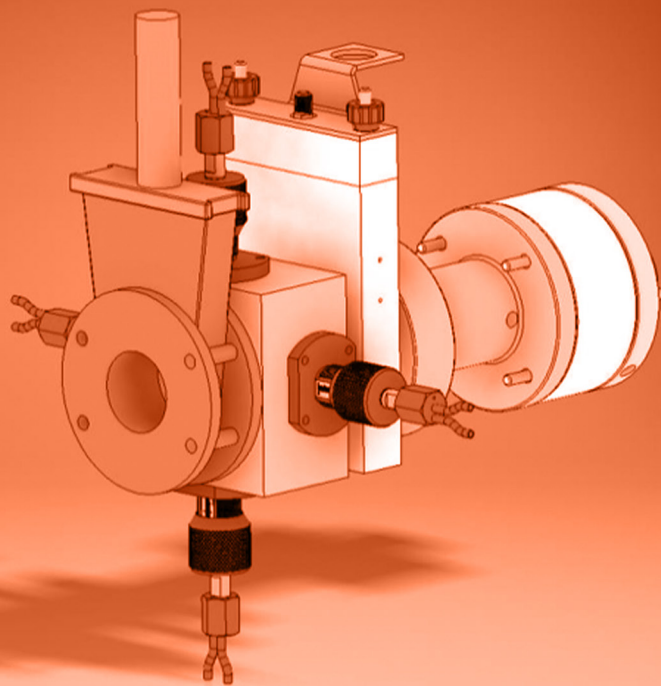


MAURO LUCIO BORGES LEMOS

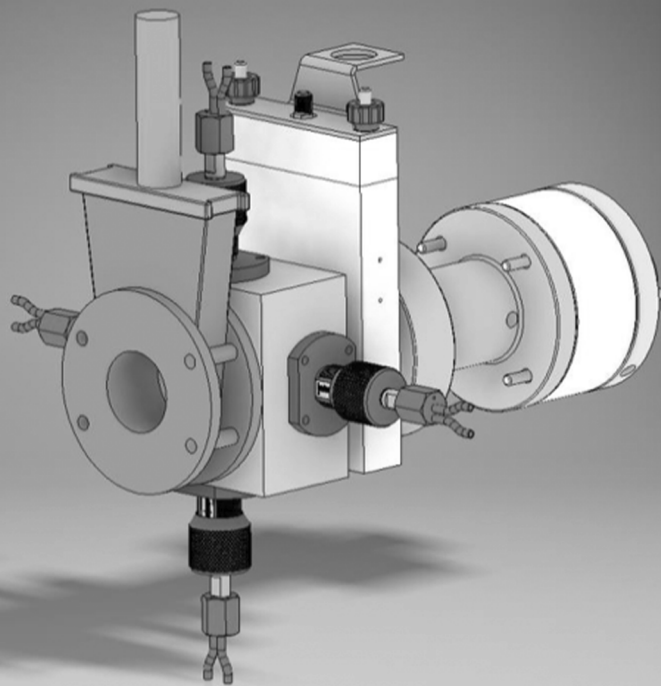


PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO  
DE FEIXES PARA O ACELERADOR DE PARTÍCULAS

---

# CÍCLOTRON CV 28

MAURO LUCIO BORGES LEMOS



PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO  
DE FEIXES PARA O ACELERADOR DE PARTÍCULAS

---

# CÍCLOTRON CV 28

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

2023 by Atena Editora

**Projeto gráfico**

Copyright © Atena Editora

Camila Alves de Cremona

Copyright do texto © 2023 Os autores

Luiza Alves Batista

Copyright da edição © 2023 Atena

Nataly Evilin Gayde

Editora

**Imagens da capa**

iStock

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

**Edição de arte**

Open access publication by Atena

Luiza Alves Batista

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
 Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
 Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
 Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
 Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá  
 Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco  
 Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
 Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
 Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
 Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
 Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
 Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas  
 Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
 Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes  
 Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
 Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
 Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
 Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
 Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá  
 Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
 Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



# Projeto e desenvolvimento de um sistema de irradiação multipropósito com diagnóstico de feixes para o acelerador de partículas Cíclotron CV-28

