Com a metaheurística implementada, foi desenvolvido um *scrip*, ou rotina computacional para automatizar toda a simulação a ser realizada. Sendo que esta relaciona alguns dos principais parâmetros de configuração do AG, no caso número de indivíduos, número de gerações e o número total de rodadas. A ideia do *scrip* foi que em cada “rodada” de avaliação, o AG trabalhe com o número de indivíduos e o número de gerações estipulados e encontre o melhor resultado para a *fitness* do problema, sendo essa solução guardada como resultado dessa rodada, repetindo o processo para o número total de rodadas definidas. Para as simulações foi adotado os seguintes valores para os parâmetros do *scrip*: 150, como número de indivíduos; 100, como número de gerações; e, 10, como número total de rodadas. Desta condição tem-se que o critério de parada do AG será após avaliar um total de cento e cinquenta mil (150000) indivíduos, ou 150000 soluções possíveis para o problema.

Assim foi realizada a simulação computacional de um ACPR com energia inicial de 5 MeV e energia final de 35 MeV, onde foi viabilizada a produção de radioisótopos, considerando o próton como partícula a ser acelerada. Destaca-se que os limites para as variáveis a serem adotadas pelo algoritmo seguem dados da Tabela 3.2.

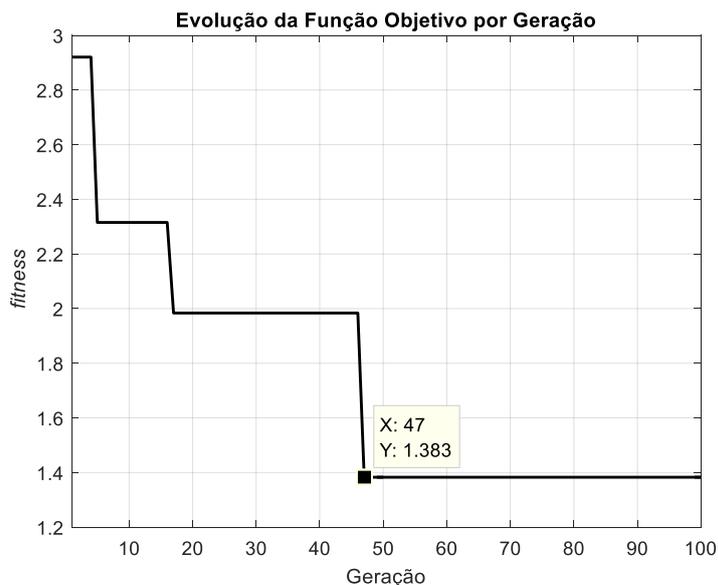
Na Tabela 3.6 são apresentadas as melhores soluções para as 10 rodadas avaliadas pelo AG. Cada uma das 10 linhas representam as melhores soluções para cada uma das rodadas avaliadas. Quanto à representação dos dados de saída, tem-se, a impressão das 4 variáveis, *ddp*, *B*, *Lcav*, *Rcav*, e do resultado da aptidão da mesma, isto é o valor da *fitness*.

Tabela 3.6: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. Fonte: Acervo do autor.

	ddp (kV)	B (T)	Lcav (m)	Rcav (m)	<i>fitness</i>
<b>Rodada 1</b>	341,6948	0,9920	0,1070	0,1957	1,4441
<b>Rodada 2</b>	288,4726	0,9482	0,2311	0,2615	1,4504
<b>Rodada 3</b>	315,8107	1,5869	0,1789	0,1960	1,5199
<b>Rodada 4</b>	380,7749	0,9536	0,1638	0,3149	1,4029
<b>Rodada 5</b>	330,7937	1,2094	0,2521	0,1840	1,5916
<b>Rodada 6</b>	351,2781	1,2363	0,1674	0,1499	1,3828
<b>Rodada 7</b>	268,1862	0,8773	0,1966	0,2289	1,4982
<b>Rodada 8</b>	256,7799	1,2478	0,2826	0,2543	1,7847
<b>Rodada 9</b>	335,2329	1,2028	0,3390	0,2137	1,5178
<b>Rodada 10</b>	181,2087	1,0091	0,3488	0,2722	1,7577

Observa-se que a melhor resposta determinada pelo AG ocorreu na sexta rodada, onde foi obtido o menor valor para a *fitness*, no caso, 1,3828. Para este caso específico, as frequências da partícula, assim como a de ressonância da cavidade cilíndrica foram respectivamente 15,6373 MHz e 776,2232 MHz. Sendo assim a frequência da partícula é múltipla da frequência de ressonância da cavidade cilíndrica por fator de 48,9996, o que viabiliza a inserção de múltiplas bolhas de partículas no equipamento, em número de 49.

A Figura 3.9 apresenta a evolução do resultado da função *fitness* ao longo das 100 gerações avaliadas, especificamente para a rodada que apresentou a melhor *fitness*. Verifica-se a importância de um número considerável de gerações, pois ao longo das mesmas o valor da *fitness* apresentou ajustes finos em seu comportamento, atingindo valor mínimo em gerações mais avançadas, nesse caso na geração de número 47.



**Figura 3.9:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta.

**Fonte:** Acervo do autor.

Ao proporcionar a otimização pelo algoritmo AG, no ACEL apresentado no capítulo anterior deste texto, tendo como variáveis de entrada a diferença de potencial, o campo magnético, o comprimento da cavidade ressonante assim como seu raio, a melhor resposta determinada pelo AG, foi:

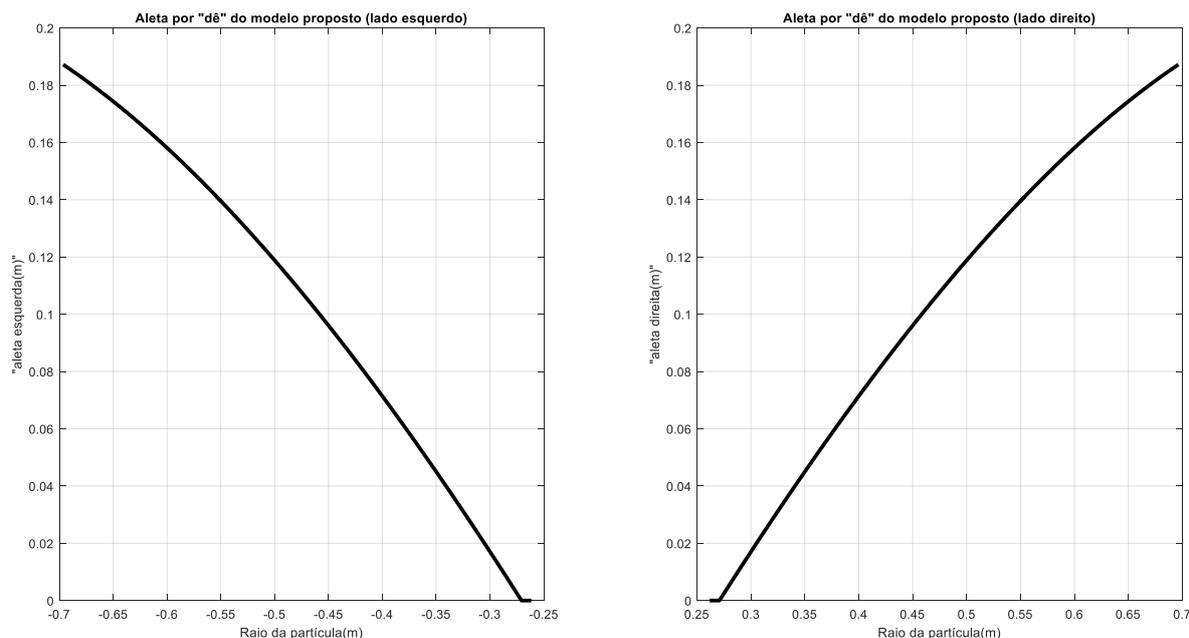
$$351,2781(\text{kV}) \quad 1,2363(\text{T}) \quad 0,1674(\text{m}) \quad 0,1499(\text{m})$$

Baseado nos parâmetros físicos otimizados, foram avaliados então as principais características para o modelo de ACPR - 35, obtido com auxílio do AG. Assim para a energia inicial de 5 MeV e energia final de 35 MeV, foram obtidas algumas características do equipamento conforme apresentado na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7:** Características do ACPR - 35. **Fonte:** Acervo do autor.

<b>ACPR - 35</b>	
Voltas no acelerador	85
Raio interno (m)	0,2617
Raio externo (m)	0,6929
<i>Gap</i> máximo da aleta (m)	0,3744
Frequência da cavidade de aceleração (MHz)	776,2232
Número de bolhas	48,9996
Período de sincronismo (s)	$6,395 \times 10^{-8}$

O perfil do comprimento das aletas por volta no equipamento é ilustrado na Figura 3.10. Trata-se do comprimento adicional por raio da partícula, este associado à órbita, seguindo o modelo do equipamento proposto (Figura 3.1). Assim, observa-se a representação da dimensão das aletas que devem ser inseridas em cada um dos “dês” do acelerador ACPR - 35 para garantia do sincronismo das partículas pelo equipamento.



**Figura 3.10: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPR - 35. Fonte: Acervo do autor.**

### 3.4.CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma metaheurística fundamentada em algoritmo genético, aplicado à seleção otimizada de um modelo de acelerador de partículas circular de prótons de 35 MeV produtor de radioisótopos, onde foi otimizado um conjunto de parâmetros de projeto do ACPR - 35.

Destaca-se o ineditismo de relacionar o conceito de projeto de aceleradores e partículas e otimização computacional, considerando a escassez de pesquisas e trabalhos publicados envolvendo os mesmos. Importante também mencionar que com a metaheurística apresentada tem-se maior liberdade para definição dos parâmetros do equipamento em questão, divergindo

de uma escolha arbitrária baseada em referências a outros equipamentos e subsistemas. Com a solução apresentada, foi gerada a possibilidade de seleção de parâmetros individualizados pelo tipo de aplicação do acelerador circular, sendo assim um diferencial importante.

Existe, desta forma, um grande potencial para projetar aceleradores de partículas circulares (AC) com cavidade cilíndrica ressonante (CR), dedicados a aplicações específicas baseando-se no algoritmo genético desenvolvido.

### 3.5.REFERÊNCIAS

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Cyclotron Parameters for C-11 Yield**. 4th INCC (International Nuclear Chemistry Congress), 2014.

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Análise Eletromagnética em Cavidade Cilíndrica Ressonante**. Revista Ciência e Tecnologia, RCT, UNISAL, v.19, n.34, 2016.

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Acelerador de Partículas Circular: Uma Análise Clássica e Relativística para o Ensino de Engenharias**. Revista Educação e Tecnologia, n.16, 2017.

CUNHA, Antônio Gaspar; TAKAHASHI, Ricardo; ANTUNES, Carlos Alberto Hengler de Carvalho. **Manual de computação evolutiva e metaheurística**. Coimbra: [s.n.]. ISBN 978-989-26-0583-8, 2012.

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2008. **Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice**. Vienna.

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2009. **Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods**. Vienna.

KONAK, A.; COIT, D. W.; SMITH, A. E. **Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial**. Reliability Engineering and System Safety, 2006.

LOPES, Heitor Silverio; RODRIGUES, Luiz Carlos de Abreu; STEINER, Maria Teresinha Arns. **Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional**. Publicado Maio de 2012. DOI: 10.7436/2013.mhpo.02. ISBN 978-85-64619-10-4.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional.** Rio de Janeiro, RJ: Editora Brasport, 2012.

MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms.** Cambridge, USA. MIT Press, 1996.

PHYSICS. Disponível em: (  
[www.pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator\\_option/3\\_RF\\_and\\_linear\\_acceleration.pdf](http://www.pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator_option/3_RF_and_linear_acceleration.pdf))  
Acesso em 03/02/2015.

SCHMOR, P. W.. **Review of Cyclotrons Used in the Production of Radioisotopes for Biomedical Applications.** Proceedings of Cyclotrons, Lanzhou, China, 2010.

TANIMARU, J. **Motivação fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos.** Anais do II Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Curitiba, PR, 1995.

YANG, T.; KUO, Y.; CHO, C. **A genetic algorithms simulation approach for the multi-attribute combinatorial dispatching decision problem.** European Journal of Operational Research, 2007.

YUN, Y.; e GEN, M. **Performance analysis of adaptive genetic algorithms with fuzzy logic and heuristics.** Fuzzy Optimization and Decision Making, 2003.

## CAPÍTULO 4

# PARÂMETROS FÍSICOS DE UM ACELERADOR CIRCULAR PARA TERAPIA DE PRÓTONS OBTIDOS POR ALGORITMO GENÉTICO

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta otimizada de aceleradores de partículas circulares para fins de terapia (ACPT) por feixe de prótons. A metodologia para seu desenvolvimento parte de conceitos fundamentais empregados na metaheurística desenvolvida no *software* Matlab® foram apresentados. Para obter parâmetros otimizados do equipamento foi empregada metaheurística computacional que tem por base algoritmos genéticos (AG). Foram considerados quatro parâmetros para a modelagem proposta para o equipamento, sendo eles: diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante. Como resultados foram apresentados parâmetros otimizados de acelerador de partículas circular (AC) empregado para fins de radioterapia ocular, assim como outro que viabilize teleterapia, respectivamente ACPT - 65 e ACPT - 250, obtidos por meio da metaheurística baseada em AG.

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Algoritmos Genéticos; Radioterapia.

### ABSTRACT

This paper brings to light optimized proposal for a circular particle accelerator for proton beam therapy purposes (named as ACPT). The methodology applied is based on, computational metaheuristics based on genetic algorithms (GA) were used to obtain optimized parameters of the equipment. Some fundamental concepts in the metaheuristics developed in Matlab® software will be presented. Four parameters were considered for the proposed modeling for the equipment, being: potential difference, magnetic field, length and radius of the resonant cavity. As result, this article showed, optimized parameters of circular particle accelerator (AC) used for ocular radiation therapy, as well some parameters that will allow teletherapy, called in order ACPT - 65 and ACPT - 250, obtained through metaheuristics based in GA.

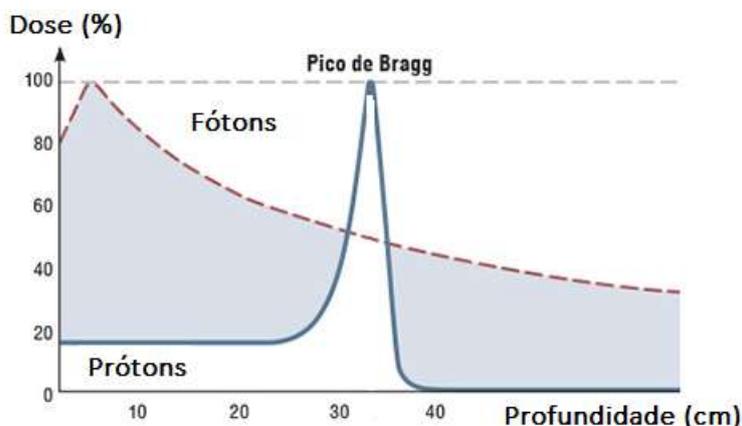
**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Genetic Algorithm; Radiation Therapy.

## 4.1. INTRODUÇÃO

### 4.1.1. Considerações sobre a Terapia de Prótons

Os prótons, assim como os íons pesados, interagem de forma distinta com a matéria ao serem comparados com a radiação eletromagnética, como Raios X e Raios Gama. A intensidade do feixe decai de forma exponencial com a profundidade para a radiação eletromagnética, e desta forma não possui um grande alcance (WIESZCZYKA e SCHARF, 2001). Em oposição ao feixe de prótons, conforme apresentado pela Figura 4.1 de

MAGALLANES E FERNÁNDEZ (2015) com as curvas de deposição de energia por um feixe de fótons e de prótons.



**Figura 4.1: Representação da deposição de energia de feixe de fótons e de prótons. Fonte: Modificada de MAGALLANES E FERNÁNDEZ, 2015.**

WIESZCZYKA e SCHARF (2001) citam que o emprego da terapia por feixe de prótons apresenta vantagem frente aos feixes de Raios X e Raios Gama, pois os prótons apresentam superior deposição de energia ionizante em profundidade com reduzido espalhamento lateral, ao contrário dos fótons, e assim agredem menos os tecidos sadios posteriores e anteriores ao tumor.

No deslocamento da partícula carregada através da matéria, ela ioniza átomos do material e deposita parte de sua energia na forma de dose absorvida ao longo do seu trajeto, sendo que o Pico de Bragg, em destaque também na Figura 4.1, ocorre antes da partícula atingir o repouso. Nessa região, os prótons perdem a maior parte de sua energia cinética e conseqüentemente sua velocidade se reduz a zero, fruto de interação coulombiana com os elétrons e também com os núcleos dos átomos do material (TURNER, 1992). Outra característica evidenciada pela Figura 4.1 está na distribuição de dose praticamente constante em profundidades iniciais, sendo essa dose com valor aproximado de 20% a 30% da dose máxima segundo informado por NIFENECKER (1999). Cita-se ainda que a deflexão da curva de dose em profundidade dos prótons é muito pequena no início, ao ser comparada com a curva de elétrons, principalmente devido a diferença de massa das duas partículas, de acordo com WIESZCZYKA e SCHARF (2001). A ocorrência do Pico de Bragg está relacionada com a seção de choque de interação com o próton que aumenta à medida que a energia e a velocidade das partículas diminuem, fato verificado ao final do percurso da partícula segundo trabalho de

LOMAX (2003). Assim para aplicação em radioterapia os prótons usualmente são acelerados a energias suficientes para que na região do tumor, esteja presente o Pico de Bragg.

#### 4.1.2. Considerações sobre os Aceleradores Circulares

Os aceleradores de partículas circulares são equipamentos de grande importância para a radioterapia, uma vez que por meio destes tem-se a possibilidade de aplicações orientadas de feixes de partículas aceleradas para fins de tratamento oncológico.

Data dos anos de 1950 as primeiras experimentações clínicas em terapia por prótons, mais precisamente em 1954 em Berkeley nos Estados Unidos, e em 1957 em Uppsala, Suécia. Após esses experimentos, observou-se um crescente número de ambientes construídos para atender a tratamentos radioterápicos com prótons. É importante mencionar o advento da tomografia computadorizada nos anos de 1970, onde grandes avanços em imagiologia médica, com a discriminação anatômica e a identificação precisa dos tumores, favoreceu o emprego da radioterapia por prótons para tratar diversos tumores (WIESZCZYKA e SCHARF, 2001).

A partícula acelerada pelo acelerador de partículas circular, com determinada energia cinética, tem sido a base para a radioterapia por prótons (ERNEST LAWRENCE, 2017). Assim é necessário a produção de feixe de partículas com energia cinética suficiente para penetração nos órgãos acometidos pelo câncer. Desta forma, é de extrema importância o ajuste dos parâmetros de um acelerador de partículas circular, para entregar um feixe com as características necessárias para ter a adequada penetração e depositar energia necessária no tumor.

Logo, para busca da melhor composição de determinados parâmetros do acelerador de partículas circular, foi desenvolvida uma metaheurística, implementada no *software* Matlab®, e fundamentada em algoritmos genéticos (AG), gerando como resultado parâmetros como, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante, conforme apresentado no capítulo anterior deste documento. Neste trabalho a mesma metodologia será aplicada para obter parâmetros essenciais otimizados e assim modelar aceleradores de partículas circular para terapia por feixe de prótons, ACPT.

## 4.2. DESENSOLVIMENTO DO *SOFTWARE* AG - ACPT

### 4.2.1. Terapia

Neste trabalho adotou-se como energia final do feixe de prótons dois valores distintos, conforme apresentados na Tabela 4.1. Este valor está relacionado com a energia cujo feixe de prótons penetre e cubra adequadamente a região anatômica alvo com a dose prescrita no tratamento.

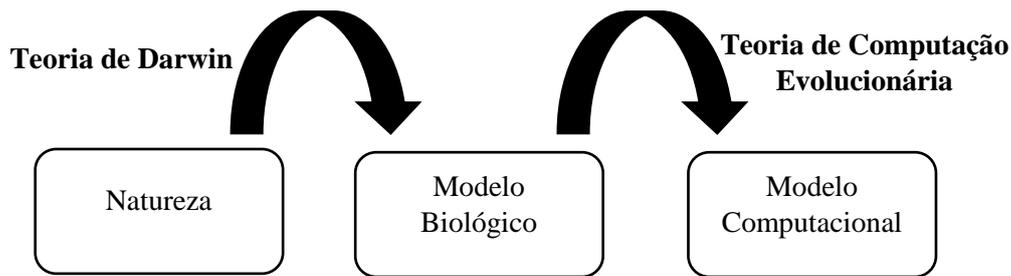
**Tabela 4.1: Energias avaliadas nesse trabalho, para terapia ocular e do tórax. Fonte: Acervo do autor.**

<b>Domínio</b>	<b>Energia</b>
Terapia Ocular	5 a 65 MeV
Terapia de Corpo	5 a 250 MeV

### 4.2.2. Algoritmo Genético (AG)

Os algoritmos genéticos possivelmente são uma das principais técnicas empregadas na área da computação evolutiva. A origem dos AG data dos anos 60, mais especificamente fruto do trabalho em algoritmos probabilísticos do professor da Universidade de Michigan, John Holland. Tais trabalhos culminaram com a publicação em 1975 do livro “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, que apresentavam um escopo de atuação para os AG mais amplo do que a pura e simples otimização. Já nos anos 80, citam-se trabalhos de David Goldberg, com o emprego dos AG na solução de problemas de otimização, com destaque para o livro “*Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*”.

Assim, hoje os AG tratam-se de metaheurísticas, que fazem parte da área da computação evolutiva, sendo aplicadas na resolução de diversos tipos de problemas de otimização, e inspirados no mecanismo de evolução das espécies, conforme resumidamente apresentado pela Figura 4.2.



**Figura 4.2: Representação do desenvolvimento dos algoritmos genéticos. Fonte: Acervo do autor.**

Um pseudocódigo de um algoritmo genético genérico é representado na Figura 4.3. Destaca-se que a metaheurística, desenvolvida e validada conforme apresentado no capítulo três deste documento, é aplicada neste momento para se gerar valores otimizados para parâmetros dos aceleradores de partículas circulares propostos para fins de terapia por feixe de prótons.

**Procedimento AG**

```

1   $t \leftarrow 0$ ;
2  Gere a população inicial  $P(t)$ ;
3  Avalie  $P(t)$ ;
4  enquanto (os critérios de parada não estiverem satisfeitos) faça
5       $t \leftarrow t + 1$ ;
6      Gere  $P(t)$  a partir de  $P(t - 1)$ ;
7      Avalie  $P(t)$ ;
8      Defina a população sobrevivente;
9  fim enquanto;
fim AG;
```

**Figura 4.3: Pseudocódigo de um algoritmo genético. Fonte: Modificado de SOUZA, 2005.**

Os principais tópicos associados ao desenvolvimento de AG, conforme apresentado na Figura 4.3, são descritos a seguir.

#### 4.2.2.1. População

A população de um AG refere-se ao conjunto de indivíduos que serão avaliados como possível solução do problema, da mesma forma que serão usados para criar o novo conjunto de indivíduos para análise.

O tamanho da população pode afetar o desempenho global e a eficiência dos algoritmos genéticos. Populações muito pequenas têm grandes chances de perder a diversidade necessária para convergir a uma boa solução, pois fornecem uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Entretanto, se a população tiver muitos indivíduos, o algoritmo poderá perder grande parte de sua eficiência pela demora em avaliar a função de aptidão de todo o conjunto a cada iteração (HOLLAND, 1975; CARUANA, 1988; e CUNHA, 2012).

#### 4.2.2.2. Função Objetivo ou *fitness*

Através de uma determinada função objetivo, de aptidão ou *fitness*, é especificado o valor de aptidão de cada indivíduo da população. É um dos componentes mais importantes de qualquer AG, uma vez que é por meio dela que se quantifica quão próximo um indivíduo está da solução desejada ou quão boa é cada solução. Logo é fundamental que esta função seja representativa e diferencie em proporção adequada boas e más soluções. Caso a precisão na avaliação não seja adequada, uma ótima solução pode ser descartada no decorrer da execução do algoritmo, além de poder demandar mais tempo para explorar soluções pouco promissoras (MITCHELL, 1997).

A função de avaliação da população, ou *fitness*, foi apresentada no capítulo anterior, conforme presente na Figura 3.5. Destaca-se que a mesma possui sete termos, sendo quatro deles associados ao comportamento da partícula por órbita no equipamento, e outros três termos associados com restrições para garantia de respostas dentro de intervalo válido para o problema. Importante citar que o desenvolvimento desta *fitness* partiu do conhecimento adquirido do modelo de equipamento proposto.

#### 4.2.2.3. Seleção da População

A partir de uma população onde para cada indivíduo foi atribuído um valor de aptidão, foi proposto método para selecionar os indivíduos sobre os quais serão aplicados os operadores genéticos. Entre as diversas formas ou técnicas de seleção, são de relevância os métodos de seleção por Roleta e por Torneio de acordo com MITCHELL (1997).

Na seleção por Roleta, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, para indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da área da roleta; enquanto, para os indivíduos de aptidão mais baixa, é dada

uma porção relativamente menor. Neste método, um dos problemas identificados está associado ao tempo de processamento, já que o método exige duas passagens por todos os indivíduos da população (BANZHAF, 1998).

Já na seleção por Torneio, tem-se um número “n” de indivíduos da população escolhido aleatoriamente para formar uma subpopulação temporária. Deste grupo, o indivíduo selecionado dependerá de uma probabilidade “k” definida previamente. Este método é comumente o mais empregado, pela vantagem de não exigir que a comparação seja feita entre todos os indivíduos da população (BANZHAF, 1998).

#### 4.2.2.4. Operadores Genéticos

A busca por um resultado satisfatório, por meio da transformação da população através de sucessivas gerações só é viável pelos operadores genéticos, responsáveis pelo processo de transformação da população. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique, mas ao mesmo tempo mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Destacam-se em AG os operadores de cruzamento, também conhecido por “*crossover*” ou recombinação e de mutação.

- Cruzamento: trata-se do operador genético predominante. Através do cruzamento são criados novos indivíduos misturando características de dois indivíduos "pais". Esta mistura é feita tentando imitar a reprodução de genes em células. Trechos das características de um indivíduo são trocados pelo trecho equivalente do outro. O resultado desta operação é um indivíduo que potencialmente combine as melhores características dos indivíduos usados como base (POZO, 2016).
- Mutação: esta operação modifica aleatoriamente alguma característica do indivíduo sobre o qual é aplicada. Esta troca é importante, pois acaba por criar novos valores de características que não existiam ou apareciam em pequena quantidade na população em análise. O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população. Desta forma, a mutação assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca possivelmente não será zero. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos através de uma taxa de mutação geralmente pequena (POZO, 2016).

#### 4.2.2.5. Parâmetros de Configuração do AG

A cada passo, um novo conjunto de indivíduos é gerado a partir da população anterior. “Geração” é a denominação para este novo conjunto. Observa-se que com grande quantidade de gerações é que bons resultados são obtidos por meio dos AG (POZO, 2016).

### 4.3.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACPT

A metaheurística implementada no capítulo anterior com foco em equipamento para fins de produção de radioisótopo, foi então aplicada considerando os parâmetros abaixo para equipamento ACPT:

- Número de indivíduos → 150;
- Número de gerações → 100;
- Número total de rodadas → 10.

Dois foram os ranges de energias avaliados, para atender ao prescrito na Tabela 4.1. Importante também citar que os limites para as variáveis a serem adotadas pelo algoritmo respeitam os empregados no capítulo anterior, destacados na Tabela 3.2.

#### 4.3.1. Terapia Ocular

A primeira simulação computacional realizada no AG - ACPT teve como dados de entrada, energia inicial de 5 MeV, energia final de 65 MeV, e próton como partícula a ser acelerada.

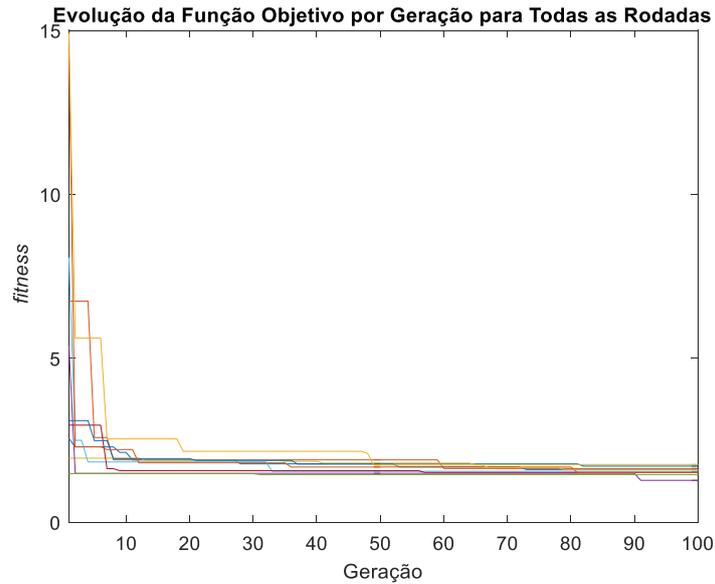
Assim na Tabela 4.2 são apresentadas as melhores soluções para as 10 rodadas avaliadas pela rotina computacional. Cada uma das 10 linhas representam as melhores soluções para cada uma das rodadas avaliadas. Quanto às colunas, tem-se, a representação dos quatros parâmetros: ddp, B, Lcav, Rcav, e por último do valor da função *fitness*.

Tabela 4.2: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. Fonte: Acervo do autor.

	Diferença de Potencial (kV)	Campo Magnético (T)	Comprimento da Cavidade Ressonante (m)	Raio da Cavidade Ressonante (m)	<i>fitness</i>
<b>Rodada 1</b>	327,7206	0,8004	0,4076	0,3453	1,7095
<b>Rodada 2</b>	277,4367	1,6459	0,2223	0,1596	1,6358
<b>Rodada 3</b>	195,7065	0,7149	0,3010	0,2978	1,7591
<b>Rodada 4</b>	369,8364	1,1601	0,1002	0,2073	1,2755
<b>Rodada 5</b>	338,4495	0,9905	0,1671	0,2607	1,4484
<b>Rodada 6</b>	291,2818	1,8977	0,2736	0,1497	1,5515
<b>Rodada 7</b>	327,1671	0,7709	0,1728	0,2917	1,5170
<b>Rodada 8</b>	257,4707	0,6675	0,2133	0,3911	1,6057
<b>Rodada 9</b>	227,5528	1,3531	0,1115	0,2138	1,5156
<b>Rodada 10</b>	300,0718	0,7076	0,1788	0,2355	1,5980

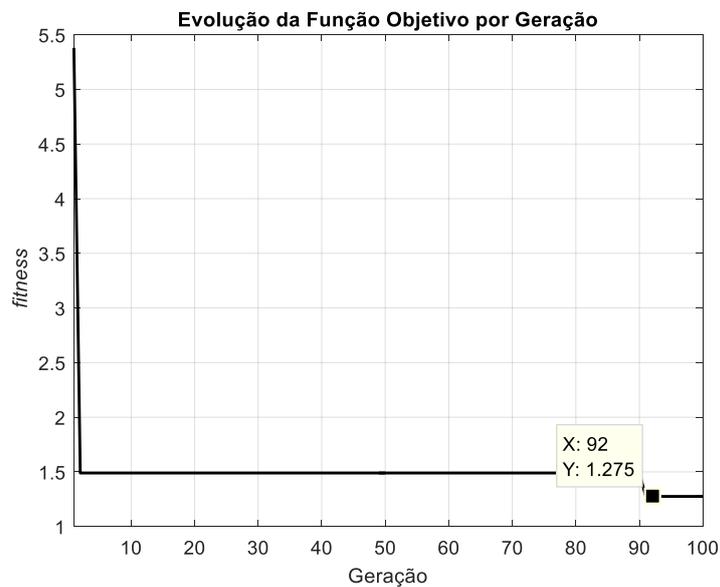
A melhor composição de parâmetros apresentada pelo AG - ACPT ocorreu na rodada de número 4, com valor da *fitness* de 1,2755. Ainda para esta rodada outras características importantes apresentadas pelo algoritmo foram a frequência da partícula, de 15,8239 MHz, assim como a frequência de ressonância da cavidade cilíndrica de 553,8359 MHz. Por ambas frequências serem múltiplas, por um fator de 35,0000, pode-se viabilizar a presença de 35 múltiplas bolhas de partículas no equipamento.

A evolução da função *fitness* ao longo das 100 gerações avaliadas, para todas as rodadas, é apresentada na Figura 4.4. Pode-se verificar que para as gerações iniciais as *fitness* apresentam valor superior à cinco, fruto das restrições impostas à função objetivo. Mas no decorrer do processo de desenvolvimento das gerações, tem-se redução do valor da *fitness*.



**Figura 4.4:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para todas as rodadas. Fonte: Acervo do autor.

Segue-se na Figura 4.5 a evolução da *fitness* para a melhor condição apresentada pelo AG - ACPT. Verifica-se que a melhor resposta ocorreu na geração de número 92.



**Figura 4.5:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. Fonte: Acervo do autor.

Os valores apresentados como melhor resposta pelo AG - ACPT, seguem destacados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3: Melhor resposta para os parâmetros para o acelerador circular de partículas de acordo com a metaheurística ACPT - 65. Fonte: Acervo do autor.**

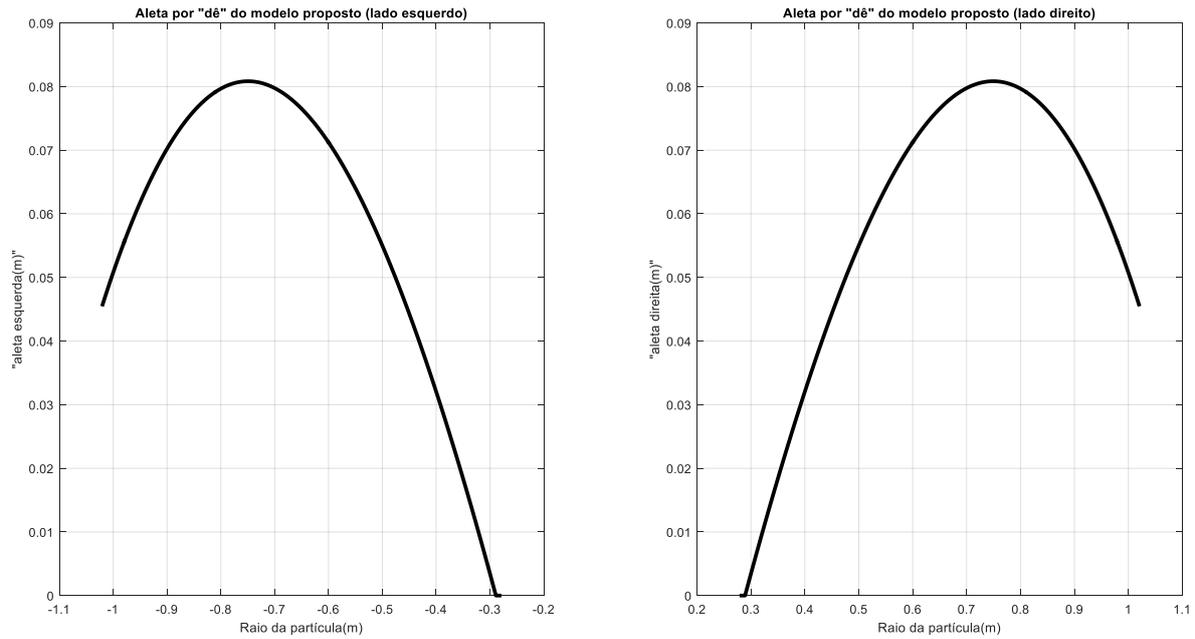
Diferença de Potencial (kV)	369,8364
Campo Magnético (T)	1,1601
Comprimento da Cavidade Ressonante (m)	0,1002
Raio da Cavidade Ressonante (m)	0,2073

Baseado nos parâmetros físicos otimizados, foram avaliados então as principais características para o modelo de ACPT - 65 obtido com auxílio do AG, como segue presente na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4: Características do ACPT - 65. Fonte: Acervo do autor.**

<b>ACPT - 65</b>	
Voltas no acelerador	162
Raio interno (m)	0,2789
Raio externo (m)	1,0207
<i>Gap</i> máximo da aleta (m)	0,1616
Frequencia da cavidade de aceleração (MHz)	553,8359
Número de bolhas	35
Período de sincronismo (s)	$6,320 \times 10^{-8}$

Na Figura 4.6 representa-se o comportamento da dimensão das aletas por raio da partícula, sendo este associado com a volta da mesma, a serem inseridas em cada um dos “dês” do equipamento proposto para atendimento da energia final de 65 MeV, com objetivo de prover sincronismo de tempo entre às órbitas.



**Figura 4.6: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPT - 65. Fonte: Acervo do autor.**

### 4.3.2. Terapia de Tórax

Para esta segunda simulação o valor de energia inicial do próton foi mantido em 5 MeV, porém a energia final, foi de 250 MeV, conforme Tabela 4.1, para atender à próton terapia de tórax.

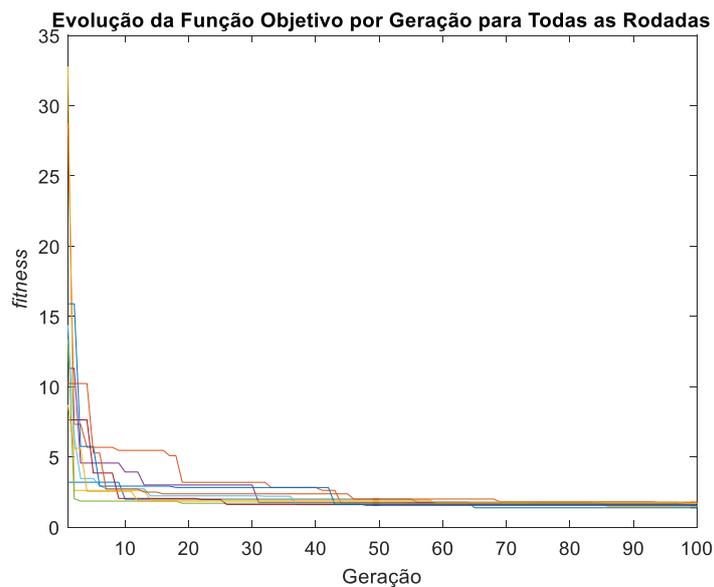
A Tabela 4.5 apresenta as melhores soluções para as 10 rodadas avaliadas pela rotina computacional. Mais uma vez cada uma das 10 linhas representam as melhores soluções para cada uma das rodadas avaliadas. Quanto às colunas, tem-se, a representação das 4 variáveis, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante, e por último do valor da função *fitness*.

Tabela 4.5: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. Fonte: Acervo do autor.

	Diferença de Potencial (kV)	Campo Magnético (T)	Comprimento da Cavityde Ressonante (m)	Raio da Cavityde Ressonante (m)	<i>Fitness</i>
<b>Rodada 1</b>	339,9669	1,7060	0,2102	0,1356	1,3784
<b>Rodada 2</b>	311,4621	1,6009	0,2544	0,1531	1,5546
<b>Rodada 3</b>	393,8205	0,9969	0,3835	0,2594	1,4764
<b>Rodada 4</b>	243,0381	1,8047	0,2698	0,1714	1,7166
<b>Rodada 5</b>	379,7419	1,2031	0,4028	0,2491	1,6641
<b>Rodada 6</b>	350,5658	0,7976	0,4218	0,2564	1,5278
<b>Rodada 7</b>	255,2408	1,2156	0,3532	0,2592	1,6163
<b>Rodada 8</b>	273,5545	0,9739	0,3823	0,2936	1,5508
<b>Rodada 9</b>	245,2390	1,5359	0,3011	0,2039	1,7756
<b>Rodada 10</b>	350,0889	2,2994	0,1892	0,1061	1,6990

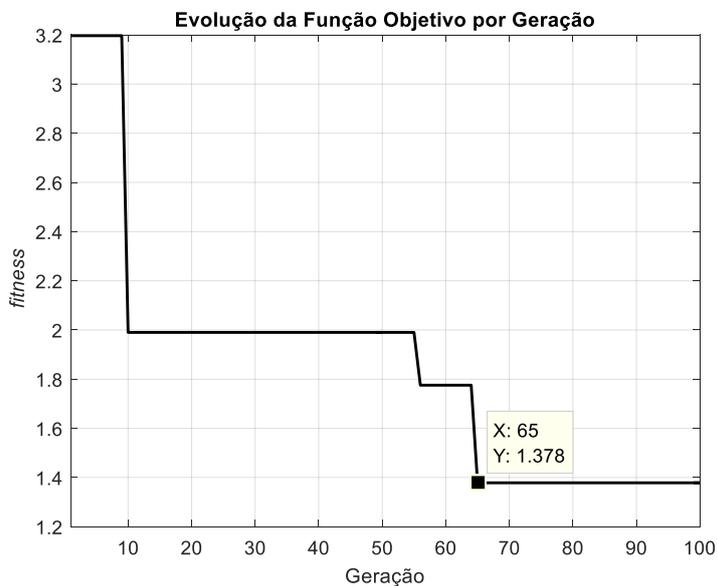
Segundo resultado obtido pelo AG - ACPT, a melhor *fitness* teve valor de 1,3784, e ocorreu na primeira rodada. Para os parâmetros apresentados nesta rodada citam-se a frequência da partícula, de 19,2392 MHz, e a frequência de ressonância da cavidade cilíndrica, de 846,5230 MHz. Mais uma vez viabiliza-se a presença de bolhas no equipamento uma vez que as frequências são múltiplas por um fator de 43,9999.

Já a evolução do resultado da função *fitness* ao longo das 100 gerações avaliadas, para todas as rodadas, é apresentada na Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para todas as rodadas. Fonte: Acervo do autor.

Na Figura 4.7 está representada a evolução da *fitness* para a melhor condição apresentada pelo AG-ACPT. Verifica-se que a melhor resposta ocorreu na geração de número 65 conforme destacado na mesma figura, tal condição ocorreu na rodada de número 1 conforme Tabela 4.5.