**Diagramação:** Letícia Alves Vitral  
**Correção:** Yaiddy Paola Martinez  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** O autor  
**Autor:** Mauro Lucio Borges Lemos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
L557	<p>Lemos, Mauro Lucio Borges  Projeto e desenvolvimento de um sistema de irradiação multipropósito com diagnóstico de feixes para o acelerador de partículas Cíclotron CV-28 / Mauro Lucio Borges Lemos. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.</p> <p>Formato: PDF  Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  Modo de acesso: World Wide Web  Inclui bibliografia  ISBN 978-65-258-1167-3  DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.673231204">https://doi.org/10.22533/at.ed.673231204</a></p> <p>1. Engenharia nuclear. I. Lemos, Mauro Lucio Borges.  II. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.48</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

## DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

# DEDICATÓRIA

Dedico principalmente à minha mãe Terezinha de Jesus Borges Lemos e aos meus irmãos Eleziel e Elizabeth pelo amor, amizade, paciência, compreensão, companheirismo e incentivo ao longo deste trabalho.



Ao Instituto de Engenharia Nuclear, em especial à Divisão de Radiofármacos, pela oportunidade e encorajamento; pelo imprescindível apoio no desenvolvimento e construção do protótipo.

Aos Doutores Julio Cezar Suita e Celso Marcelo Franklin Lapa, professores, cientistas e servidores que orgulham a sociedade com seus saberes e honraram-me sendo meus orientadores.

Agradeço ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação do IEN que disseminou conhecimentos com esmero.

A Hasenclever Cardoso de Souza, Reinam Batista Dutra Sereno e Ulisses de Freitas Carneiro da Graça, servidores comprometidos e de extrema dedicação no que se propõem, sobretudo, colaborando com a confecção e montagem do sistema aqui apresentado.

Meus agradecimentos aos colegas de turma que com amizade e companheirismo dividiram as incertezas iniciais e compartilharam a vitória final.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, por fomentar a pesquisa científica e por sua contribuição efetiva na aquisição de insumos necessários aos experimentos propostos.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste sonho.

# EPÍGRAFE

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas;  
é quem faz as verdadeiras perguntas”.

(Claude Lévi-Strauss)

Este livro é fruto de minha dissertação do Mestrado Acadêmico em Ciência e Tecnologia Nucleares do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), unidade técnica da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Tenho o privilégio de ser servidor público nesta Instituição há 40 anos; todos esses anos fui operador do acelerador de partículas Cíclotron CV-28, o que me proporcionou ser um atento observador da grandeza de contribuições e oportunidades que essa máquina entrega à Sociedade.

No processo de aprendizagem e domínio das técnicas foi possível desenvolver uma nova linha de feixe dotada de um sistema que viabilizou a irradiação, no Cíclotron CV-28, de alvos extensos e de geometria variável para a realização de estudos e desenvolvimento de aplicações de técnicas nucleares e análises de materiais por ativação em condições de irradiação até então não disponíveis.

Minha modesta intenção com esta publicação é divulgar um pequeno seguimento neste vasto mundo nuclear, ainda estigmatizado e, assim colaborar para a desmitificação acerca do uso da energia nuclear, disseminando seus benefícios.

O Projeto e desenvolvimento de uma nova linha de feixe dotada de um sistema que viabilize a irradiação no Cíclotron CV-28 do Instituto de Engenharia Nuclear de alvos extensos e de geometria variável tornou-se necessário para a realização de estudos e desenvolvimento de aplicações de técnicas nucleares e análises de materiais por ativação em condições de irradiação até então não disponíveis. Este sistema, que poderá ser utilizado em irradiações com feixes de prótons, alfas, deutério e hélios ( $\text{He}^3$ ) a energias variáveis, é composto por dispositivos de: proteção, interceptação, colimação e medição da intensidade do feixe, de forma a possibilitar a realização de irradiações em condições controláveis e reproduzíveis. Para tanto, peças em alumínio e PVC foram usinadas de forma a construir os componentes do sistema, notadamente colimadores com 13 mm e 9 mm de diâmetro, um dispositivo de colimação de quatro setores, um “beam stop”, duas flanges de isolamento elétrico e um porta alvo (com janela degradadora). Identificou-se também a necessidade de se dotar o sistema aqui desenvolvido de um circuito de refrigeração próprio à água deionizada que é responsável pela refrigeração de todos os seus componentes que possam ter contato com o feixe. O sistema conta ainda com conexões para vácuo, que possibilitam fazer um pré-vácuo em sua câmara de irradiação, de forma que a mesma possa ser interligada a linha de transporte de feixe do Cíclotron CV-28, sem causar danos ao vácuo do mesmo. A condição para se fazer esta interligação é a obtenção de um pré-vácuo na ordem de  $10^{-4}$  torr. Os resultados experimentais obtidos com a realização de irradiações de alvos metálicos especialmente desenvolvidos para testar o sistema, que é tema da presente dissertação, atestam a confiabilidade e reproduzibilidade das condições de irradiação, o que viabilizam o desenvolvimento e emprego de novas unidades de irradiação a serem incorporadas ao mesmo. Esse sistema de irradiação já está sendo utilizado na linha 2 do CV-28.

**Palavras-chave:** Cíclotron CV-28, feixes de prótons, colimadores, câmara de irradiação, alvos metálicos.



The design and development of a new beam line equipped with a system that enables the irradiation of targets with large dimensions and irregular geometry in the Instituto de Engenharia Nuclear's CV-28 cyclotron, became necessary in order to carry out studies and development of nuclear application technics as well as the analysis of materials by its activation in irradiation conditions until now not available in this facility.

This system, which can be used in radiation with protons, alphas, deuterium and helions (He3) beams at different energies, consists of devices that: protect, intercept, collimate and measure the beam intensity, in order to enable irradiation beams in controlled and reproducible conditions. For this purpose, pieces of aluminum and PVC were machined in order to build the system components, especially 13 mm and 9 mm diameter collimators, a four sectors collimation device, a beam stop, two electrically insulated flanges, and a target holder (with a degradation window). It was also identified the necessity to supply the system here developed with a proper cooling circuit that uses deionized water which is responsible for the cooling of all components that may come in contact with the beam. The system also has connections for vacuum, which enable to make a pre- vacuum in its irradiation chamber in order to it can be interconnected to the CV-28 cyclotron's beam transport line, in order to avoid vacuum break down. The condition for making this interconnection is to obtain a pre-vacuum in the order of  $10^{-4}$  torr.

The experimental results we have obtained with the completion of irradiation performed in metal targets specifically designed to test the system, that is the subject of this dissertation, attest the reliability and reproducibility of its irradiation conditions, which enable the development and use of new irradiation apparatus that is attached in it. This irradiation system has already been used in the CV- 28's line 2

**Keywords:** cyclotron CV-28, proton beams, collimators, irradiation chamber, metal targets.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CNEN</b>	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<b>CNPq</b>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<b>DIRA</b>	Divisão de Radiofármacos
<b>FDG</b>	Flúor-desoxiglicose
<b>IEN</b>	Instituto de Engenharia Nuclear
<b>MIBG</b>	Meta-iodobenzilguanidina

**SUMÁRIO**

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>ACELERADORES DE PARTÍCULAS - HISTÓRICO E FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>2</b>
FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO CICLOTRON .....	3
CÍCLOTRON CV-28 DO IEN-CNEN/RJ .....	5
LINHAS DE TRANSPORTE DE FEIXES .....	9
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
SISTEMA DE IRRADIAÇÃO .....	13
VÁLVULA DE GAVETA .....	14
COLIMADOR DE QUATRO SETORES .....	14
PARADOR DE FEIXE .....	15
PORTA ALVOS .....	16
COLIMADOR CIRCULAR.....	17
Colimador circular (9 mm).....	18
CÂMARA DE IRRADIAÇÃO INSTALADA .....	19
SISTEMA ELETRÔNICO DE COMANDO E MONITORAÇÃO .....	19
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
TRANSMISSÃO E ALINHAMENTO DO FEIXE DE PRÓTONS .....	21
DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO PERFIL DE ATIVAÇÃO.....	21
Primeira irradiação .....	22
Segunda irradiação.....	23
ATIVAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 .....	23
DETECTOR DE GERMÂNIO HIPERPURO – HPGE .....	24
Espectros da primeira irradiação .....	25
Espectros da segunda irradiação .....	28
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>31</b>