**Figura 4.8:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta. Fonte: Acervo do autor.

Os parâmetros da primeira rodada, apresentados como melhor resposta pelo AG - ACPT, seguem destacados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6: Melhor resposta para os parâmetros para o acelerador circular de partículas de acordo com a metaheurística ACPT - 250. Fonte: Acervo do autor.**

Diferença de Potencial (kV)	339,9669
Campo Magnético (T)	1,7060
Comprimento da Cavidade Ressonante (m)	0,2102
Raio da Cavidade Ressonante (m)	0,1356

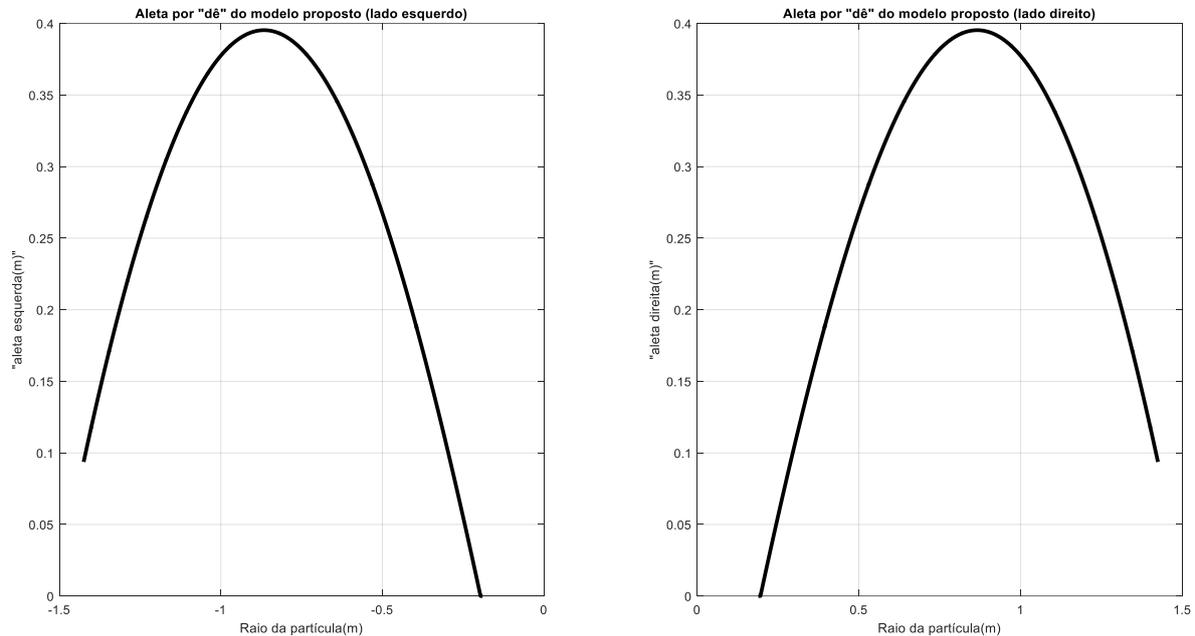
Foram encontradas então algumas importantes características para o modelo de ACPT-250, obtido com auxílio do AG, como apresentado na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7: Características do ACPT - 250. Fonte: Acervo do autor.**

<b>ACPR - 250</b>	
Voltas no acelerador	720
Raio interno (m)	0,1896
Raio externo (m)	1,4248
Gap máximo da aleta (m)	0,7906
Frequencia da cavidade de aceleração (MHz)	846,5230
Número de bolhas	43,9999
Período de sincronismo (s)	$5,198 \times 10^{-8}$

Fato importante a ser citado está na comparação com parâmetros do ciclotron supercondutor acelerador de prótons de 250 MeV, baseado no projeto NSCL (*National Superconducting Cyclotron Laboratory*) onde o mesmo trabalha com campo magnético na ordem de 4 T, proveniente de sistema de bobinas supercondutoras. Além disso para atingir a energia final são necessárias 650 voltas da partícula pelo equipamento, conforme informações presente em trabalho de RABELO (2016). Observa-se que o resultado proposto neste trabalho que não envolve sistema supercondutor, apresenta nível de campo magnético bem inferior, e desta forma de menor complexidade de controle.

Representa-se então na Figura 4.9 comportamento das dimensões das aletas, por raio da partícula, a serem inseridas em cada um dos “dês”, direito e esquerdo do equipamento proposto, ACPT - 250.



**Figura 4.9: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda, por raio da partícula no ACPT - 250. Fonte: Acervo do autor.**

#### 4.4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta a aplicação de metaheurística fundamentada em algoritmo genético, proposto no capítulo três deste documento, para proposição de parâmetros otimizados para modelo de acelerador circular de partículas para fins de radioterapia por feixe de prótons, dito ACPT. É importante enfatizar a proposta de dois equipamentos distintos, um com foco em terapia ocular, ACPT - 65, e o outro para terapia de tórax, ACPT - 250.

É importante também citar que poucos são os trabalhos que relacionam o tópico aceleradores de partículas circulares e algoritmos genéticos, ou mesmo computação evolutiva, assim este trabalho se destaca por este uso de AG. Ao tomar por base trabalhos como MURKHERJEE (2000) e TIAN, SAFRANEK e YAN (2014), verifica-se a potencialidade de pesquisas na aplicação de algoritmos evolucionários na área nuclear, mais especificamente para

aceleradores de partículas, fruto do recente desenvolvimento dos algoritmos genéticos. Porém observa-se também que se tratam de pesquisas para itens específicos presentes em aceleradores de partículas. Dentro deste contexto, considera-se esse trabalho pioneiro no aspecto de apresentar valores para alguns parâmetros de um acelerador de partículas circular, e seu projeto ser resultado direto da aplicação de otimização computacional, mais precisamente por meio de algoritmos genéticos.

O desenvolvimento da função objetivo que melhor represente o problema, assim como o emprego de restrições a mesma são importantes questões que envolveram este trabalho. Enfatiza-se também a importância no emprego e análise de várias gerações para ambas simulações computacionais, pois ficou evidente a evolução do comportamento do AG em busca da melhor solução, evoluindo geração a geração para tal. Destaca-se, pelo critério de parada adotado para o AG – ACPT, que um total de cento e cinquenta mil soluções, para cada uma das duas simulações realizadas, foram avaliadas. Por fim acredita-se que o AG - ACPT tem grande potencial, por apresentar como resultado parâmetros específicos para cada acelerador de partículas circular, dependente do seu domínio funcional, associado ao seu nível energético.

#### 4.5.REFERÊNCIAS

BANZHAF, W; NORDIN, P.; KELLER, R. E. & FRANCONI, F. D. **Genetic Programming: an introduction**. ISBN 155860510X. Morgan Kaufmann, 1998.

CARUANA, R. A.; SCHAFFER, J. D. **Representation and hidden bias: Gry vs. binary coding for genetic algorithms**. In: Proceedings INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 5, 1988. Morgan Kaufmann, 1988.

CUNHA, Antônio Gaspar; TAKAHASHI, Ricardo; ANTUNES, Carlos Alberto Hengler de Carvalho. **Manual de computação evolutiva e metaheurística**. Coimbra: [s.n.]. ISBN 978-989-26-0583-8, 2012.

ERNEST LAWRENCE. **Ernest Lawrence's Cyclotron**, 2017. Disponível em: (<http://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/early-years.html>).

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. University of Michigan Press,

1975. ISBN 9780472084609. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=JE5RAAAAMAAJ>).

LOMAX, T. **An Overview of Compensated and Intensity Modulated Proton Therapy**. PSI – PROSCAN. AAPM Summer School, Colorado Springs, 7 p. 2003 Disponível em: [www.aapm.org/meetings/03SS/.../Lomax.pdf](http://www.aapm.org/meetings/03SS/.../Lomax.pdf)). Acesso em: 10 de Dezembro 2016.

MAGALLANES, L. Hernández; FERNÁNDEZ, A. Téllez. **Radioterapia con protones: la dosis precisa, ni más, ni menos**. Elementos 99 (2015) 3-9. <http://www.elementos.buap.mx/num99/pdf/3.pdf>). Acesso em 09 de Dezembro 2016.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit Press. 1997. 207 p.

MUKHERJEE, Bhaskar. **Optimisation of the Radiation Shielding of Medical Cyclotrons using a Genetic Algorithm**. Japan Health Physics Society, Tokyo (Japan); 1 v; May 2000; [11 p.]; IRPA-10: 10. International Congress of the International Radiation Protection Association; Hiroshima (Japan); 14-19 May 2000.

NIFENECKER, H. et al. **Hybrid Nuclear Reactors**. Progress in Particle and Nuclear Physics, 1999, p. 683-827.

POZO, Aurora; CAVALHEIRO, Andrea de Fatima; ISHIDA, Celso; SPINOSA, Eduardo; RODRIGUES, Ernesto Malta. **Computação evolutiva**. Apostila do Departamento de Informática da Universidade Federal do Paraná, 2016. Disponível em: <http://www.inf.ufpr.br/aurora/tutoriais/Ceapostila.pdf>).

RABELO, Luísa de Araújo. **Projeto Eletromagnético de um Pós-Acelerador de Prótons para Tratamento de Tumor Ocular**. Tese de Doutorado em Engenharia Nuclear na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Julho de 2016.

SOUZA, Marcone Jamilson Freitas. **Inteligência computacional para otimização**. Notas de aula da disciplina Inteligência computacional para otimização, 2005/1, da Universidade Federal de Ouro Preto.

TIAN, K.; SAFRANEK, Y.; YAN, Y. **Machine Based Optimization Using Genetic Algorithms in a Storage Ring**. Physical Review Accelerators and Beams 17, 020703 – Published 18 February 2014.

TURNER, S. Accelerator School. **Fifth General Accelerator Physics Course**. University of Jyväskylä, Finland, v. 1. Geneva, 1992.

WIESZCZYCKA, W; SCHARF, W. H. **Proton Radiotherapy Accelerators**. World Scientific Publishing. 2001, 323 p.

## CAPÍTULO 5

# ACELERADOR CIRCULAR DE PRÓTONS OTIMIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO PARA PRODUÇÃO DE C-11

### RESUMO

O objetivo deste trabalho é a apresentação dos parâmetros otimizados para um acelerador de partículas circular (AC) dedicado à produção do radioisótopo carbono-11, C-11. Empregando algoritmo de computação evolutiva fundamentado em algoritmos genéticos (AG), desenvolvido e validado, foram obtidos parâmetros otimizados para modelagem de acelerador circular de prótons dedicado à produção de C-11, denominado ACC - 11. Foram apresentadas características importantes do radioisótopo carbono-11, assim como da metaheurística empregada para obter os parâmetros: diferença de potencial; campo magnético; comprimento e raio da cavidade ressonante, do ACC - 11. Como resultados os parâmetros otimizados para um modelo do ACC - 11 foram: diferença de potencial da estrutura de aceleração de 347,7041kV; campo magnético da estrutura de circulação de 1,3426T; comprimento e raio da cavidade ressonante de 0,1569m e 0,1883m respectivamente.

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Algoritmos Genéticos; Carbono-11.

### ABSTRACT

This article aims to present optimized parameters for a circular particle accelerator (AC), specific to produce carbon-11 radioisotope, C-11, which has a short short life, of the order of  $t_{1/2}=20.4$  min. So this work use an evolutionary computation algorithm based on genetic algorithm (GA), developed and validated by the authors, to obtained optimized parameters for modeling of circular particle accelerator dedicated to production C-11, named ACC - 11. It will present important characteristics of the radioisotope C-11, as well the metaheuristic used to obtain the parameters: potential difference; magnetic field; length and radius of the resonant cavity of ACC - 11. At the end, optimized parameters for a dedicated circular particle accelerator model for C-11 production were: 347,7041kV as potential difference; 1,3426T as magnetic field; 0,1569m and 0,1883, as length and radius of the resonant cavity.

**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Genetic Algorithm; Carbon-11.

## 5.1.INTRODUÇÃO

O radioisótopo carbono-11, C-11, com meia vida aproximada de 20 minutos ( $t_{1/2}=20,4$  min), juntamente com o F-18 são os principais radioisótopos empregados na atualidade para fins de diagnóstico por emissão de pósitron (SCHMOR, 2010). Porém, pela sua baixa meia-vida de decaimento, faz-se necessário que centro de produção deste radioisótopo seja instalado nas proximidades de onde será empregado.

É fato que a produção do carbono-11 está vinculada à entrega de uma determinada energia cinética à partícula precursora do processo, para aumentar a probabilidade de reação nuclear. Verifica-se então a importância do controle dos parâmetros de um acelerador de partículas circular, principal equipamento empregado para tal finalidade.

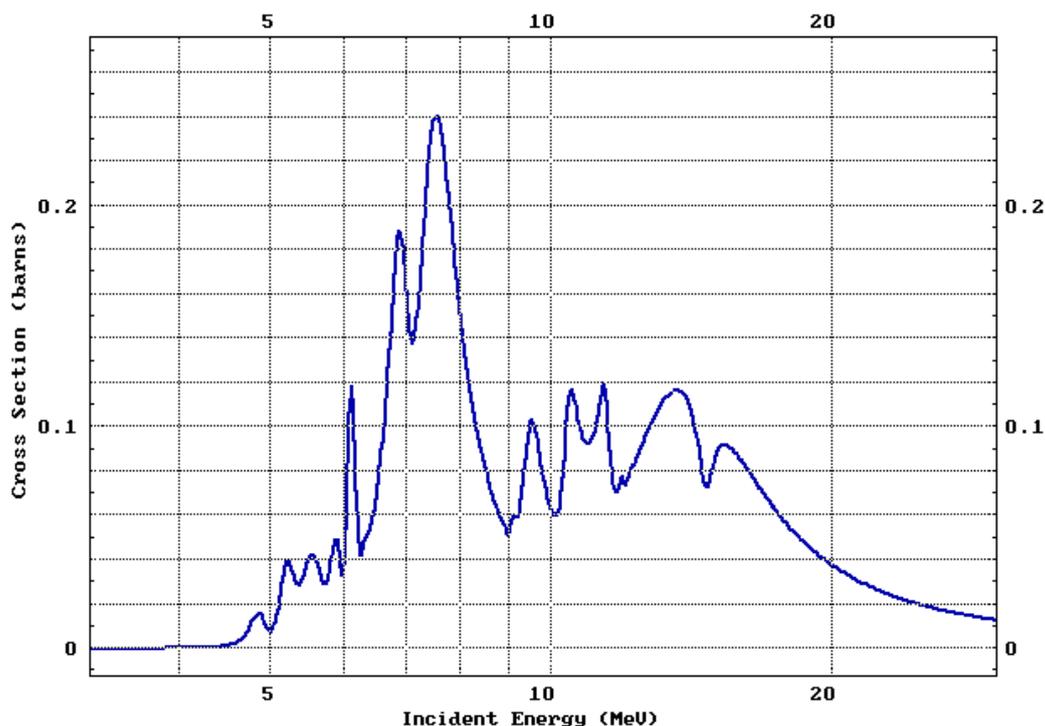
Neste contexto, este trabalho avalia alguns parâmetros de um acelerador de partículas circular com cavidade cilíndrica ressonante, como estrutura de aceleração, sendo estes obtidos por meio de algoritmo genético (AG) com rotina implementada no *software* Matlab®. A saber os parâmetros iniciais supracitados são, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante. Assim, como o foco é em equipamento dedicado para a produção de carbono-11, denominado de ACC - 11, o nível energético será para atendimento desta demanda.

## 5.2. DESENSOLVIMENTO

### 5.2.1. Reação para Produção do C-11

A principal reação vinculada à produção do radioisótopo carbono-11 em cíclotrons, ou aceleradores de partículas circulares, parte do nitrogênio-14 e envolve o próton como partícula precursora. A reação é  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ , resultando no carbono-11 e emissão de partícula alpha. O carbono-11, decai para boro-11, 99,8% das vezes por emissão de pósitron,  $\beta^+$ , com energia aproximada de 970keV, e 0,2% das vezes por meio de captura eletrônica (IAEA, 2009; CAMPOS e CAMPOS, 2015).

Como é de conhecimento as reações nucleares para produção de radioisótopos são probabilísticas, logo deve-se procurar viabilizar tal reação fornecendo ao alvo uma partícula com energia adequada, para assim aumentar as chances da reação requerida ocorrer. Na Figura 5.1, apresenta-se a seção de choque específica para a reação  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  para produção de C-11 (ENDF, 2014; CAMPOS e CAMPOS, 2015).



**Figura 5.1:** Função de excitação para a reação  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$ . Fonte: ENDF, 2014.

Pela análise da Figura 5.1 observa-se que a produção do C-11 pode ocorrer para prótons com faixa de energia na ordem de aproximadamente 5 MeV à 20 MeV, contudo a maior probabilidade para ocorrência dessa reação está para energias da ordem de 8MeV. Adotou-se energia inicial de 5 MeV para padronizar com nível energético empregado nas aplicações destacadas nos capítulos anteriores deste documento.

Há a necessidade de entregar a partícula precursora com uma energia superior à requerida pela reação, pois devem ser consideradas perdas de energias pelo feixe no alvo onde se encontrará o elemento base da reação. Destaca-se que pesquisas que tratam exclusivamente de alvos para aceleradores de partículas circulares são de grande relevância (BUCKLEY et. al., 2004; VANDEWALLE e VANDECASTEELE, 1983); VANDECASTEELE e STRIJCKMANS, 1984).

### 5.2.2. Metaheurística AG

A metaheurística empregada neste trabalho tem por objetivo apresentar parâmetros otimizados para modelagem inicial de um ACC - 11. A mesma, foi apresentada no capítulo três deste documento, conforme Figura 3.2, onde são ilustrados os parâmetros de entrada e saída. Observa-se que são três as entradas, energia inicial e final, assim como o tipo de partícula

precursora da reação desejada. Ao final do processamento computacional tem-se quatro saídas principais, ou quatro parâmetros otimizados para o AC, sendo eles, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da estrutura de aceleração.

A metaheurística fundamentada em AG, desenvolvida e validada pelos autores, trabalha na busca por solução para a qual a função *fitness* do problema tenha valor mínimo. Isso impacta em um modelo de equipamento com valores ditos ótimos para as variáveis: diferença de potencial do sistema de aceleração; campo magnético aplicado ao sistema de circulação; e dimensões da cavidade cilíndrica ressonante, sendo essa a estrutura de aceleração do modelo de equipamento proposto.

O AG segue a base dos conceitos dessa importante família de modelos computacionais, apresentada por HOLLAND (1975). Primeiramente o problema em questão, ou seja, a modelagem simplificada de um acelerador de partículas circular, é formalizada matematicamente, para então se desenvolver a função *fitness* ou objetivo que melhor representa o problema. Com a função *fitness* definida, incluindo suas restrições e penalidades, que evitam a apresentação de soluções inadequadas para o problema, passa-se para a estruturação do AG. A estruturação consiste em: i) geração da população inicial de forma aleatória; ii) avaliação da aptidão de cada indivíduo da população apresentada, de acordo com a *fitness* do problema; iii) seleção dos melhores indivíduos da população para, a partir destes, gerar nova população; iv) geração dessa nova população onde são aplicados os ditos, operadores genéticos de cruzamento e mutação; v) avaliação dos indivíduos dessa nova população; e vi) recomeço do ciclo até se atingir o critério de parada definido para o problema (MITCHELL, 1997).

### 5.3.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACC - 11

#### 5.3.1. Dados de Entrada e Configuração da Metaheurística

Para obter parâmetros otimizados para o ACC - 11, foram adotadas as seguintes entradas para a metaheurística: energia inicial de 5 MeV, energia final de 11 MeV, e próton como partícula a ser acelerada. Foram ainda empregados os seguintes parâmetros para o AG:

- Número de indivíduos → 150;
- Número de gerações → 100;
- Número total de rodadas → 10.

Os limites adotados para as variáveis são destacados na Tabela 5.1, e seguem os adotados nos capítulos anteriores.

**Tabela 5.1: Variáveis da função de geração da população. Fonte: Acervo do autor.**

Número de indivíduos – NI		150
Número de variáveis – NV		4
Limite inferior – Linf	ddp [kV]	100
	B [T]	0,5
	Lcav [m]	0,1
	Rcav [m]	0,1
Limite superior – Lsup	ddp [kV]	400
	B [T]	3
	Lcav [m]	0,6
	Rcav [m]	0,6

### 5.3.2. Parâmetros ACC - 11

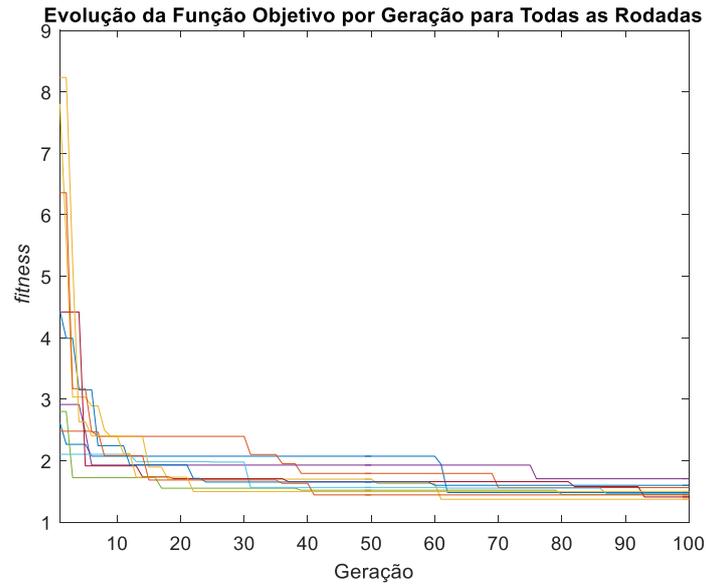
Na Tabela 5.2 tem-se as melhores soluções para as 10 rodadas avaliadas pela rotina computacional, onde cada um dos 10 conjuntos de valores (linhas) representam as melhores soluções para cada uma das rodadas avaliadas. Nas colunas, tem-se, a representação das quatro variáveis, diferença de potencial, campo magnético, comprimento e raio da cavidade ressonante, e por último do valor da *fitness*. Desta forma o melhor conjunto de parâmetros para o ACC - 11 será o que apresentar o menor valor na coluna *fitness*, conforme previamente citado neste texto.

Tabela 5.2: Melhores soluções para cada uma das 10 rodadas avaliadas. Fonte: Acervo do autor.