<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>33</b>
<b>SOBRE O AUTOR .....</b>	<b>34</b>



# INTRODUÇÃO

Em aplicações de técnicas nucleares o dispositivo desenvolvido permite irradiar áreas bem definidas com dimensões de alguns centímetros homogeneamente, viabilizando análises superficiais importantes em estudos, tais como, determinação de taxas de desgaste de peças metálicas, análise por ativação com partículas carregadas, radiografia com partículas carregadas e a determinação de perfil de concentração de hidrogênio em amostras metálicas.

Poderá também ser utilizado no estudo de danos por irradiação com o uso do Cíclotron CV-28, pois uma distribuição homogênea do feixe de partículas carregadas sobre uma área relativamente extensa (da ordem de  $\text{cm}^2$ ) reproduz adequadamente as condições de irradiação dos elementos estruturais de um reator nuclear. Este dispositivo também pode ser útil no estudo de técnicas e implantação de íons.

O desenvolvimento do protótipo foram realizados estudos e projeto, confecção, montagem, testes (vácuo, isolamento elétrico, refrigeração e movimento), por último irradiação com as condições de operação com a ativação de amostras metálicas e verificação da atividade induzida com o uso de um detector HPGe.

O propósito da instalação deste dispositivo é possibilitar o acoplamento com diferentes módulos de irradiação e assim viabilizar a irradiação de alvos de várias formas e tamanhos e que, inclusive, não necessitam estar confinado num ambiente com vácuo para serem irradiados.

Os objetivos deste trabalho são o projeto, desenvolvimento, construção, instalação e teste de um sistema composto de uma câmara de irradiação multipropósito e equipamentos para o diagnóstico de feixe na linha nº 2 do Cíclotron CV-28, da Divisão de Radiofármacos do Instituto de Engenharia Nuclear no Rio de Janeiro.

# ACELERADORES DE PARTÍCULAS - HISTÓRICO E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os aceleradores tiveram um desenvolvimento notável no período de 1926 a 1932 pelo interesse que se tinha nas investigações nucleares e, principalmente, pela necessidade de se produzir feixes de raios-x muito penetrantes, que serviriam para obter radiografias de peças de espessuras maiores. (ARRUDA, 1996).

Em 1928 o físico norueguês Rolf Widerøe (WILDERÖE, 1928), desenvolveu o primeiro acelerador linear, então utilizado na aceleração de íons de sódio (Na) e de potássio (K). Esse tipo de acelerador funcionava com tensões mais baixas do que a dos aceleradores subsequentes, que eram geradas por condensadores que transportavam as partículas através de campos elétricos relativamente fracos, obrigando-as a percorrer várias vezes o mesmo trajeto para atingir a energia final.

Em 1929, o físico norte-americano Robert Jamison Van de Graff (VAN DE GRAFF, 1931) construiu o acelerador linear comumente chamado pelo seu nome: Van de Graff. Os aceleradores desse tipo são dispositivos muito seguros e confiáveis que ainda são muito empregados em pesquisas básicas e aplicações de técnicas nucleares até os dias de hoje. Também devem ser citados como desenvolvimentos associados a esse tipo de acelerador os aceleradores de Van de Graff Tandem e o acelerador Péletron Tandem (VAN DE GRAFF, 1931).

Os aceleradores lineares ainda encontram aplicações, especialmente para produção de feixes de elétrons que são aplicados com diferentes propósitos nos mais variados campos de aplicação, notadamente em aplicações de técnicas nucleares na indústria (BORRELY, 2016).

Com a necessidade de se contornar a limitação imposta pelo projeto dos aceleradores lineares às energias alcançáveis pelas partículas aceleradas, em razão da dependência dessas com o comprimento do acelerador, chegou-se ao conceito do acelerador circular, em que a partícula passa a descrever uma trajetória elíptica. Fazem parte desse grupo os aceleradores do tipo Cíclotron e Betatrón.