	Diferença de Potencial (kV)	Campo Magnético (T)	Comprimento da Cavityde Ressonante (m)	Raio da Cavityde Ressonante (m)	<i>fitness</i>
<b>Rodada 1</b>	364,7463	0,7595	0,1933	0,4063	1,4814
<b>Rodada 2</b>	355,5673	0,6843	0,2638	0,4637	1,5619
<b>Rodada 3</b>	347,7041	1,3436	0,1569	0,1883	1,3721
<b>Rodada 4</b>	270,4171	1,6452	0,2114	0,1537	1,7064
<b>Rodada 5</b>	354,0894	1,5283	0,4040	0,2076	1,4488
<b>Rodada 6</b>	345,7104	1,6851	0,1422	0,1843	1,4640
<b>Rodada 7</b>	336,8138	0,9719	0,1812	0,1381	1,4096
<b>Rodada 8</b>	323,7696	0,7699	0,3816	0,2575	1,5993
<b>Rodada 9</b>	379,2831	1,7601	0,2934	0,1692	1,4430
<b>Rodada 10</b>	331,5030	1,6262	0,1938	0,1238	1,4985

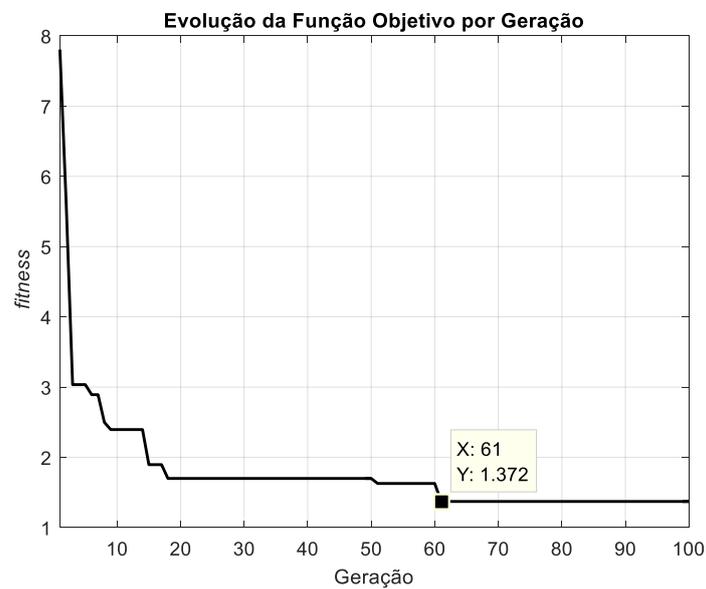
Segundo resultado obtido pelo AG, a melhor composição de parâmetros ocorreu na rodada de número 3 com *fitness* de 1,3721. Para os parâmetros apresentados nesta rodada destaca-se a frequência da partícula de 16,9412 MHz, e a frequência de ressonância da cavidade cilíndrica de 609,8833 MHz. Desta forma, pelo modelo adotado, viabiliza-se a presença de bolhas no equipamento uma vez que as frequências são múltiplas por um fator de 36,0000. Tal condição tem grande relevância no processo de produção de radioisótopos, dentre eles o C-11.

A metahuerística apresenta também a evolução do resultado da função *fitness* ao longo das 100 gerações avaliadas, para todas as rodadas, sendo este resultado apresentado na Figura 5.2.



**Figura 5.2:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para todas as rodadas. Fonte: Acervo do autor.

Especificamente para a melhor *fitness* apresentada pelo AG para o ACC - 11, segue resultado gráfico em destaque na Figura 5.3. Verifica-se que a melhor resposta ocorreu na geração de número 61.



**Figura 5.3:** Evolução da *fitness* ao longo das 100 gerações para a rodada que apresentou a melhor resposta.

Fonte: Acervo do autor.

Os parâmetros da terceira rodada, apresentados como melhor resposta pelo AG para o ACC - 11, seguem destacados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3: Melhor resposta para os parâmetros do ACC - 11 de acordo com o AG. Fonte: Acervo do autor.**

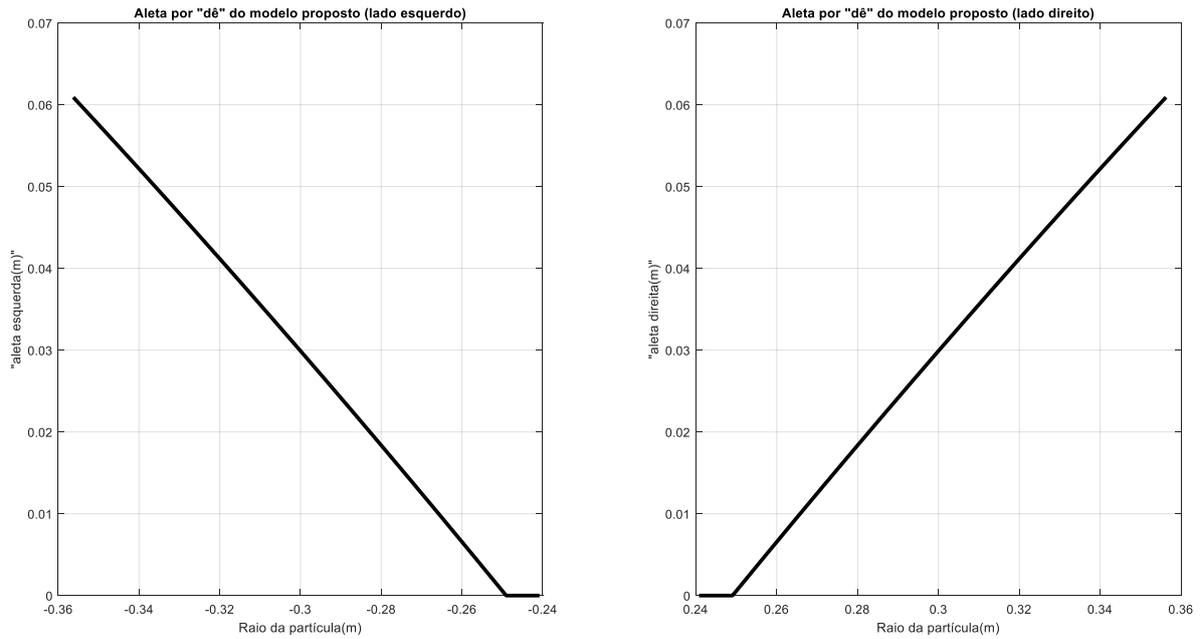
Diferença de Potencial (kV)	347,7041
Campo Magnético (T)	1,3426
Comprimento da Cavidade Ressonante (m)	0,1569
Raio da Cavidade Ressonante (m)	0,1883

Foram encontradas então algumas importantes características para o modelo de ACC - 11 obtido com auxílio do AG, conforme presente na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4: Características do ACC - 11. Fonte: Acervo do autor.**

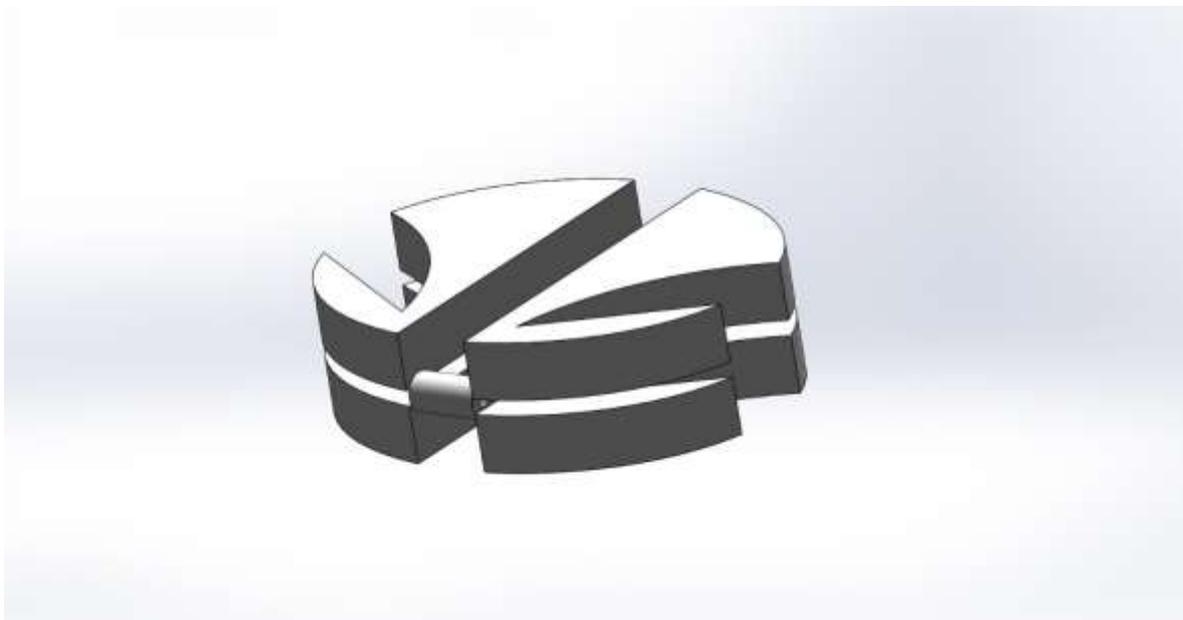
<b>ACC - 11</b>	
Voltas no acelerador	17
Raio interno (m)	0,2408
Raio externo (m)	0,3563
<i>Gap</i> máximo da aleta (m)	0,1218
Frequencia da cavidade de aceleração (MHz)	609,8833
Número de bolhas	36
Período de sincronismo (s)	$5,903 \times 10^{-8}$

Na Figura 5.4 representa-se o comportamento da dimensão das aletas a serem inseridas em cada um dos “dês” por raio da partícula no equipamento proposto, ACC - 11, com objetivo de prover sincronismo de tempo entre às órbitas, representando o modelo do equipamento apresentado na Figura 2.2 do capítulo dois deste texto.



**Figura 5.4: Representação do comportamento da dimensão de ambas aletas, direita e esquerda por raio da partícula no ACC - 11. Fonte: Acervo do autor.**

Já a Figura 5.5 apresenta uma visão do modelo do equipamento proposto, onde podem ser visualizadas as aletas, assim como a estrutura de aceleração.



**Figura 5.5: Vista angular representativa do modelo do equipamento. Fonte: Acervo do autor.**

## 5.4.CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi apresentar conjunto de parâmetros otimizados, obtidos por meio de metaheurística baseada em algoritmos genéticos, para um acelerador de partículas circular dedicado à produção do radioisótopo carbono-11, ACC - 11. Assim este trabalho envolveu o modelo de equipamento, assim como da metaheurística, ambos propostos pelos autores.

Destaca-se a importância do radioisótopo carbono-11 com grande potencial de aplicação na medicina nuclear, uma vez que tem por base elemento constituinte fundamental da matéria orgânica, o que implica em menores riscos médicos após sua aplicação e decaimento (IAEA, 2008). Contudo o emprego do carbono-11 encontra restrições devido à necessidade de sua produção estar alocada em região próxima aos centros médicos onde serão empregados, devido ao seu reduzido tempo de meia vida.

Este trabalho apresenta alguns parâmetros fundamentais para construção de um ACC - 11 obtidos por meio de metaheurística fundamentada em algoritmos genéticos. Outra relevância deste trabalho está no emprego de técnicas de computação evolutiva para modelagem e busca de solução otimizada na área de aceleradores de partículas e produção de radioisótopos, área que somente nos últimos anos vem sendo desenvolvida, mesmo com poucos trabalhos afins.

## 5.5.REFERÊNCIAS

BUCKLEY, Kenneth R.; JILVAN, Salma; RUTH, Thomas J. **Improved yields for the *in situ* production of [<sup>11</sup>C]CH<sub>4</sub> using a niobium target chamber.** Nuclear Medicine and Biology, 31 (2004) 825-827.

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Cyclotron Parameters for C-11 Yield.** 4th INCC (International Nuclear Chemistry Congress), 2014.

Evaluated Nuclear Data File (2014). Disponível em: <https://wwwnds.iaea.org/exfor/endl.htm>. Acesso em: 14 de Maio de 2014.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence.** University of Michigan Press,

1975. ISBN 9780472084609. Disponível em:  
(<https://books.google.com.br/books?id=JE5RAAAAMAAJ>).

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2008. **Cyclotron Produced Radionuclides: Principles and Practice**. Vienna.

IAEA, International Atomic Energy Agency, 2009. **Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods**. Vienna.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit Press. 1997. 207 p.

SCHMOR, P. W.. **Review of Cyclotrons Used in the Production of Radioisotopes for Biomedical Applications**. Proceedings of Cyclotrons, Lanzhou, China, 2010.

VANDECASTEELE, Carlo; STRIJCKMANS, Karel. **Targetry for the cyclotron production of short-lived radionuclides for medical use**. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A236 (1985) 558-562.

VANDEWALLE, T.; VANDECASTEELE, Carlo. **Optimisation of the production of  $^{11}\text{CO}_2$  by proton irradiation of nitrogen gas**. Int. J. Appl. Radiat. Isot. 34 (1983) 1459-1464.

## CAPÍTULO 6

# CONSIDERAÇÕES SOBRE O TEMPO DA PARTÍCULA NA CAVIDADE RESSONANTE DE UM ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR

### RESUMO

**Objetivo:** apresentar avaliação sobre comportamento do campo elétrico no interior da estrutura de aceleração do modelo de acelerador de partículas circular (AC) apresentado no capítulo dois desta tese. **Metodologia:** serão apresentadas considerações técnicas para melhorias do modelo original do acelerador de prótons proposto. Serão avaliadas o tempo de percurso da partícula no interior da cavidade cilíndrica ressonante, considerando a oscilação do campo elétrico no tempo na estrutura de aceleração. **Resultado:** simulações computacionais do tempo de aceleração serão apresentadas, onde verifica-se reduzida diferença percentual ao considerar os dois comportamentos avaliados do campo elétrico, constante e variante no tempo.

**Palavras-chave:** Acelerador de Partículas Circular; Campo Elétrico; Cavidade Cilíndrica Ressonante.

### ABSTRACT

This work aims to present an evaluation of the behavior of the electric field inside the accelerator structure of the circular particle accelerator model (AC) presented in chapter two of this thesis. Technical considerations will be presented for improvements of the original proposed proton accelerator model. The time of travel of the particle inside the resonant cylindrical cavity will be evaluated considering the oscillation of the electric field in time in the acceleration structure. Computational simulations of the acceleration time will be presented, where there is a reduced percentage difference when considering the two evaluated electric field behaviors: constant and time variant.

**Keywords:** Circular Particle Accelerator; Magnets; Electric Field Behavior.

## 6.1. INTRODUÇÃO

O modelo de acelerador de partículas circular com aletas e com cavidade ressonante apresentado no capítulo deste trabalho foi simulado através de um algoritmo computacional, dito ACEL. A aplicação conjunta de ferramentas de computação evolutiva em busca de otimização de determinados parâmetros no modelo de equipamento adotado foi abordada. Aplicações associada à produção de radioisótopos com ACPR - 35 e ACC - 11 (presentes respectivamente nos capítulos 3 e 5), ou para geração de feixe de prótons para terapia com ACPT - 65 e ACPT - 250 (apresentado no capítulo 4) foram detalhadas.

Contudo no decorrer da pesquisa observou-se potencial ponto de evolução do modelo inicial desenvolvido, assim este capítulo tem por objetivo apresentar avaliação para uma das

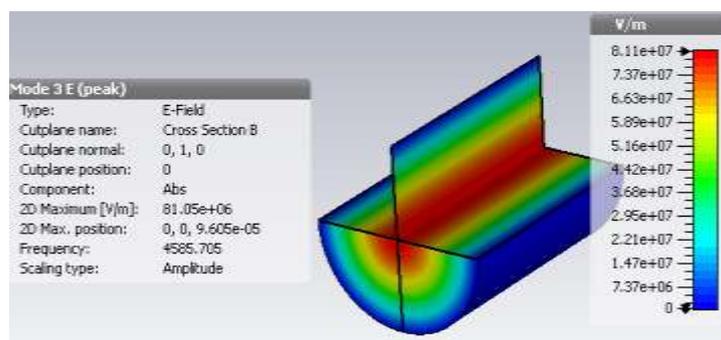
considerações adotadas quando do desenvolvimento do código ACEL. Especificamente será avaliado o impacto de considerar o campo elétrico constante no tempo no interior da estrutura de aceleração do modelo de equipamento proposto pela pesquisa. Será apresentada alternativa com a variação do campo elétrico no tempo, e por fim ambas serão comparadas.

## 6.2.COMPORTAMENTO DO CAMPO ELÉTRICO

### 6.2.1. Campo Elétrico Constante no Tempo

Para simulação do modelo original do equipamento proposto, o algoritmo computacional desenvolvido considerou dois níveis de campo nos magnetos, campo magnético não nulo na região interna aos “dês”, e nível de campo magnético nulo na região externa aos “dês”, sem qualquer oscilação desses valores. Outra consideração adotada foi um campo elétrico efetivo não variante no tempo no interior da estrutura de aceleração do modelo proposto, mais especificamente da cavidade cilíndrica ressonante, quando essa está em regime de ressonância.

A justificativa para a simplificação empregada para o comportamento do campo elétrico está na resposta de uma cavidade cilíndrica ressonante em condição de ressonância, e com modo de propagação  $TM_{010}$  presente em seu interior. Tal condição está validada pelo trabalho de CAMPOS e CAMPOS (2016), e resumido pela Figura 6.1, que apresenta o comportamento do campo elétrico no interior de uma estrutura “cavidade cilíndrica ressonante”.



**Figura 6.1:** Representação do campo elétrico no interior de uma cavidade cilíndrica ressonante, quando em ressonância e com a presença do modo de propagação  $TM_{010}$ . Fonte: CAMPOS e CAMPOS, 2016.

Destaca-se o modo  $TM_{010}$  como o modo de onda ideal para essa estrutura. Para este modo de propagação apresentam-se as Eqs. 6.1 (CAMPOS e CAMPOS, 2016):

$$\begin{aligned} E_r &= 0 \\ E_z &= E_0 \cdot J_0(k_r \cdot r) \cdot \cos(\omega t) \\ H_\phi &= -\frac{E_0}{Z_0} J_1(k_r \cdot r) \cdot \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Para  $r$  igual a zero, no eixo da cavidade, a componente do campo elétrico da direção do eixo da cavidade é dada por  $E_z = E_0 J_0 \cos(\omega t)$ , onde  $J_0(0)$  é a função de Bessel de primeira ordem, equivalente a unidade. Assim,  $E_z = E_0 \cos(\omega t)$ . Assumindo que quando  $t$  é zero 0, o próton entra na cavidade com campo elétrico  $E_z = E_0$ .

Desta forma, conforme apresentado e retirado do capítulo dois deste trabalho, a expressão para cálculo do tempo da partícula ao atravessar a estrutura de aceleração segue a Eq. 6.2:

$$T_{acel} = \frac{p_r(i+1) - p_r(i)}{\frac{q \cdot ddp}{L_{cav}}} \quad (6.2)$$

Onde,  $T_{acel}$  é o tempo da partícula com carga  $q$ , no interior da estrutura de aceleração com comprimento  $L_{cav}$  e submetida à diferença de potencial  $ddp$ .  $p_r(i+1)$  e  $p_r(i)$ , são respectivamente os momentos lineares da partícula antes e após passar pela estrutura de aceleração.

### 6.2.2. Campo Elétrico Variante no Tempo

Entretanto, é de conhecimento que o campo elétrico no interior de uma cavidade ressonante varia no tempo, como segue.

$$E = E_0 \cos(\omega t) \quad (6.3)$$

Assim, em busca de melhorar o modelo original apresenta-se como alternativa a Eq. 6.3 para representar campo elétrico não constante no interior da estrutura de aceleração, de tal forma que o tempo da partícula no interior da cavidade cilíndrica ressonante deve respeitar a Eq. 6.4:

$$\left(\frac{q^2 ddp}{m_R}\right)\left(\frac{1}{\omega^2}\right)(1 - \cos(\omega t)) + t(v_{oR}) - L_{cav} = 0 \quad (6.4)$$

Onde,  $t$ , é o tempo gasto pela partícula com carga  $q$ , massa  $m_R$ , velocidade  $v_{oR}$ , e frequência angular  $\omega$ , ao passar pela estrutura de aceleração de comprimento  $L_{cav}$ , submetido à diferença de potencial  $ddp$ . A Eq. 6.4 é proveniente de algebrismo a partir da Eq. 6.5 onde tem-se a componente,  $k \cos(\omega t)$ , que está associada ao campo elétrico variante no tempo que aplica gradiente de energia à partícula em processo de aceleração, e é apresentada a seguir:

$$\frac{dv}{dt} = a(t) \quad (6.5)$$

A Eq. 6.4 foi então avaliada para diferentes valores de velocidade da partícula e desta forma pode-se determinar o valor de  $t$ , valor esse associado com o tempo gasto pela partícula a ser acelerada em sua passagem pela cavidade ressonante, que será de agora em diante apresentado como  $T_{acel}$ , seguindo nomenclatura anteriormente adotada, assim como presente para a Eq. 6.2.

Com a avaliação da Eq. 6.4 observa-se que a mesma trata-se de uma função transcendente, pois a variável independente não pode ser colocada em evidencia (BALSA, 2017). Contudo são apresentados na literatura diversos métodos para solução de uma função transcendente, conforme presente em trabalho de RIBEIRO (2012), assim como no de CERQUEIRA e SOARES (2009). Uma das possibilidades de solução envolve separar a variável a ser calculada,  $t$ , conforme apresentado pela Eq. 6.6, para que sejam encontradas as curvas das equações para cada um dos lados da equação, ao zerar o outro lado. Assim o ponto de intercessão das duas curvas será a raiz da equação. Outra possibilidade está em aplicar rotina do Matlab® que já aplica um conjunto de métodos numéricos e também apresenta como resultado a raiz da equação.

$$t(v_{oR}) = -\left(\frac{q^2 ddp}{m_R}\right)\left(\frac{1}{\omega^2}\right)(1 - \cos(\omega t)) + L_{cav} \quad (6.6)$$

### 6.3.SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Serão apresentados a seguir adequação em código computacional originalmente desenvolvido e destacado no capítulo dois desta tese, com objetivo de avaliar impactos de ambos os tópicos discutidos no item anterior deste trabalho. Ou seja, será avaliado o  $T_{acel}$  empregando um campo elétrico constante, definido pela Eq. 6.2, e um campo elétrico variável, seguindo a Eq. 6.4.

Para a Eq. 6.2, adotou-se o código computacional original, chamado de ACEL. Já para a Eq. 6.4, encontra-se na literatura diversas possibilidades de desenvolvimento para solução da mesma, mas aqui foram aplicados os dois métodos, destacados no item anterior, para determinar a raiz da equação, ou o  $T_{acel}$ .

O primeiro desses métodos foi por meio da intercessão gráfica das curvas da Eq. 6.6. São obtidas duas curvas diferentes ao se zerar cada um dos lados da equação, conforme apresentado a seguir.

$$t(v_{or}) = 0$$

$$0 = -\left(\frac{q^2 ddp}{m_R}\right)\left(\frac{1}{\omega^2}\right)(1 - \cos(\omega t)) + L_{cav} \quad (6.7)$$

Outra forma para determinar a raiz da equação está no emprego da função “fzero” do Matlab®. Essa função, segundo o próprio *help* do *software*, presente em MATHWORKS (2017), usa a combinação de diversos métodos numéricos como da bissecção, secante e método por interpolação quadrática inversa.

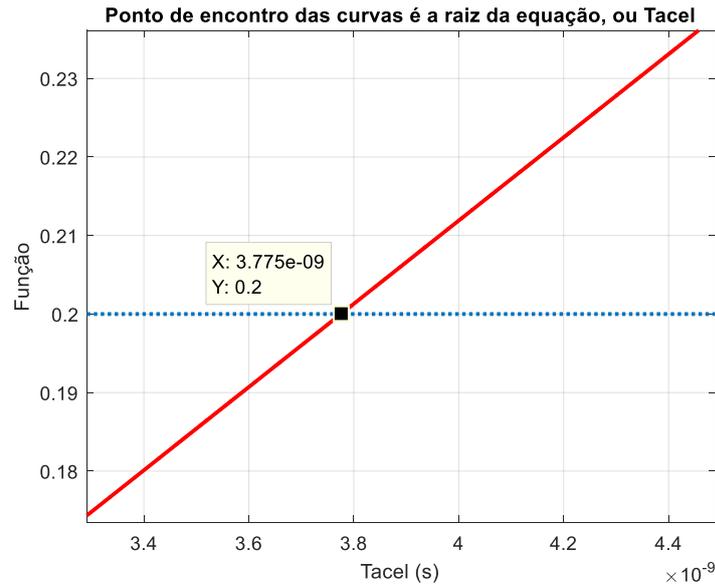
### 6.4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores para o tempo de aceleração para as duas condições descritas encontram-se na Tabela 6.1, para distintos níveis energéticos, considerando a frequência da partícula de 33,7 MHz, e demais valores respeitando os presentes no capítulo dois de forma a ser possível a comparação de ambas às condições analisadas.

**Tabela 6.1: Comparação entre consideração original e alternativa para comportamento do campo elétrico no interior da cavidade ressonante. Fonte: Acervo do autor.**

Energia (MeV)	Velocidade da partícula (m s <sup>-1</sup> )	T <sub>acel</sub>		Diferença
		Eq. (6.2) (s)	Eq. (6.4) (s)	
15	5,2974 x 10 <sup>7</sup>	3,7632 x 10 <sup>-9</sup>	3,7754 x 10 <sup>-9</sup>	0,32%
	5,3318 x 10 <sup>7</sup>	3,7391 x 10 <sup>-9</sup>	3,7511 x 10 <sup>-9</sup>	0,32%
	5,3659 x 10 <sup>7</sup>	3,7155 x 10 <sup>-9</sup>	3,7272 x 10 <sup>-9</sup>	0,31%
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	6,0635 x 10 <sup>7</sup>	3,3065 x 10 <sup>-9</sup>	3,2984 x 10 <sup>-9</sup>	0,24%
	6,0931 x 10 <sup>7</sup>	3,2904 x 10 <sup>-9</sup>	3,2824 x 10 <sup>-9</sup>	0,24%
	⋮	⋮	⋮	⋮
25	6,7597 x 10 <sup>7</sup>	2,9645 x 10 <sup>-9</sup>	2,9587 x 10 <sup>-9</sup>	0,20%
	6,7895 x 10 <sup>7</sup>	2,9530 x 10 <sup>-9</sup>	2,9457 x 10 <sup>-9</sup>	0,25%
	⋮	⋮	⋮	⋮
64	1,0527 x 10 <sup>8</sup>	1,9012 x 10 <sup>-9</sup>	1,8999 x 10 <sup>-9</sup>	0,07%
	1,0542 x 10 <sup>8</sup>	1,8986 x 10 <sup>-9</sup>	1,8972 x 10 <sup>-9</sup>	0,08%
	⋮	⋮	⋮	⋮

Os valores referentes à Eq. 6.4 foram os mesmos para os dois métodos empregados, via gráfico e função “fzero”, sendo a principal diferença a quantidade de algarismos significativos em ambos. A título de exemplificação a seguir, na Figura 6.2, apresenta-se resultado gráfico para valores referentes à energia de 15MeV, importante destacar que o método numérico apresenta como resultado valor de “3,775436963060486e-09” segundos, já no gráfico verifica-se  $T_{acel}$  de “3,775e-09” segundos.



**Figura 6.2: Resultado de método gráfico para determinação do  $T_{acel}$  . Fonte: Acervo do autor.**

Ao avaliar a Tabela 6.1, e principalmente a diferença percentual entre os valores do tempo de aceleração para cada uma das condições apresentadas, observa-se que a consideração do campo elétrico invariante no tempo tem grande potencial de aplicação para a fase da pesquisa desenvolvida. Principalmente ao considerar energias superiores, ou aplicações de radioterapia. Mesmo para as energias inferiores, associada à produção de radioisótopos, a maior diferença verificada foi de 0,32%.

Importante citar que o esforço computacional envolvido para estruturar a simulação da Eq. 6.4, é superior do que para a Eq. 6.2, destacando assim a aproximação de qualidade para o comportamento do campo elétrico empregada na pesquisa.

## 6.5. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi de apresentar uma análise para uma das principais considerações empregadas no desenvolvimento do modelo para o acelerador de partículas circular destacado no capítulo dois desta tese, especificamente associado ao comportamento do campo elétrico na estrutura de aceleração.

A condição original adotada estipulava valor constante para o campo elétrico no interior da estrutura de aceleração, ou seja, o mesmo não variava no tempo. Assim neste trabalho foi avaliada condição alternativa a essa, ou um campo elétrico variável no tempo na cavidade

cilíndrica ressonante. Verificou-se que a condição de campo elétrico constante é válida, pois, foram observadas diferenças percentuais inferiores à 0,5% em relação a adoção de um campo variável.

## 6.6.REFERÊNCIAS

BALSA, Carlos. **Equações não lineares**. Departamento de Matemática, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança. Disponível em <https://pt.slideshare.net/antoniosilvamachado/eq-nao-lin>. Acesso em: 25 de Abril de 2017.

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio P. R. **Análise Eletromagnética em Cavidade Cilíndrica Ressonante**. Revista Ciência e Tecnologia, RCT, UNISAL, v.19, n.34, 2016.

CERQUEIRA, Stenio Henrique do Nascimento; SOARES, Josué de Jesus. **Método das Curvas Características para Solução de Equações Diferenciais Parciais de Primeira Ordem**. Monografia, Pós-graduação em Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MATHS. Disponível em: (<http://www.mathcs.emory.edu/~cheung/Courses/170/Syllabus/07/bisection.html>). Acesso em 19/05/2017.

MATHWORKS. Disponível em: (<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fzero.html#btoc6lj-18>). Acesso em 17/08/2017.

RIBEIRO, Rosane Rayanne Jota. **Revisão Bibliográfica de Alguns Métodos Numéricos para Obtenção de Zeros Rápidos de Funções Transcendentes e Polinomiais**. Monografia, Bacharel em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Rio Grande do Norte, 2012.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho relaciona distintas áreas de pesquisa, com destaque para acelerador de partículas circular, estruturas eletromagnéticas do tipo cavidades cilíndricas ressonantes, e pôr fim computação evolutiva, especificamente os algoritmos genéticos.

O objetivo principal da pesquisa apresentado neste documento foi o desenvolvimento de um algoritmo computacional fundamentado em algoritmo genético para otimizar variáveis específicas relacionadas ao modelo de acelerador de partículas circular empregado. Sendo que este modelo tem por base o desenvolvido pelo NRI do DEN da UFMG, porém com o emprego de uma cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração. Assim a partir de parâmetros de entrada, a saber, energia inicial, energia final e partícula a ser acelerada, o algoritmo genético desenvolvido apresenta valores otimizados para as variáveis de saída, sendo elas, diferença de potencial aplicada à estrutura de aceleração, campo magnético da região de circulação, comprimento e raio da cavidade cilíndrica ressonante, especificamente para o modelo de acelerador de partículas circular empregado.

Tanto o modelo matemático que representa o acelerador de partículas circular empregado nesta pesquisa, assim como o algoritmo genético, encontram-se validados. Destacam-se também o emprego do AG desenvolvido nesta pesquisa para determinar valores para parâmetros do equipamento para condições específicas de uso, seja na produção de radioisótopos emissores de pósitron e que decaem por captura eletrônica (ACPR - 35), produção dedicada do radioisótopo C-11 (ACC - 11), assim como terapia por feixe de prótons (ACPT - 65 e ACPT - 250).

O emprego da cavidade cilíndrica ressonante como estrutura de aceleração do equipamento apresenta grande potencial. Pois, com tal estrutura, quando em modo de ressonância, e modo de propagação  $TM_{010}$  em seu interior, tem-se a condição ideal para transferência de gradiente de energia à partícula a ser acelerada. Para garantir as condições citadas, o emprego de restrições quando do desenvolvimento do AG mostrou-se de grande valia, pois assim tem-se a certeza que as respostas apresentadas pelo AG mandatoriamente implicam em uma estrutura de aceleração que respeita as condições iniciais destacadas. Outro

ponto de relevância está no “casamento” entre às estruturas de circulação e aceleração do modelo de equipamento empregado, para assim garantir o sincronismo entre a frequência da cavidade cilíndrica ressonante e a frequência associada à órbita da partícula pelo equipamento. Mais uma vez aqui destaca-se o AG apresentado, que garante o respeito à esta condição mandatória ao projeto.

Como apresentado ao longo do texto entregar um feixe de partículas com determinado nível de energia cinética é fundamental para qualquer aplicação associada à aceleradores de partículas. Desta forma o controle dos parâmetros desde equipamento é de extrema relevância seja na produção de radioisótopos ou na radioterapia. Assim o AG desenvolvido na pesquisa e apresentado neste documento, atua de forma a propor valores otimizados para esses parâmetros, e com garantia que os mesmos estejam em domínio válido de soluções graças à função *fitness* que representa o problema, assim como às restrições impostas à mesma.

## ANEXOS

### Anexo A - Artigos

Importante destacar os artigos listados a seguir, sendo que os mesmos são frutos deste projeto de pesquisa, e já foram aprovados para publicação ou mesmo publicados.

**A.1 Acelerador de Partículas Circular, Uma Análise Clássica e Relativística Para o Ensino das Engenharias.** Revista Educação & Tecnologia, n.16, 2017 ISSN 2179-6122;

**A.2 Análise Eletromagnética em Cavidade Cilíndrica Ressonante.** Revista Ciência e Tecnologia, RCT, UNISAL, v.19, n.34, 2016, ISSN 2236-6733;

**A.3 Cyclotron Parameters for C-11 Yield.** *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, ISSN 0236-5731, DOI 10.1007\_s10967-015-4383-z. 2014.

# Revista Educação & Tecnologia

Revista Técnica-Científica Nacional - ISSN Impresso 1516-280X  
ISSN Eletrônico 2179-6122

UTFPR/Curitiba

## Revista Educação & Tecnologia

CAPA SOBRE PÁGINA DO USUÁRIO PESQUISA ATUAL ANTERIORES

Capa > Edições anteriores > **n. 16**

### n. 16

#### Sumário

##### Artigos

[ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR, UMA ANÁLISE CLÁSSICA E RELATIVÍSTICA PARA O ENSINO DAS ENGENHARIAS](#)

Gustavo Lobato Campos, Tarcísio Passos de Ribeiro Campos

[A FORMAÇÃO DE PROFESSORES DO MAGISTÉRIO E AS POSSIBILIDADES DE USO DO CELULAR NO ENSINO DE MATEMÁTICA PARA UMA ALIMENTAÇÃO SAUDÁVEL](#)

Jeremias Ferreira da Costa, Letícia Perez da Costa, Sérgio Camargo

[GOVERNANÇA DE TI: GERENCIAMENTO DOS SERVIÇOS DE TI NAS ORGANIZAÇÕES](#)

Fabio Tiburcio Bonifacio Pereira

[APRENDENDO MATEMÁTICA AO SE PROGRAMAR NO SCRATCH](#)

Airan Priscila de Faria, Marcelo Souza Motta

ISSN IMPRESSO 1516-280X

ISSN ELETRÔNICO 2179-6122

[OPEN JOURNAL SYSTEMS](#)

[Ajuda do sistema](#)

#### USUÁRIO

Logado como:

**gustavolobato**

- [Meus periódicos](#)
- [Perfil](#)
- [Sair do sistema](#)

#### NOTIFICAÇÕES

- [Visualizar](#)
- [Gerenciar](#)

#### IDIOMA

Selecione o idioma

#### CONTEÚDO DA REVISTA

Pesquisa

Escopo da Busca

Todos

Procurar

- [Por Edição](#)
- [Por Autor](#)
- [Por título](#)
- [Outras revistas](#)

TAMANHO DE FONTE

# ACELERADOR DE PARTÍCULAS CIRCULAR: UMA ANÁLISE CLÁSSICA E RELATIVÍSTICA PARA O ENSINO DE ENGENHARIAS

## CIRCULAR PARTICLE ACCELERATOR: A CLASSICAL AND RELATIVISM ANALYSIS FOR ENGINEERING TEACHING

Gustavo Lobato Campos

Doutorando no Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais, UFMG

Professor no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga – Minas Gerais, IFMG

[gustavo.lobato@ifmg.edu.br](mailto:gustavo.lobato@ifmg.edu.br)

Tarcísio Passos Ribeiro de Campos

Professor no Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais – UFMG

[tprcampos@pq.cnpq.br](mailto:tprcampos@pq.cnpq.br)

### RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar um equipamento com funcionamento baseado com as áreas de eletromagnetismo e relatividade, ambas tão importantes, mas também tão temerosas para estudantes de engenharias nos dias atuais. Neste trabalho serão apresentados os conceitos fundamentais relacionados a um acelerador de partículas circular, mais conhecido por Cíclotron. Serão apresentados a conceituação teórica deste equipamento, assim como alguns de seus principais elementos. Também é foco deste trabalho apresentar análise não relativística e relativística para aceleração de partículas carregadas pelo Cíclotron. Por fim destaca-se elaboração de rotina no *software* MATLAB® para trabalhar com as equações características deste equipamento e obter valores para algumas de suas grandezas, considerando uma estrutura de aceleração simplificada, assim como avaliar o comportamento não relativístico e relativístico da partícula.

**Palavras-chave:** Eletromagnetismo; Acelerador de partículas; Cíclotron.

### ABSTRACT

This article brings to light an equipment with operation based on the areas of electromagnetism, and relativity, both so important, but so fearful for engineering students today. The main objective of this paper is to present the fundamental concepts related to a circular particle accelerator, known by Cyclotron. The theoretical conceptualization of this equipment, as well as some of its elements will be presented. Also is focus of this work present a non relativistic and relativistic analysis for acceleration of charged particles by the Cyclotron. Finally, routine development stands in MATLAB® software to work with the characteristic equations of this equipment and get values for some of their greatness, considering a simplified acceleration structure, as well evaluate the non relativistic and relativistic behavior of the particle.

**Keywords:** Electromagnetism; Particle accelerator; Cyclotron.

## 1 INTRODUÇÃO

Originalmente também chamado de “*magnetic resonance accelerator*”, ou como é mais conhecido, Cíclotron, trata-se de um acelerador de partículas carregadas concebido pelos físicos Lawrence e Livingston (KAPLAN, 1978). O primeiro modelo deste equipamento foi construído

em 1930, com a comprovação de sua eficiência na aceleração de partículas carregadas ocorrendo em 1931 (CYCLOTRON PRODUCED RADIONUCLIDES, 2009).

Pode-se dizer que umas das principais características de um Cíclotron é manter as partículas a serem aceleradas em uma trajetória circular provendo ganho de energia fracionado a essas partículas, conforme será apresentado neste trabalho, inclusive mediante simulação de rotina computacional.

Os Cíclotrons são os equipamentos mais empregados para a aceleração de partículas carregadas a energias suficientes que propiciem uma requerida reação nuclear (CYCLOTRON PRODUCED RADIONUCLIDES, 2008). Embora os equipamentos modernos sejam subdivididos em diversos tipos, seu princípio básico e fundamental ainda segue o proposto por Lawrence e Livingston.

Grande parte da aplicação dos Cíclotrons atualmente está na medicina nuclear, com foco na produção de radioisótopos. Destacam-se pesquisas recentes para seu emprego, principalmente, para produção de radioisótopos de meia vida curta, ou seja, com menor tempo de decaimento (CAMPOS; CAMPOS, 2015). Mas tais aceleradores também são empregados em áreas da física de partículas e industrial.

Assim este trabalho tem por objetivo, apresentar alguns conceitos fundamentais, o princípio básico de funcionamento, assim como avaliar, via rotina computacional, as diferenças entre uma análise não relativística e relativística para alguns parâmetros do Cíclotron. A estrutura aqui apresentada tem também como objetivo uma avaliação mais próxima com aplicações práticas de áreas como eletromagnetismo e relativismo, hoje desanimadoras para estudantes de engenharias.

## **2 DESENSOLVIMENTO**

### **1.1 Princípio Básico**

O ponto de partida para qualquer problema que seja está associado à sua correta compreensão. Assim, um Cíclotron é um acelerador de partículas carregadas que aplica os princípios básicos apresentados pela Equação de Lorentz, Eq. (1), ou seja, trata-se de um equipamento que mantém a partícula carregada,  $q$ , em uma trajetória circular aplicando sob a mesma um campo magnético,  $B$ , e provém um gradiente de energia, a está mesma partícula via campo elétrico,  $E$ . Destaca-se ainda que no Cíclotron o período do movimento da partícula

carregada é independente da sua velocidade,  $v$ , uma vez que se trabalha com campo magnético uniforme.

$$\vec{F} = q[\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})] \quad (1)$$

As partículas carregadas têm sua trajetória em duas cavidades de material metálico semicirculares, que devido a sua forma são denominadas “dês”. Entre os “dês” se aplica uma diferença de potencial alternado, com período igual ao de revolução da partícula carregada. É justamente a diferença de potencial nesta condição que irá produzir o campo elétrico na região entre os “dês”, campo este responsável por prover ganho de energia à partícula carregada. Destaca-se a presença do campo elétrico somente na região de separação entre os “dês”, uma vez que devido as condições de contorno, não é permitido a existência de campo elétrico no interior das cavidades metálicas. Presente ainda neste sistema, tem-se um campo magnético perpendicular ao plano dos “dês”, campo este responsável pela trajetória circular da partícula carregada. Observa-se desta forma a aplicação da equação de força de Lorentz, fundamental no eletromagnetismo, na caracterização do funcionamento básico do Cíclotron. Importante salientar que todo este sistema está submetido a um ambiente de vácuo, para assim garantir que as partículas carregadas não percam energia em colisões com moléculas de ar. Uma representação da estrutura simplificada do Cíclotron é apresentada na Figura 1, sendo está presente na requisição de patente do equipamento.

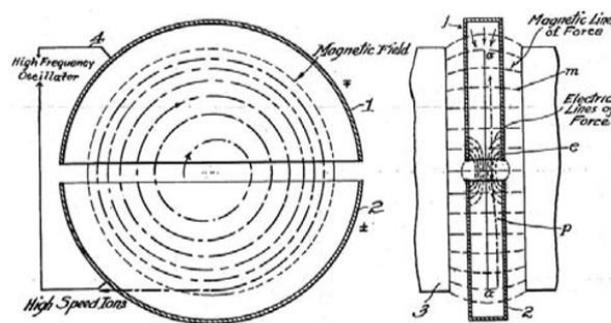


Figura 1: Representação do Cíclotron (PATENTS, 2015).

Considerando a Figura 1, resumidamente as partículas carregadas são injetadas na região central do primeiro “dê”, via uma fonte de íons, com uma determinada velocidade. Pela ação do campo magnético uniforme as partículas se movem em uma trajetória semicircular neste primeiro “dê” até chegar a região de separação dos “dês”, em um intervalo de meio

período do Cíclotron. A frequência do Cíclotron, ou a frequência de oscilação do potencial é ajustada para que neste instante o potencial na extremidade do primeiro “dê” seja superior ao potencial na extremidade do segundo “dê”, para que assim a partícula carregada sofra ação de um campo elétrico na região de separação entre os dois “dês”, e desta forma ganhe energia, ou seja, aumente sua velocidade. Como ao entrar no segundo “dê” a partícula carregada apresenta uma velocidade superior à no primeiro “dê”, esta partícula desenvolverá uma trajetória semicircular com raio também superior à apresentada no primeiro “dê”. Agora, após mais meio período do Cíclotron, a partícula encontra a extremidade do segundo “dê”, onde novamente na região de separação entre os “dês” a partícula será acelerada. A polaridade presente nas extremidades dos “dês” deve ser o inverso da anteriormente apresentada, e assim o potencial do segundo “dê” deve ser superior à do primeiro “dê”.