Com o advento da tecnologia PET houve um forte aumento no número de aceleradores do tipo cíclotron instalados em todo o mundo, assim como no Brasil. De 1995 para 2015 o número de Cíclotrons instalados no País cresceu cerca de 500% (de dois para dez). Esse número continua crescendo, pois segundo informações extras oficiais do órgão licenciador da CNEN, o número de licenças concedidas ou em fase de concessão para

novos cíclotrons chega a dezessete.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO CICLOTRON

O propósito de um cíclotron é acelerar diversas partículas a diferentes energias, por vez. Sua versatilidade permite sua utilização nos mais variados campos: pesquisa básica, aplicação de técnicas nucleares e outras. Como já mencionado sua criação data de 1932, tendo sido desenvolvido em Berkeley, por Ernest Lawrence.

O Cíclotron original acelerava partículas tais como prótons e dêutrons à energia de dezenas de milhões de elétrons volts.

O Cíclotron de Lawrence usava eletrodos em forma de **D** (chamado Dee), separados por um pequeno espaço vazio, onde se dá a aceleração das partículas. O Cíclotron também possuía dois eletroímãs que produziam um campo magnético circular e uniforme. Uma voltagem oscilante criava um campo elétrico através do espaço vazio para acelerar as partículas (íons) a cada volta. Como as partículas se moviam rapidamente, os raios de seus caminhos circulares se tornavam maiores até que atingissem o alvo no círculo mais externo. O Cíclotron de Lawrence mostrou-se eficaz, entretanto, não alcançava as energias dos aceleradores circulares modernos. A figura 1 demonstra o sistema de aceleração de partículas de um cíclotron circular.

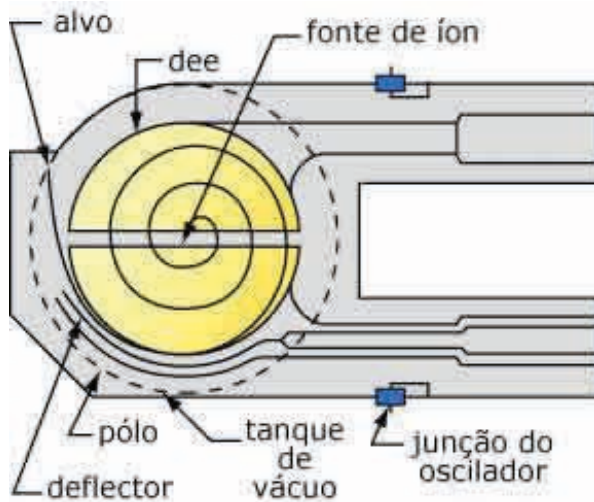


Figura 1 - Desenho esquemático do sistema de aceleração de partículas de um cíclotron.

Na figura 1 o tanque (câmara) de vácuo encontra-se localizado entre os polos do eletroímã (círculo tracejado), esses criam um campo magnético  $B$ , perpendicular ao plano dos Dees.

A fonte de íons localizada no centro do cíclotron é responsável pela produção das

partículas, removendo elétrons das moléculas de gás por centelhamento. Estas partículas são aceleradas através da combinação dos campos elétrico e magnético.

A existência do campo magnético provoca nos íons um movimento circular no plano dos Dees, no entanto, sempre que o íon atravessa o intervalo entre os dois Dees, é acelerado pelo campo elétrico e sua trajetória tem a forma de uma espiral que se inicia na fonte do íon, em consequência da aceleração em múltiplas passagens. Depois que o íon adquire a energia estabelecida ele é defletido em um canal e dirigido para o alvo que se deseja bombardear, ou linha de transmissão.