Destaca-se aqui que a energia cinética ganha pela partícula carregada cada vez que ela passa pela região de separação dos “dês” é da ordem de  $q\Delta V$ , ou seja, sua carga multiplicada pela diferença de potencial aplicada entre os “dês”. Logo a partícula carregada terá trajetórias com raios cada vez maiores, devido a sua crescente velocidade, e deve-se extrair a mesma antes de não mais estar submetida ao campo magnético do equipamento.

## 1.2 Formalismo Matemático

O passo seguinte, com o conhecimento do problema, está no equacionamento do mesmo. O formalismo apresentado neste trabalho já é consolidado na literatura da área, como presente, por exemplo, em Kaplan (1978), e todo ele parte da Eq. (1), Equação de Força de Lorentz. Esta equação pode ser escrita em suas componentes relativos ao campo elétrico,  $E$ , e ao campo magnético,  $B$ :

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Sabendo que a partícula carregada de carga,  $q$ , de massa,  $m$ , dentro do “dê” possui velocidade,  $v$ , constante e está sob ação de um campo magnético uniforme,  $B$ , temos as duas forças, elétrica e magnética, atuando sobre a partícula carregada em equilíbrio, assim:

$$q |\vec{v} \times \vec{B}| = \frac{mv^2}{r} \quad (4)$$

Pode-se assim determinar o raio,  $r$ , da partícula carregada, e verificar que o mesmo é dependente do campo magnético aplicado:

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (5)$$

Pode-se também determinar o período,  $T$ , assim como a frequência,  $f$ , do Cíclotron, a partir das equações conhecidas em conjunto com outras clássicas como:

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{v}{r} \quad (7)$$

$$f = \frac{v}{2\pi r} \quad (8)$$

$$f = \frac{v}{2\pi \frac{mv}{qB}} \quad (9)$$

$$f = \frac{qB}{2\pi m} \quad (10)$$

Já a energia da partícula carregada ao deixar o Cíclotron pode ser calculada ao considerar o raio máximo da mesma, tomando por base a Eq. (5):

$$r_{\max} = \frac{mv}{qB} \quad (11)$$

$$v = \frac{qBr}{m} \quad (12)$$

Destaca-se ainda que a velocidade da partícula pode ser calculada pelo seu momento linear,  $p$ :

$$v = \frac{p}{m} \quad (13)$$

Substituindo a Eq. (12) na fórmula da energia cinética, tem-se:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{qBr}{m}\right)^2 = \frac{q^2B^2r^2}{2m} \quad (14)$$

Com o formalismo apresentado observa-se na Eq. (14) que a energia cinética final da partícula acelerada em um Cíclotron é independente do campo elétrico, mas sim do campo magnético. Contudo a energia da partícula carregada após ser acelerada é calculada segundo Kaplan (1978) como:

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \quad (15)$$

Onde,  $V$ , é a diferença de potencial através do qual a partícula é acelerada. Ao se substituir a velocidade na Eq. (15) pela Eq. (12), determina-se a diferença de potencial a ser aplicado ao Cíclotron para acelerar determinada partícula carregada:

$$V = \frac{1}{2}B^2r^2 \frac{q}{m} \quad (16)$$

### 1.3 Relativismo

Um ponto fundamental quando se acelera partículas carregadas está na questão relativística associada. As equações apresentadas até o momento são baseadas e fundamentadas na mecânica clássica, logo correções fazem-se necessárias ao se trabalhar com velocidades elevadas, próximas à velocidade da luz. Usualmente tais efeitos são desconsiderados, mas neste trabalho ambas as condições, clássica e relativística, serão objetos de análise.

Os efeitos relativísticos estão associados ao aumento de massa da partícula carregada ao se trabalhar em velocidades próximas a da luz, sendo agora denominada de massa relativística, e em destaque na Eq. (20). Algumas das equações fundamentais ao se trabalhar nessa condição são apresentadas a seguir (KAPLAN, 1978):

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (17)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)}} \quad (18)$$

$$E = mc^2 \quad (19)$$

$$m = m_0\gamma \quad (20)$$

Onde a relação entre a velocidade,  $v$ , da partícula, e a velocidade da luz,  $c$ , é expressa por  $\beta$ . Deve-se ainda definir,  $m_0$ , como a massa em repouso da partícula, e  $m$ , a sua massa relativística, e  $\gamma$  a relação entre ambas.

Desta forma pode-se retirar as equações relativísticas para o raio, assim como para a velocidade da partícula acelerada, sendo  $p_r$  o momento linear relativístico, já aplicando os efeitos sobre a massa da partícula.

$$r_{\max} = \frac{p_r}{qB} \quad (21)$$

$$v = \frac{p_r c}{\sqrt{m_0^2 c^2 + p_r^2}} \quad (22)$$

## 1.4 Componentes Básicos

Com o conhecimento do princípio fundamental para operação de um Cíclotron, assim como das equações que governam o mesmo, pode-se identificar, resumidamente, os subcomponentes principais de um Cíclotron (TODA, 1983):

### a. *Magneto*

Trata-se do imã, fonte do campo magnético, responsável por manter as partículas carregadas na trajetória circular. Tem relação direta com o maior raio descrito pela partícula carregada a ser acelerada.

### b. *Sistema de aceleração*

É o sistema responsável por aplicar a diferença de potencial entre os “dês” do Cíclotron. Também conhecido por sistema de aceleração RF, “*radio frequency*”, embora as frequências mais aplicadas a este equipamento sejam da ordem de micro-ondas.

*c. Sistema de Extração*

Consiste de refletores, ou defletores eletrostáticos, responsáveis por desviar o feixe de partículas carregadas, já acelerado, ou seja, com maior potencial energético para fora da região do Magneto.

*d. Fonte de íons*

É o sistema responsável por gerar a partícula carregada a ser acelerada, ou no caso, o feixe de partículas a ser acelerado. Usualmente é acoplado a um sistema de injeção, sendo este o responsável pela formação da “bolha” de partículas carregadas a ser acelerada.

*e. Sistema de vácuo*

É um sistema de bombas mecânicas responsável por manter a estrutura em uma condição de vácuo, para assim evitar perda de energia das partículas em colisões com partículas do ar.

## **1.5 Simulação Computacional e Resultados**

Com o recurso do *software* MATLAB®, decidiu-se trabalhar em duas linhas de análise, a primeira com objetivo de validar o formalismo matemático apresentado neste trabalho, empregando valores fixos conforme presentes na referência (RABELO; CAMPOS, 2012). Em seguida se trabalhou com faixas de valores energéticos, para assim verificar o comportamento do acelerador circular.

*a. Simulação 1*

Foi simulada uma estrutura representativa de um acelerador de partículas circular, a partir da base teórica apresentada neste trabalho, ou seja, considerando as equações da mecânica clássica, ou não relativística assim como da mecânica relativística. A simulação computacional é fundamentada em uma estrutura simplificada de um acelerador de partículas circular, ao considerar uma região de aceleração e outra de circulação. Na região de aceleração é aplicada a diferença de potencial, ou o campo elétrico, que irá prover ganho de energia à partícula a ser acelerada, enquanto que na região de circulação, a partícula é submetida ao campo magnético, para assim retornar à região de aceleração para novo ganho de potencial energético.

Na rotina computacional trabalhou-se com as constantes apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1. Grandezas constantes aplicadas na rotina em MATLAB®.**

Velocidade da luz (m/s)	$3 \times 10^8$
Massa do próton (kg)	$1,6 \times 10^{-27}$
Carga do próton (C)	$1,6 \times 10^{-19}$
Energia inicial da partícula (MeV)	15

Para a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®, adotou-se a diferença de potencial entre os eletrodos do acelerador de partículas circular, assim como o nível do campo magnético aplicado ao mesmo como as variáveis de entrada do processo. Ao inserir nessas variáveis de entrada, respectivamente, 200 kV e 3 T, determinou-se as grandezas de saída, para a condição não relativística e relativística, conforme apresentado respectivamente nas Tabelas 2 e 3, com destaque ainda a comparação com os valores presentes na referência empregada.

**Tabela 2. Resultados analíticos “clássicos” de acordo com o algoritmo desenvolvido em comparação como a referência (RABELO; CAMPOS, 2012).**

Variável em análise	Resultado MATLAB®	Resultado Referência
Energia final da partícula (MeV)	64	64
Velocidade inicial da partícula (m/s)	$5,36 \times 10^7$	$5,36 \times 10^7$
Velocidade final da partícula (m/s)	$11,0 \times 10^7$	$11,0 \times 10^7$
Raio (m)	0,38	0,38

**Tabela 3. Resultados analíticos “relativísticos” de acordo com o algoritmo desenvolvido em comparação como a referência (RABELO; CAMPOS, 2012).**

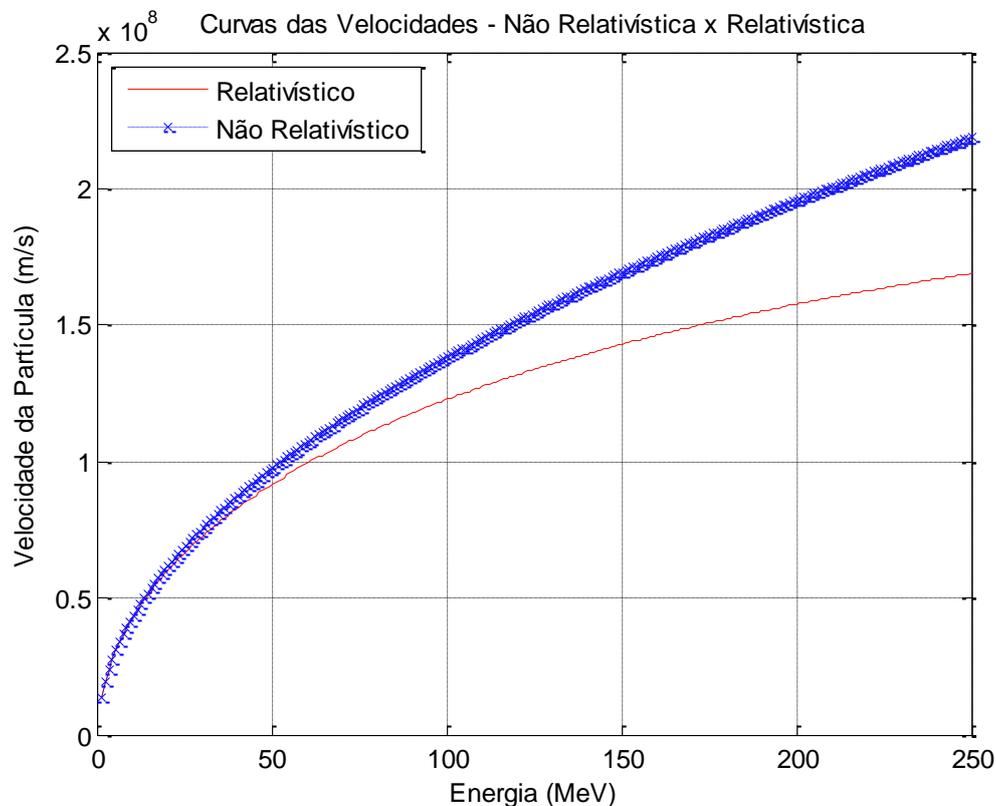
Variável em análise	Resultado MATLAB®	Resultado Referência
Energia final da partícula (MeV)	64	64
Velocidade inicial da partícula (m/s)	$5,29 \times 10^7$	$5,29 \times 10^7$
Velocidade final da partícula (m/s)	$10,5 \times 10^7$	$10,5 \times 10^7$
Raio (m)	0,38	0,38

Observam-se que os resultados apresentados em ambas as tabelas estão em conformidade com os valores presentes na referência adotada.

*b. Simulação 2*

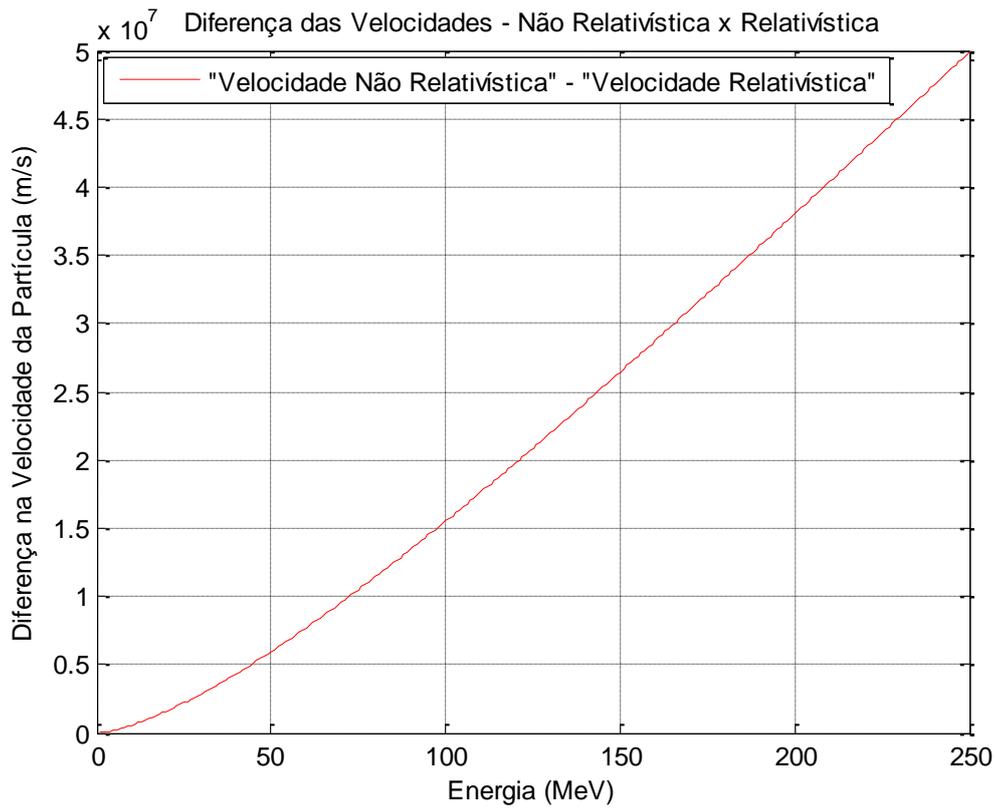
A mesma estrutura simulada, descrita no item *a*, foi agora analisada considerando um range de energia, para assim empregar os recursos gráficos disponibilizados pelo MATLAB® na análise e compreensão do problema do acelerador circular. Optou-se também por elevar a energia final da partícula, de 64 MeV para 250 MeV, nível este que o tornaria apto a viabilizar um grande número de reações nucleares, assim como facilita identificar seu comportamento relativístico.

Na Figura 2, apresentam-se os perfis de velocidade do próton em função da energia cinética, seguindo um comportamento não relativístico e relativístico, tomando por base respectivamente Eqs. (13) e (22).



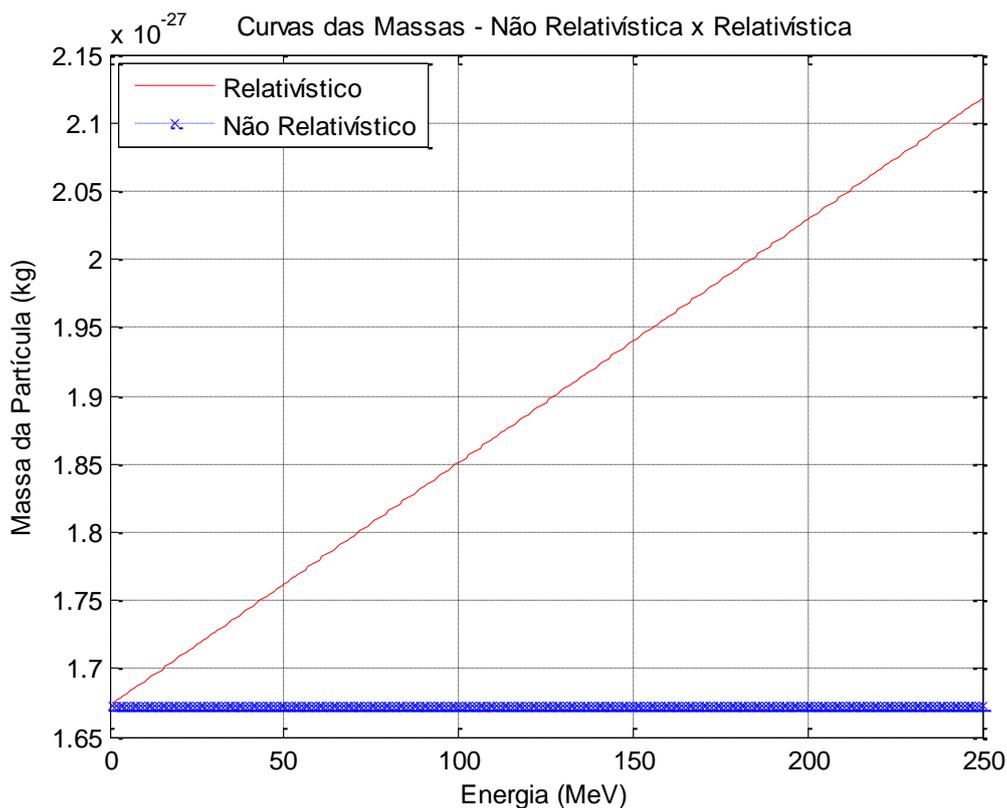
**Figura 2: Velocidade do próton em função da energia aplicada ao mesmo, para o caso não relativístico e relativístico, de acordo com a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®.**

Já na Figura 3 apresenta-se a diferença entre as velocidades não relativística e relativística em função da energia cinética, diferença essa observada na Figura 2, no espaçamento entre as curvas com o aumento da energia, e agora em destaque.



**Figura 3: Diferença entre a velocidade não relativístico e relativístico, para o próton, de acordo com a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®.**

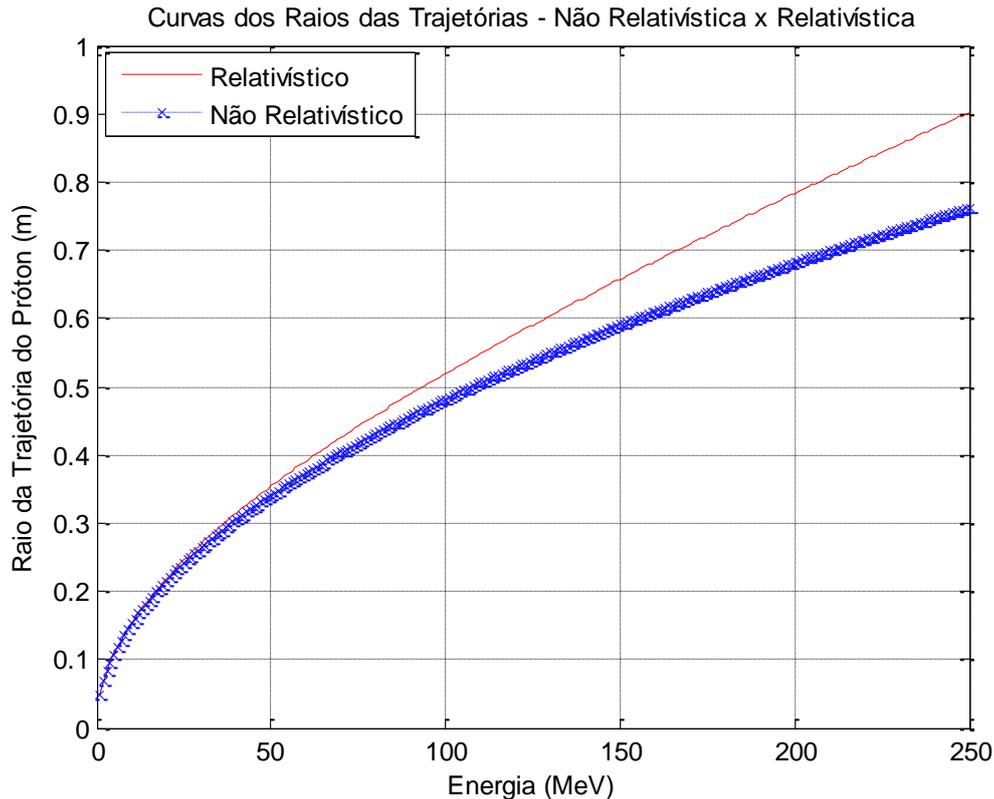
A velocidade do próton relativístico é inferior à uma análise não relativística, em função do aumento da energia da partícula, de acordo com a Figura 2. Observa-se também variação da massa relativística do próton com o aumento da energia cinética, na condição não relativística e relativística, conforme evidenciado pela Figura 4.



**Figura 4: Variação da massa do próton com o aumento da energia aplicada ao mesmo, para o caso não relativístico e relativístico, de acordo com a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®.**

Verifica-se que a massa não relativística se mantém constante, enquanto a massa relativística aumenta com o aumento da energia da partícula, no caso o próton. Dessa forma é de se esperar uma menor velocidade para a partícula em comportamento relativístico, e consequentemente um menor raio de circulação, produzindo um percurso menor do que o esperado em um ciclotron. Tal comportamento leva a perda de sincronismo com o campo elétrico na cavidade de aceleração.

Na Figura 5 apresenta-se o comportamento da energia da partícula, e o raio necessário para prover tal energia. Destaca-se que aqui tomou-se por base Eqs. (11) e (21).



**Figura 5: Raio do próton em função da energia aplicada ao mesmo, para o caso não relativístico e relativístico, de acordo com a rotina computacional desenvolvida em MATLAB®.**

Ao interpretar a Fig.5 observa-se que para uma mesma energia cinética partículas não relativísticas e relativísticas apresentam uma convolução com raios diferentes, ainda quando submetidos a um mesmo campo magnético. Em condição relativística, este raio é maior, conforme pode ser compreendido pela análise da Eq. 11, assim como pela interpretação das Figuras 2 e 4 em conjunto.

Pode-se destacar que aplicando um mesmo campo magnético a uma mesma partícula, e ao definir um determinado raio para análise, a partícula não relativística, nesse raio, terá uma velocidade superior à partícula relativística, isso por que esta última terá uma massa relativística superior a primeira, sendo, por conseguinte mais difícil sua aceleração.

## CONCLUSÃO

Foi pontuado neste trabalho que as características construtivas podem afetar algumas das principais grandezas eletromagnéticas envolvidas no processo de aceleração da partícula carregada em um Cíclotron.

Um aspecto de destaque foi elucidar o comportamento não relativístico e relativístico da partícula em um acelerador circular. Verifica-se a importância da análise relativística para avaliar os parâmetros do Cíclotron, principalmente quando se desenvolve um acelerador circular que entregue grande energia à partícula carregada. Se o aspecto relativístico não for levado em consideração todo o projeto estará em falha por falta de sincronismo, uma vez que a base do sucesso da aceleração de uma partícula carregada é aplicar a mesma uma diferença de potencial em um determinado instante específico. Se a partícula “perder” este momento, ou seja, esse sincronismo não for alcançado, o processo cíclico de aceleração não terá sucesso.

Acredita-se ainda que este trabalho tenha demonstrado a importância de determinadas áreas da engenharia que muitas das vezes são deixadas de lado, pela sua grande complexidade. Porém uma alternativa pode ser a aplicação com enfoque prático, conforme foi aqui apresentado.

## REFERÊNCIAS

KAPLAN, I., Física Nuclear, 2 ed. Ed. Guanabara Dois, 1978. 636 p.

Cyclotron Produced Radionuclides (2009) Physical characteristics and production methods. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Cyclotron Produced Radionuclides (2008) Principles and practice. International Atomic Energy Agency, Vienna.

CAMPOS, Gustavo L.; CAMPOS, Tarcísio. P. R.(2015) J Radioanal Nucl Chem DOI 10.1007/s10967-015-4383-z.

PATENTS. Disponível em: <<http://www.google.tl/patents/US1948384>>. Acesso em: 18 maio 2015.

TODA, Y., et. al. JSW’S BABY CYCLOTRON. IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. NS-30, n. 2, April 1983.

RABELO, L. A.; CAMPOS, T. P. R.. PARÂMETROS FÍSICOS DE UM PROJETO DE ACELERADOR CIRCULAR DE PRÓTONS PARA FINS DE TELETERAPIA OCULAR. In: COLAOB - Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2012, Natal. COLAOB - Congresso Latino Americano de Órgãos Artificiais e Biomateriais, 2012.

## RCT – v. 19, n. 34 (2016)

**Projeto e análise comparativa de desempenho de antena fractal para aplicações em RSSF de 915MHz**

*Luís Augusto Bronzati, Ana Lucia Mendes Cruz, Silvestre da Silva, Fernando Silvestre da Silva*

**Análise 2D da propagação de ondas eletromagnéticas geradas em frequência 700 mhz em ambientes indoor**

*Soelene B. S. Beltrame, Jose Alexandre Nalon*

**Reformation of biomass producer gas by plasma torch**

*Renato Cruz Alves, João Paulo Vissotto, Elisabete Maria Saraiva Sanchez, Caio Glauco Sanchez*

**Reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados em ensaios laboratoriais (restos de esmaltes) e fusão industrial**

*Daiane Pereira, Jair Juarez João, Alexandre Zaccaron, Vitor de Souza Nandi*

**Desenvolvimento de software embarcado baseado em modelos de computação para um medidor de energia**

*Carlos Eduardo Capovilla, Wesley Medeiros Torres, Eduardo Vicente Valdes Cambero*

**Projeto conceitual da estrutura mecânica para testes do sistema hidráulico do levante de máquinas agrícolas**

*Richard Castro, Marcos Loch, Fabio Peruch, Júlio César Santa Helena, Felipe Sepulveda*

**Caracterização da degradação superficial da interface reforço – Matriz de materiais compósitos poliméricos**

*Marcelo Capella Campos, Carlos Alberto Soufen, Carlos A. Sander, Momotaro Imaizumi, Tais L. S. Brandino*

**Análise eletromagnética em cavidade cilíndrica ressonante**

*Gustavo Lobato Campos, Tarcísio Passos Ribeiro Campos*

**Desenvolvimento de um manipulador robótico para procedimentos cirúrgicos laparoscópicos: Contribuições da engenharia mecânica**

*Anderson Cardoso de França, Roderlei Camargo*

**Modelagem e implementação de um sistema Ball and Plate**

*Douglas Henrique Caetano de Araujo, Henrique Ferreira Canova, Iervaldo Barbosa Souza, Marcelo de Freitas Sugaya, Carlos Renato Meneghetti*

# Análise eletromagnética em cavidade cilíndrica ressonante

Gustavo L. Campos<sup>1</sup>, Tarcísio P. R. Campos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga – MG, [lobato.prof@gmail.com](mailto:lobato.prof@gmail.com).

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, [tprcampos@pq.cnpq.br](mailto:tprcampos@pq.cnpq.br)

**Resumo** – O presente trabalho tem por objetivo apresentar os conceitos fundamentais relativos a uma cavidade cilíndrica ressonante, avaliando aspectos eletromagnéticos da estrutura. Será apresentado a análise eletromagnética para uma cavidade ressonante cilíndrica, e os possíveis modos de propagação de onda nessa cavidade, assim como a importância de seus aspectos geométricos. Destaca-se a validação dos cálculos analíticos de frequência de ressonância por código eletromagnético CST®.

**Palavras-chave:** Cavidade cilíndrica ressonante, radiofrequência, eletromagnetismo.

**Abstract** – The main objective of this paper is present the fundamental concepts related to a resonant cylindrical cavity, evaluating aspects such as the electromagnetic problem, related to this structure. It will be presented electromagnetic analysis for a cylindrical resonant cavity, and the possible wave modes into this kind of structure, as well the importance of its geometric aspects. There is the validation of certain items presented theoretically in this paper through CST®, computational simulation software.

**Keywords:** resonant cylindrical cavity, radiofrequency, electromagnetism.

## I. INTRODUÇÃO

Uma cavidade ressonante constitui-se de uma estrutura fina metálica preenchida com material dielétrico em seu interior, sendo que está pode ser simplificada como um guia de onda com as extremidades também fechadas com placas metálicas.

As cavidades ressonantes são estruturas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos, tendo como função básica o confinamento da onda eletromagnética em seu interior, através da reflexão da onda em suas paredes metálicas. Dentre os parâmetros operacionais da estrutura ressonante pode-se citar a frequência de ressonância e o fator de qualidade.

Atualmente as cavidades ressonantes têm emprego em sistemas de telecomunicações, como em transdutores de antenas [1], aceleradores de partículas e até mesmo motores de propulsão espacial [2] entre outras. Entretanto, muitos sistemas podem também ser analisados como constituintes de estruturas ressonantes. Observe que uma central eletrônica, pode ser analisada como uma cavidade ressonante, assim como estruturas

de automóveis, ou mesmo aeronaves. Justifica-se assim a importância do seu estudo e a compreensão básica de seu funcionamento.

Destaca-se também aspectos geométricos das cavidades ressonantes para sua melhor compreensão, como quando presentes determinados modos de propagação. Ponto importante é o fato da aplicação de simetria tal relevante para boa parte dos estudos eletromagnéticos.

## II. PROBLEMA ELETROMAGNÉTICO

As características fundamentais de uma cavidade ressonante se assemelham a de um guia de onda, uma vez que esta pode ser construída a partir de um guia de onda com extremidades fechadas pelo mesmo material constituinte de suas paredes.

No interior da cavidade ressonante compõem-se campos elétricos e magnéticos, com a energia total elétrica e magnética armazenada em seu interior. A análise da cavidade ressonante pode ser elaborada a partir das Equações de Maxwell, como segue:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= q_v \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}\quad (1)$$

cuja terminologia já é de conhecimento da literatura [3, 4].

Ao considerar uma cavidade ressonante cilíndrica formada por um elemento condutor perfeito e raio  $a$ , pode-se descrever as variáveis de campo em coordenadas cilíndricas  $(r, \phi, z)$  e assim encontrar a solução para as equações descritas em Equação 1. A solução mais simples que represente um campo elétrico axial é uma onda no modo transversal magnético, representada por  $TM_{01}$ . Esta consiste em campo elétrico com componente radial e longitudinal e em campo magnético com componente azimutal, e demais componentes nulos, ou seja, apresenta o campo elétrico na direção de propagação. Considerando então uma onda propagando no eixo  $z$  positivo, pode-se apresentar a solução das equações propostas na Equação 1 como se segue:

$$\begin{aligned}
E_r &= j \frac{k_z}{k_c} \cdot E_0 \cdot J_1(k_c \cdot r) \cdot e^{-jk_z z} \cdot e^{j\omega t} \\
E_z &= E_0 \cdot J_0(k_c \cdot r) \cdot e^{-jk_z z} \cdot e^{j\omega t} \\
H_\phi &= j \frac{k}{k_c Z_0} \cdot E_0 \cdot J_1(k_c \cdot r) \cdot e^{-jk_z z} \cdot e^{j\omega t}
\end{aligned}
\tag{2}$$

onde  $E_0$  é a amplitude do campo elétrico,  $J_0$  e  $J_1$  são funções de Bessel,  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular,  $k$  é o número de onda,  $k_z$  constante de propagação da onda,  $Z_0$  é a impedância da onda no espaço livre, e  $j$  indica componente imaginária. Destaca-se ainda as constantes presentes na Equação 2, através dos parâmetros  $k$  e  $Z_0$  como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} \tag{3}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega \tag{4}$$

As condições de contorno do problema, com campos elétricos tangenciais nulos sobre o condutor, levam a,  $J_0(k_c \cdot a) = 0$ , uma vez que  $E_z = 0$  em  $r = a$ , e assim define-se um comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ , abaixo do qual todas as ondas são amortecidas exponencialmente.

Desta forma pode-se apresentar algumas relações entre as grandezas citadas, sendo, o comprimento de corte para o modo  $TM_{01}$ ; a constante de propagação  $k_z^2$ ; o número de onda de corte  $k_c$ ; a velocidade de fase  $v_{ph}$ ; e, por fim, a relação de dispersão  $k_z^2$ , como se segue:

$$\lambda_c \approx 2,61 \cdot a \tag{5}$$

$$k_z^2 = k^2 - k_c^2 \tag{6}$$

$$k_c = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega_c}{c} \tag{7}$$

$$v_{ph} = \frac{\omega}{k_z} \tag{8}$$

$$k_z^2 = \frac{\omega^2}{v_{ph}^2} = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\omega_c^2}{c^2} \tag{9}$$

Um ponto a se destacar é a simetria presente em estruturas como as cavidades ressonantes. Ao longo do estudo de problemas eletromagnéticos muito se busca a análise de simetria, com objetivo de reduzir o nível de complexidade de um determinado problema, ou mesmo

facilitar sua compreensão. Cita-se aqui problemas clássicos como uma esfera carregada, ou mesmo um capacitor de placas paralelas, onde tanto a análise quanto os resultados podem ser avaliados sob a ótica de simetria dos problemas.

### III. PILLBOX CAVITY

A estrutura cavidade ressonante cilíndrica mais simples, equivalente a um guia de onda, trata-se da conhecida por *Pillbox Cavity* [5, 6]. A *Pillbox Cavity* é um cilindro vazio com uma superfície condutora. Destaca-se ainda que o modo  $TM_{01}$  é o modo de onda mais simples que se pode ter presente nessa estrutura, reduzindo às Eqs.2, como segue:

$$\begin{aligned}
E_r &= 0 \\
E_z &= E_0 \cdot J_0(k_r \cdot r) \cdot \cos(\omega t) \\
H_\phi &= -\frac{E_0}{Z_0} J_1(k_r \cdot r) \cdot \sin(\omega t)
\end{aligned}
\tag{10}$$

A frequência angular da *Pillbox Cavity* pode ser determinada pelo seu raio,  $r = R_{cav}$ , uma vez que não há nenhuma dependência do campo com  $z$  e  $\phi$ , conforme segue [6]:

$$\omega_0 = k_r \cdot c = \frac{2,405 \cdot c}{R_{cav}} \tag{11}$$

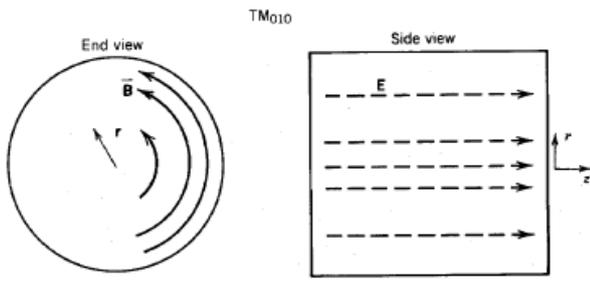
É importante destacar que em uma cavidade ressonante existe a possibilidade de uma série de modos de ondas eletromagnéticas, TE e TM. Mas uma simples relação entre comprimento e raio, pode ser útil para determinar o modo dominante para certa estrutura, conforme definido a seguir [2].

$$\begin{aligned}
\frac{L_{cav}}{R_{cav}} < 2 & \quad TM_{010} \\
\frac{L_{cav}}{R_{cav}} > 2 & \quad TE_{111}
\end{aligned}
\tag{12}$$

Na Figura 1 tem-se presente a representação da composição dos campos elétrico,  $E$ , e magnético,  $B$ , na *Pillbox Cavity* para o modo  $TM_{01}$ .

Fica também evidente pela Figura 1 a simetria geométrica radial e longitudinal para a estrutura do tipo *Pillbox*. Esta análise será destacada neste trabalho quando da apresentação dos modos dominantes para campo elétrico no interior desse tipo de cavidade ressonante.

Figura 1 – Campos elétrico e magnético para uma *Pillbox* operando em modo TM<sub>010</sub>.



Fonte: [5].

#### IV. MODELAMENTO NO CST®

As simulações computacionais têm grande valia na área do eletromagnetismo, pois muitas das vezes tornam possível uma visualização mais clara do comportamento das estruturas em análise.

Neste trabalho empregou-se o *software* CST®, via modelo de solução do tipo “*Eigenmode*”, uma vez que este é dedicado para estruturas ressonantes fechadas, já que a onda estacionária confinada no interior da estrutura metálica recebe a mesma denominação desta solução.

Existem dois métodos aplicados na solução do tipo “*Eigenmode*”, o AKS, “*Advanced Krylov Subspace*”, e o JDM, “*Jacobi-Davidson Method*”. A principal diferença desses dois métodos é que o primeiro é aplicável para modos de ressonância mais baixos, enquanto o segundo também calcula modos de ressonância superiores, assim como trabalha com meios com e sem presença de perdas.

Destaca-se também a função PBA, “*Perfect Boundary Approximation*”, mais precisa, segundo o fabricante, quando em trabalho com estruturas metálicas finas. Isso impacta diretamente o sistema de malhamento automático com estruturas hexaédricas, assim como seu refinamento adaptativo e dependente, seja de parâmetros S ou de critérios de entrada [7].

Na fase de modelamento da cavidade cilíndrica ressonante não foram consideradas questões de simetria, uma vez a mesma poderia não deixar evidente modos de propagação assimétricos no interior da estrutura, assim considerou-se a estrutura por completo.

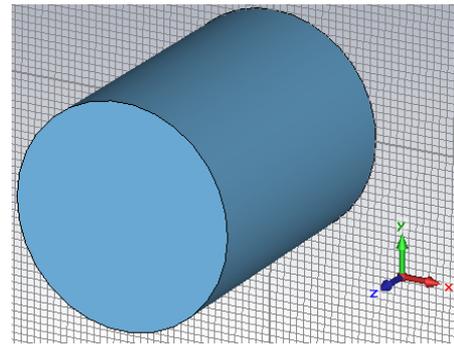
#### V. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Foram simuladas três estruturas, sendo a primeira, extraída do tutorial do *software* CST, a segunda, presente em literatura [4], e a terceira com dimensões atribuídas para atender a um modo de propagação distinto às duas primeiras estruturas.

##### A. Simulação 1

Para a estrutura simulada, ilustrada na Figura 2, com 15 cm de raio, e 40 cm de comprimento, pode-se calcular as frequências de ressonância para cada um dos dois modelos avaliados, com valores apresentados na Tabela 1.

Figura 2 – Representação da primeira estrutura cilíndrica simulada.



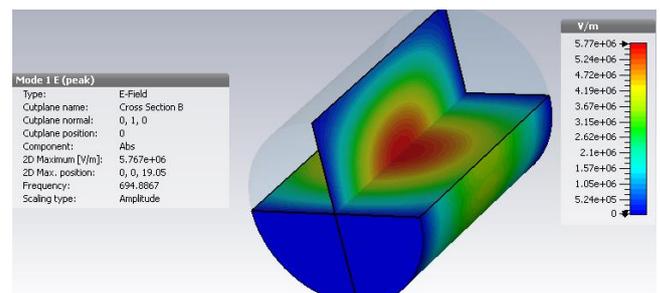
Fonte: Autor.

Tabela 1 – Modos de propagação e frequência de ressonância para a Simulação 1.

Modo de propagação	Frequência de ressonância
TM <sub>010</sub>	Equação 11 → 765 MHz
TE <sub>111</sub>	Equação 12 → 696 MHz

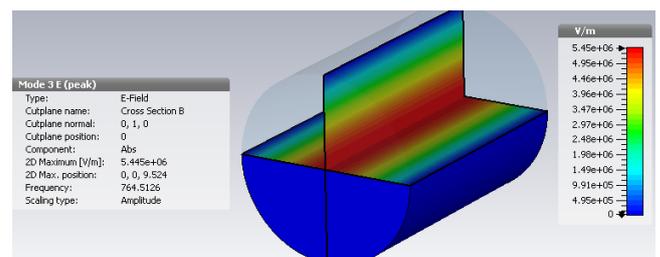
Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os comportamentos dos campos elétricos para os modos TE e TM respectivamente, simulados pelo *software* CST®. Além disso, o valor apresentado pela simulação, para as frequências de ressonância,  $f_r$ , foram, 764,5MHz e 694,8MHz, para o modo TM<sub>010</sub> e TE<sub>111</sub> respectivamente. Observa-se que estes valores estão muito próximos dos valores calculados, assim como dos valores presentes na referência.

Figura 3 – Distribuição do campo elétrico na primeira estrutura simulada – Modo TE.



Fonte: Autor.

Figura 4 – Distribuição do campo elétrico na primeira estrutura simulada – Modo TM.

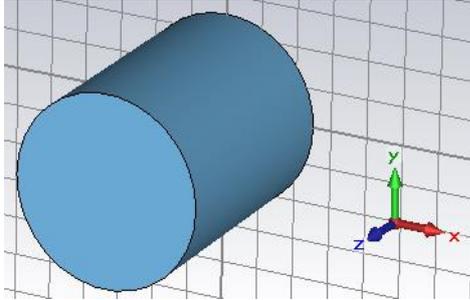


Fonte: Autor.

### B. Simulação 2

A segunda estrutura, apresentada na Figura 5, com 25 mm de raio, e 65 mm de comprimento, pode-se calcular as frequências de ressonância para cada um dos dois modelos avaliados, com valores apresentados na Tabela 2.

Figura 5 – Representação da segunda estrutura cilíndrica simulada.



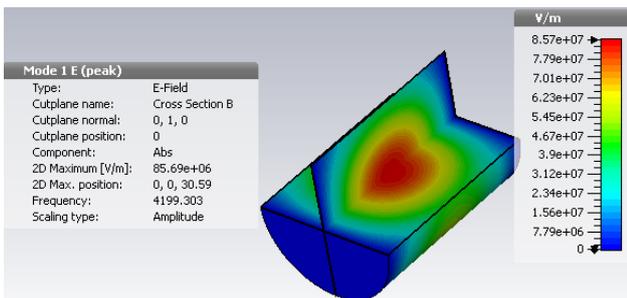
Fonte: Autor.

Tabela 2 – Modos de propagação e frequência de ressonância para a Simulação 2.

Modo de propagação	Frequência de ressonância
TM <sub>010</sub>	Equação 11 → 4,59 GHz
TE <sub>111</sub>	Equação 12 → 4,2 GHz

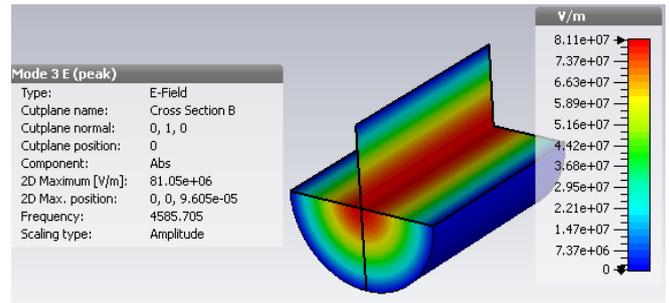
Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os comportamentos dos campos elétricos para os modos TE e TM respectivamente. Além disso, os valores de frequência de ressonância  $f_r$  obtidos pela simulação foram, 4,58GHz e 4,19GHz, para o modo TM<sub>010</sub> e TE<sub>111</sub>, respectivamente, estão novamente muito próximos dos valores calculados, assim como dos valores presentes na referência [4].