Em um ciclotron projetado para acelerar íons positivos de carga **q** e massa **m**, teremos a realização de uma trajetória circular dessas partículas, induzida pelo campo magnético **B**, com um de raio **r** e velocidade constante **v**. A aceleração centrípeta de cada íon será dada então por **a = v<sup>2</sup> / r**. A e a força centrípeta é fornecida pela expressão abaixo:

$$\frac{mv^2}{r} = q \cdot v \cdot B \quad (1)$$

Esta condição ocorre no interior dos Dees, onde o campo elétrico é zero e a partícula descreve uma trajetória circular de raio **r** igual a:

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (2)$$

Dessa expressão fica evidente que o raio da trajetória da partícula e sua velocidade são proporcionais. Os íons são acelerados gradativamente, a cada passagem pelo espaço entre os Dees, pela diferença de potencial alternada, aplicada entre esses eletrodos. Quando as partículas, em ressonância, penetram no interior do Dee, há a coincidência com a inversão da polaridade do campo elétrico, induzida pelo sistema de radiofrequência, que resultará numa nova aceleração ao atravessar o intervalo seguinte entre os Dees. A cada passagem sob a ação do campo elétrico, a partícula sofre um incremento em sua velocidade, e consequentemente um aumento do raio de sua trajetória.

Esse processo acontece até o momento em que a partícula atinge a órbita mais externa dos Dees, que corresponde a um raio **R**, onde encontra-se um dispositivo chamado “defletor” (figura 1), responsável pela extração do feixe de partículas, direcionando-as para um alvo ou linha de feixe. Essa extração por deflexão se dá pela ação de um campo elétrico bem localizado, aplicado por uma peça em forma de septo, que possibilita a remoção da última órbita sem interferir nas órbitas mais internas.

Os ciclotrons que aceleram íons negativos (-H) realizam a extração do feixe por meio de “strip foils” – remoção dos elétrons por meio de uma folha fina de carbono.



A energia cinética, **K**, da partícula carregada emergente de um ciclotron de raio **R** é dada por:

$$K = \frac{(q.B.R)^2}{2m} \tag{3}$$

A velocidade angular,  $\omega = \frac{v}{r}$ , é dada por:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{q}{m} B \tag{4}$$

O que torna evidente que num campo magnético constante, a velocidade angular *m* dependerá da intensidade do campo magnético **B** e da razão  $\frac{q}{m}$ .

A energia cinética da partícula acelerada em um ciclotron é diretamente proporcional ao raio do acelerador, restringindo-se a um extremo em razão de efeitos relativísticos. A limitação dá-se porque a frequência do movimento circular depende da velocidade da partícula, quando esta atinge velocidades próximas a da luz.

### CÍCLOTRON CV-28 DO IEN-CNEN/RJ

O ciclotron, modelo CV-28, fabricado pela "The Cyclotron Co." (THE CYCLOTRON, 1974), e (FURLANETTO, 1998), foi montado e instalado no Instituto de Engenharia Nuclear (Ilha do Fundão) durante o ano 1974, sendo na época o primeiro ciclotron compacto de energia variável instalado no País. Foi inaugurado no dia 31 de dezembro de 1974, com os propósitos de ser utilizado em pesquisa básica em física atômica e nuclear, produção de radioisótopos para uso em medicina nuclear, biologia, agricultura e indústria, como também em análise por ativação e estudos de danos por irradiação em materiais empregados em reatores. O CV-28 tem capacidade de acelerar quatro tipos de partículas, as quais são produzidas a partir de gases. A tabela abaixo mostra os gases utilizados e as respectivas partículas ou íons que são produzidas, como também as energias máximas aceleradas para cada uma delas.

Gás	Partícula	Energia Máxima
Hidrógeno	Próton (p)	24Me V
Deutério	Deuteron (d)	14Me V
Hélio 3	Hélions ( <sup>3</sup> He)	36Me V
Hélio 4	Alfa (α)	28Me V

Tabela 1 – Partículas produzidas pelo Ciclotron CV-28 do IEN-CNEN/RJ.

Apesar dessa máquina apresentar uma boa versatilidade com relação aos tipos de partículas aceleradas, ela está ajustada para acelerar apenas prótons com energia máxima.

Isso ocorre em função da grande necessidade que se tem em produzir radiofármacos para a área da Medicina Nuclear, um dos principais objetivos do IEN-CNEN/RJ. No caso do CV-28, são rotineiramente produzidos  $^{123}\text{I}$ ,  $^{18}\text{F}$  e MIBG. Para produzir esses radioisótopos trabalha-se com feixes de prótons a energia máxima (24 MeV) e com uma faixa de corrente que varia entre 10  $\mu\text{A}$  e 30  $\mu\text{A}$ . Cabe esclarecer que como a quantidade de radioisótopo produzida é diretamente proporcional à corrente ( $\mu\text{A}$ ) e ao tempo de irradiação (horas), devido às limitações de corrente, essas irradiações se estendem por um longo tempo consecutivo, tornando impraticável modificar os parâmetros operacionais da máquina necessários a experimentos para pesquisa em geral com o emprego de outros tipos de feixes, pois não haveria tempo suficiente para retorná-los para as condições necessárias às produções rotineiras, podendo comprometer o restabelecimento das condições de irradiação para a produção. Desta maneira, as pesquisas são adaptadas para serem feitas com prótons, e com energia máxima de 24 MeV.

Basicamente, o ciclotron pode ser dividido em duas grandes partes principais: o corpo central, onde as partículas são geradas e aceleradas e as linhas de feixe, por onde o feixe de partículas é conduzido até os dispositivos que contém os materiais a serem irradiados.

O corpo do ciclotron possui uma câmara de vácuo, a qual é mantida com um nível de vácuo em torno de  $10^{-6}$  mbar, por meio de duas bombas difusoras, sendo esse vácuo suficiente para ionizar apenas o gás injetado pela fonte de íons e garantir o isolamento elétrico dos eletrodos expostos às altas tensões geradas pelos sistemas de radiofrequência e de extração. Nesta câmara está situado um eletroímã com forma circular, dividido em três regiões de aproximadamente  $60^\circ$  cada, com a função de corrigir efeitos relativísticos ao longo da trajetória de aceleração das partículas.

As partículas são geradas por uma fonte de íons tipo "*penning*", (THE CYCLOTRON, 1976), montada na posição radial e localizada no centro da câmara, onde as mesmas são aceleradas.

Por tratar-se de um ciclotron clássico, a extração das partículas é feita por meio de um defletor (canal eletrostático), construído em cobre e com capacidade de produzir um campo eletrostático suficientemente alto, que possibilita a extração das partículas. Após a extração elas passam por um canal magnético e são enviadas para um distribuidor magnético que tem a função de desviar o feixe de partículas para cada uma das sete linhas de feixe externas, posicionados a  $0^\circ$ ,  $\pm 20^\circ$ ,  $+40^\circ$  e  $\pm 60^\circ$ .

A figura 2 mostra um desenho do ciclotron CV-28, onde podem ser visualizadas algumas partes da máquina e de suas linhas de feixe externas.

## Linhas de Feixe

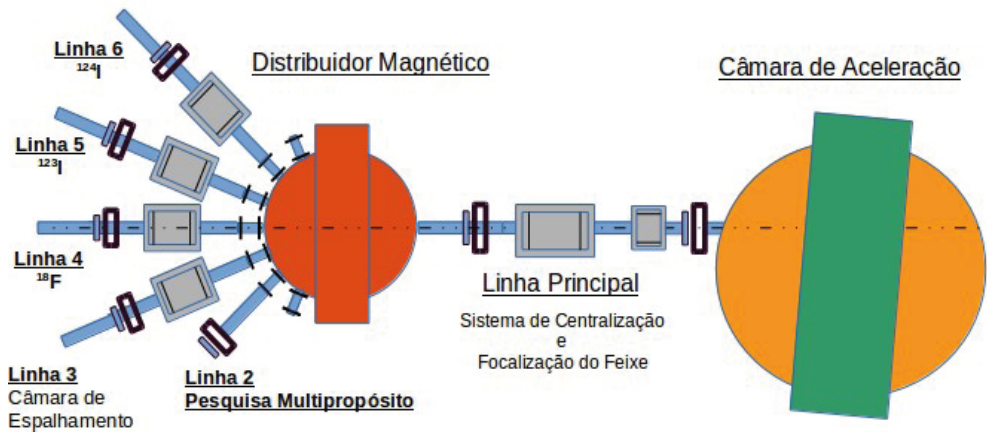


Figura 2: Desenho esquemático do ciclotron CV-28 do IEN-CNEN/RJ.

Na sequência de figuras abaixo são mostrados diferentes aspectos do Ciclotron CV-28, como a câmara de aceleração e bobinas principais (Figura 3), e a linha principal de irradiação com lente quadripolar e distribuidor magnético (Figura 4).