Figura 6 – Distribuição do campo elétrico na segunda estrutura simulada – Modo TE.



Fonte: Autor.

Figura 7 – Distribuição do campo elétrico na segunda estrutura simulada – Modo TM.

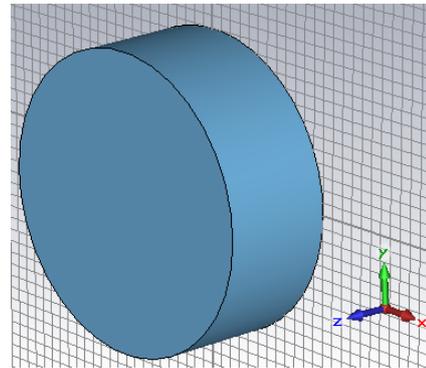


Fonte: Autor.

### C. Simulação 3

Para a terceira estrutura, apresentada na Figura 8, com 12 cm de raio, e 9 cm de comprimento, pode-se calcular as frequências de ressonância para cada um dos dois modelos avaliados, com valores apresentados na Tabela 3.

Figura 8 – Representação da terceira estrutura cilíndrica simulada.



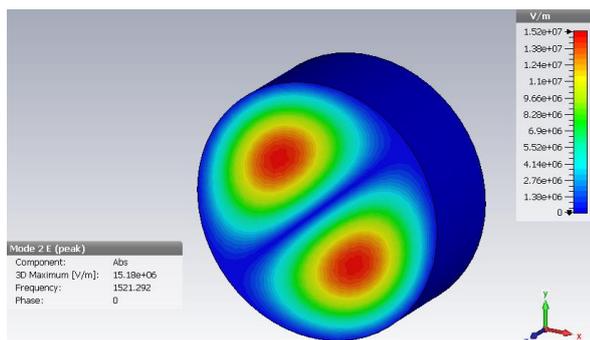
Fonte: Autor.

Tabela 3 – Modos de propagação e frequência de ressonância para a Simulação 3.

Modo de propagação	Frequência de ressonância
TM <sub>010</sub>	Equação 11 → 957 MHz
TE <sub>111</sub>	Equação 12 → 1,82 GHz

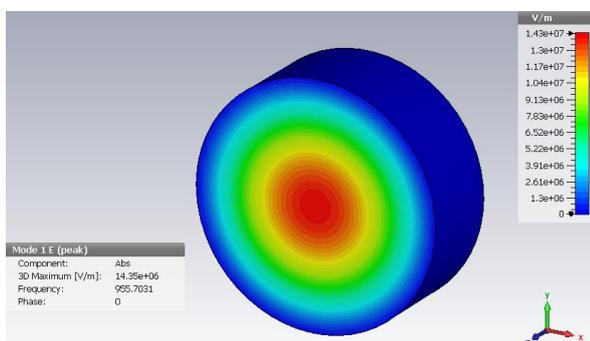
Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os comportamentos dos campos elétricos para os modos TE e TM respectivamente. Além disso, o valor apresentado na simulação para as frequências de ressonância,  $f_r$  foram, 955,7MHz e 1,52GHz, para o modo TM<sub>010</sub> e TE<sub>111</sub>, respectivamente. Estão também próximos dos valores calculados.

Figura 9 – Distribuição do campo elétrico na terceira estrutura simulada – Modo TE.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Distribuição do campo elétrico na terceira estrutura simulada – Modo TM.



Fonte: Autor.

## VI. CONCLUSÃO

Foi possível compreender os conceitos básicos referentes aos modos fundamentais de oscilação de cavidades cilíndricas ressonantes, assim como validar a teoria apresentada via simulações computacionais realizadas no *software* CST®.

Ficou evidente a importância das características geométricas quando se propõe definir cavidades ressonantes, uma vez que suas dimensões, alteram o modo de onda presente no interior da estrutura, assim como sua frequência de ressonância. Esses fatores afetam diretamente a aplicação desse tipo de estrutura nas mais diversas áreas do conhecimento.

Outro aspecto observado é o comportamento do campo elétrico simétrico, seja radial ou longitudinal, quando em análise modos dominantes de cada uma das estruturas simuladas.

Por fim destaca-se a importância da melhor compreensão dessas estruturas cada vez mais presentes em nosso mundo, mesmo que muitas das vezes dignas de ficção científica, como no motor de propulsão da NASA.

## REFERÊNCIAS

- [1] FURTADO, S. R., **Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para o detector de ondas gravitacionais Mario Schenberg**. Tese de Doutorado. São José dos Campos, INPE, 2009. Disponível em [www.inpe.br/pos\\_graduacao/cursos/ast/arquivos/teses/tese\\_sergio.pdf](http://www.inpe.br/pos_graduacao/cursos/ast/arquivos/teses/tese_sergio.pdf). Acesso em 14/04/2015.
- [2] DIAZ, C. F. R., et. al. The Development of the VASIMR Engine. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, Italy. Sept 13 to 17, 1999. Manuscript completed July 1999. NASA, Johnson Space Center, Houston, TX 77058, USA.
- [3] PAUL, C. R., **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, 2 ed. New York: Wiley-Interscience, 2006, 1016 p.
- [4] SADIKU, M. N. O., **Elements of Electromagnetics**, 3 ed. New York: Bookman, 2000, 784 p.
- [5] ALI, M. T., et. al. Air-Filled Circular Cross Sectional Cavity for Microwave Non-Destructive Testing. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 18, 2006.
- [6] Disponível em [www.uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton\\_4.pdf](http://www.uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton_4.pdf) Acesso em 03/04/2015.
- [7] Disponível em [www-pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator\\_option/3\\_RF\\_and\\_linear\\_acceleration.pdf](http://www-pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator_option/3_RF_and_linear_acceleration.pdf). Acesso em 03/04/2015.

# Cyclotron parameters for $^{11}\text{C}$ yield

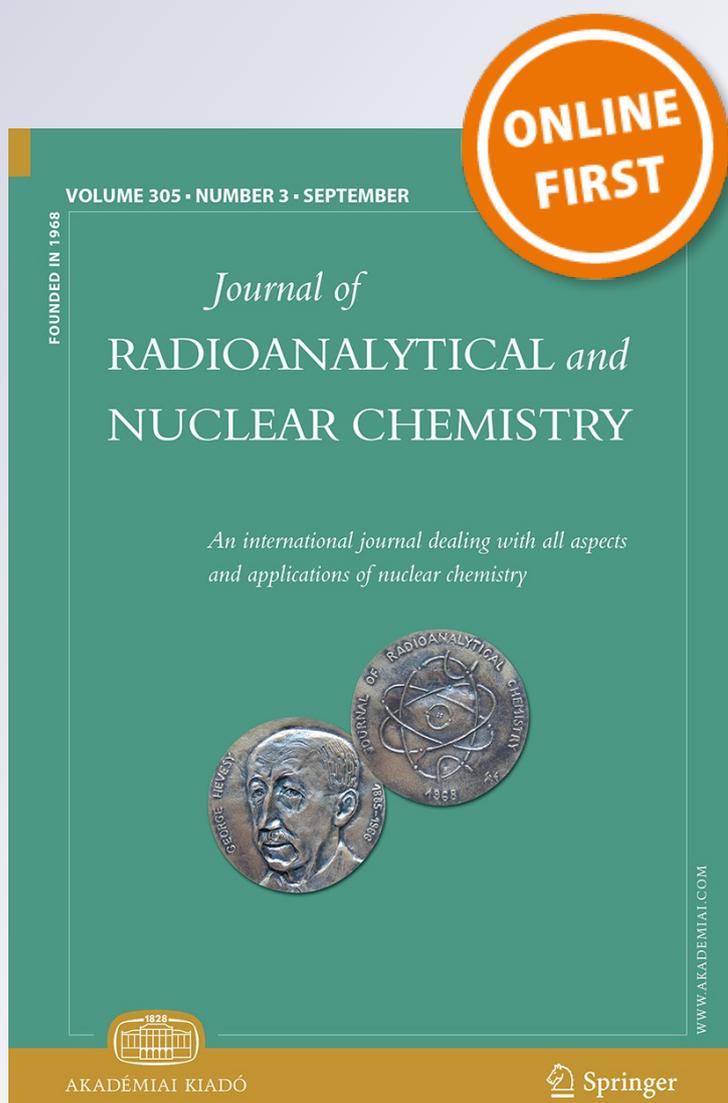
**Gustavo L. Campos & Tarcísio P. R. de Campos**

**Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**

An International Journal Dealing with All Aspects and Applications of Nuclear Chemistry

ISSN 0236-5731

J Radioanal Nucl Chem  
DOI 10.1007/s10967-015-4383-z



**Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at [link.springer.com](http://link.springer.com)".**

# Cyclotron parameters for $^{11}\text{C}$ yield

Gustavo L. Campos<sup>1,2</sup> · Tarcísio P. R. de Campos<sup>1</sup>

Received: 13 April 2015

© Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary 2015

**Abstract** Short half-life radionuclides, as  $^{11}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 20.4$  min), are of interest as precursor of many radiopharmaceuticals, like [ $^{11}\text{C}$ ] methane, [ $^{11}\text{C}$ ] cyanide, [ $^{11}\text{C}$ ] methyl iodide (Cyclotron Produced Radionuclides, in Operation and maintenance of gas and liquid targets, 2012). There are many engineering aspects for designing a cyclotron for radioisotopes production. Feasibility of nuclear reaction by cross-sections is one of the most important (Cyclotron Produced Radionuclides, in Operation and maintenance of gas and liquid targets, 2012), and consequently the nuclear reaction rates at the target. Herein, the research focus addressed the yield production of  $^{11}\text{C}$  radioisotope in order to define accelerator parameters. The aim is to establish an arbitrary value of yield (at end of bombardment, EOB), and evaluate how accelerator parameters such as, beam current and time of irradiation vary in according to the expected radioisotope yield after EOB. Data from literature for  $^{11}\text{C}$  (Kenneth, in Nucl Med Biol 31:825–827, 2004; Vandewalle, in Int J Appl Radiat Isot 34:1459–1464, 1983) was considered and applied as reference to the EOB activity equation.

**Keywords** Yield ·  $^{11}\text{C}$  · Cyclotron

✉ Gustavo L. Campos  
lobato.prof@gmail.com

✉ Tarcísio P. R. de Campos  
tprcampos@pq.cnpq.br

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, MG, Brazil

## Introduction

Radioisotope research achieved notorious advances since the cyclotron invention, especially after the Second World War. The cyclotron production of short half-life radioisotopes, such as  $^{18}\text{F}$  ( $t_{1/2} = 119$  min) or  $^{11}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 20.4$  min) has been improved the oncologic diagnosis in nuclear medicine, among other diseases.

Image scintigraphy or imuno radiation therapy are general categories of medical protocols in which radioisotopes are systemically applied on humans. In image scintigraphy, short half-life proton-rich radioisotopes show advantages, of a low absorbed dose due to its effective lower half-life independent of its biological uptake. In addition, it provides minimal radioactive waste disposal [4]. However, to use these radioisotopes, a nearby proton accelerator is mandatory. Thus the overall medical application of short half-live radioisotopes, such as  $^{11}\text{C}$ , in a balanced way in Brazilian territory, requires sophisticated technology and medical centers equipped with proton-cyclotrons.

For the radioisotope cyclotron production, is mandatory a particle beam with enough energy and current, to enable certain nuclear reaction. Usually, nuclear centers were looking for a cyclotron with a large energy range to produce a set of different radioisotopes, but recently it is observed the development of small and less expensive cyclotrons to produce specific radioisotopes [5]. Although accelerators which gives more energy to proton beam, and can produce a great number of radioisotopes, could be analyzed too [6].

The present study aims to investigate some basics parameters for a cyclotron, specific beam ion current, and time of irradiation, to produce  $^{11}\text{C}$  radioisotope, to a specific yield reaction.

## Theory

### Cyclotron production of radioisotopes

Cyclotrons are the most commonly used devices for acceleration of charged particles to high energies sufficient for sustaining a required nuclear reactions [4]. The basic characteristics of all cyclotrons are the same. There is a charge particle source to produce ions, an acceleration chamber to provide particle kinetic energy and a magnet to hold the particles on a circular path [7]. An ion current with a certain kinetic energy will be the basis for the nuclear reaction that will occur in cyclotron's target, to transmute the target nuclei to a specific radioisotope. Stands out that it is not enough just taken the particle beam to the maximum kinetic energy, but with an adequate kinetic energy range which depends on the reaction cross section profile, related to the radioisotope of interest. In other words, it is extremely important to control the parameters of a cyclotron to deliver a beam with necessary characteristics to increase the probability of an expected nuclear reaction.

<sup>11</sup>C is a short 20.4 min half-life proton-rich radioisotope that has several advantages for nuclear medicine. It disintegrates by positron emission and the radiation of two-photons from positron-annihilation is simultaneously detected on a positron emitting tomography [8]. It is know that carbon is one of the building blocks of all organic matter, which increases the interest of the radiopharmaceutical production.

The production of <sup>11</sup>C in cyclotrons is often based on the reaction <sup>14</sup>N(p,α)<sup>11</sup>C [7], but other reactions like, <sup>11</sup>B(p,n)<sup>11</sup>C, or <sup>11</sup>B(d,n)<sup>11</sup>C [8], are possible. <sup>11</sup>C radioisotope has 99.8 % of positron emission at a β<sup>+</sup> decay mode to <sup>11</sup>B with a maximum energy approximately of 970 keV, and 0.2 % by electron capture [7]. The cross section of reaction <sup>14</sup>N(p,α)<sup>11</sup>C, is shown in Fig. 1 [9].

The <sup>11</sup>C radioisotope is not taken off directly from cyclotron's target, but through the <sup>11</sup>C dioxide gas, <sup>11</sup>CO<sub>2</sub>, and for that the cyclotron's target is a nitrogen gas. So the cyclotron's target is one of the areas with increases researches [2, 3, 10].

### Radioisotope yield

The rate of radioisotope production is dependent on a number of factors, as follows: the magnitude of the reaction cross-section as a function of energy; the incident particle energy; the thickness of the target, which will determine the exit particle energy; and, the flux of incoming particles, which is related to the beam current [7].

The production rate of radioisotopes can be estimate by using:

$$Y(t) = \frac{N_L H}{M} I (1 - e^{-\lambda t}) \int_{E_1}^{E_2} \frac{\sigma(E)}{(dS/dx)} dE \quad (1)$$

where  $Y$  is the activity of the product (mCi),  $N_L$  is Avogadro's number (mol<sup>-1</sup>),  $H$  is the enrichment of the target nuclide (mol),  $M$  is the mass number of the target element (u),  $I$  is the beam current (A),  $dS/dx$  is the stopping Power (eV/m),  $\sigma(E)$  is the production cross-section at energy  $E$  (b),  $\lambda$  is the decay constant of the product, and  $t$  is the time of irradiation (s) [4]. Stands out in Eq. (1) two terms:  $(1 - e^{-\lambda t})$ —Saturation factor or “build-up”.

$\frac{N_L H}{M} \int_{E_1}^{E_2} \frac{\sigma(E)}{(dS/dx)} dE$ —Saturation yield.

The Eq. (1) shows that production rate of radioisotope is related with energy, current beam of particles, as well as the time of irradiation bombardment.

An important value for radioisotopes applications is related to its reaction yield at the end of production, known as EOB (end of bombardment). A particular isotope or a drug must have a minimum value of EOB to produce a chemical or biological effect.

### Numerical simulation

The radioisotope production goal is to deliver with a certain amount of EOB defined by the application to which it is designed. Thus, the analysis proposed in this paper is to evaluate parameters of circular accelerator, specially beam current and time of irradiation, and thereby obtain a specific EOB. To this end, let us to rewrite Eq. (1) to estimate EOB value, as follow:

$$A(t) = Y_{\text{sat}} (1 - e^{-\lambda t}) I \quad (2)$$

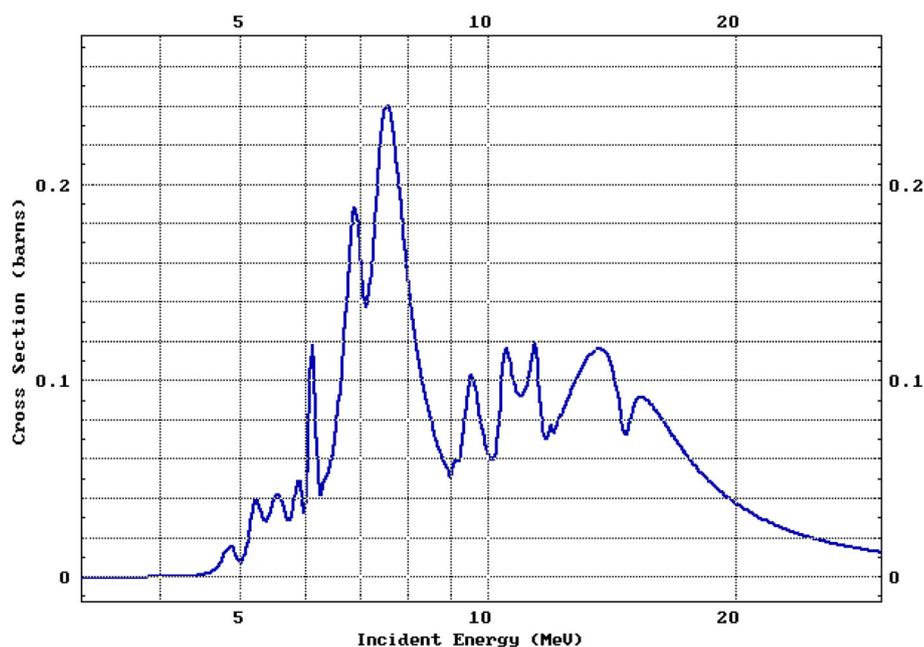
where  $A$  is the EOB required,  $Y_{\text{sat}}$  is the “Saturation yield”,  $\lambda$  is the Decay constant,  $t$  is the Time of irradiation,  $I$  is the Beam current.

Thus for known values of EOB and saturation yield, values of beam current or irradiation time can be evaluated.

### Results and discussion

A Matlab algorithm was developed to solving Eq. (2), where we applied 20.4 min for the decay constant of the product, because we work for <sup>11</sup>C production. This algorithm is validate based on reference data [2, 3]. Table 1 shows the values of beam current for different conditions of variables, EOB,  $Y_{\text{sat}}$  and  $t$ .

Results presents in Table 1 are more than 90 % closer to the reference values.

**Fig. 1** Excitation function for the  $^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$  reaction [9]**Table 1** Results of beam current ( $\mu\text{A}$ ) for Matlab routine, using measurement or experimental datas from [2] where beam current is  $20 \mu\text{A}$ 

Input datas from [2]			Output
EOB (mCi)	$Y_{\text{sat}}$ (mCi)	$t$ (min)	$I_{\text{Matlab}}$ ( $\mu\text{A}$ )
337	99	5	21.79
541	89	10	21.10
870	86	20	20.52
1060	82	30	20.23
1184	79	40	19.43
1310	75	60	20.08

Now the numerical solution presented in this study is compared with the experimental results from Ref. [3], which an EOB of 1500 mCi, a  $Y_{\text{sat}}$  of 225 mCi/ $\mu\text{A}$ , with  $t$  of 20 min and  $I$  of 15  $\mu\text{A}$  were adopted. Working with these data in our algorithm, we obtained a beam current of 13.52  $\mu\text{A}$ , which demonstrated to be more than 90 % closer to this reference data.

It is important to mention that both references, [2, 3] works with experimental or measured values, where the input datas are “beam current” and the “irradiation time”, and the output datas are “EOB” and “ $Y_{\text{sat}}$ ”. Already this paper deals with the opposite condition, with the values given in the references to “EOB” and “ $Y_{\text{sat}}$ ” (like input datas), were determined the “irradiation time” and the “beam current” (output datas).

## Conclusions

The purpose of this study was to evaluate the cyclotron parameters, specific beam current and irradiation time, to obtain certain values of EOB in radioisotope production.

Thinking in EOB, we have four parameters that can increase it: target isotope concentration, energy in the target, time of irradiation, and beam ion current. Therefore, with the present algorithm two parameters not associated with the cyclotron target can be defined. The adoption of this algorithm in preliminary stages of cyclotron design can be of great value to meet medical application requirements to physical cyclotron parameters.

## References

1. Cyclotron Produced Radionuclides (2012) Operation and maintenance of gas and liquid targets. International Atomic Energy Agency, Vienna
2. Buckley KR, Jilvan S, Ruth TJ (2004) Nucl Med Biol 31:825–827
3. Vandewalle T, Vandecasteele C (1983) Int J Appl Radiat Isot 34:1459–1464
4. Cyclotron Produced Radionuclides (2008) Principles and practice. International Atomic Energy Agency, Vienna
5. Sajjad M, Lambrecht RM (1993) Nucl Instrum Methods Phys Res B79:911–915
6. Yoon S-P, Hong I-S, Cho Y-S (2010) J Korean Phys Soc 56:2202–2207
7. Cyclotron Produced Radionuclides (2009) Physical characteristics and production methods. International Atomic Energy Agency, Vienna

8. Perris G, Lane RO, Tong JY, Matthews JD (1974) Int J Appl Radiat Isot 25:19–23
9. Evaluated Nuclear Data File (2014). <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>. Accessed 14 May 2014
10. Vandecasteele C, Strijckmans K (1985) Nucl Instrum Methods Phys Res A236:558–562