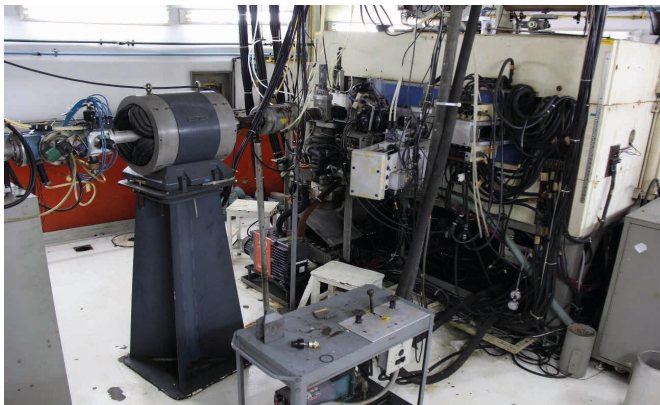


Figura 3: Ciclotron CV-28 - Câmara de aceleração, bobinas principais e peças polares.

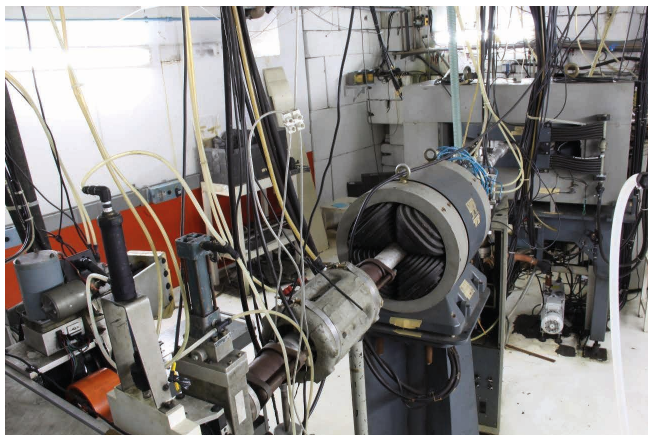
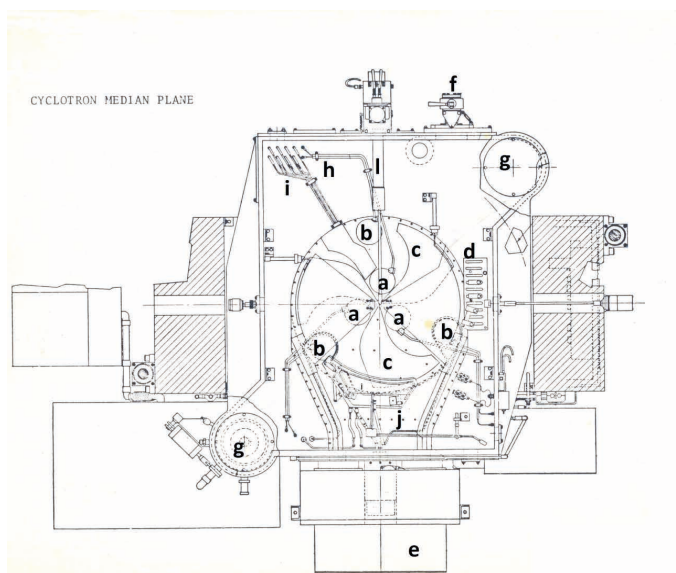


Figura 4: Linha Principal do CV-28 – Lente quadripolar e Distribuidor Magnético.

Na Figura 5, vê-se a "planta" da câmara de aceleração do ciclotron, normalmente denominada de "Plano Médio Geométrico" com seus principais componentes e sistemas.



- a. Bobinas harmônicas internas
- b. Bobinas harmônicas externas
- c. Setor espiralado do morro
- d. Canal magnético
- e. Gerador de rádio frequência
- f. Porta de saída do feixe
- g. Bombas difusoras de alto vácuo, 10 polegadas cada.
- h. Entrada da alimentação das bobinas harmônicas
- i. Entrada da alimentação das bobinas de perfil
- j. Deflector eletrostático
- l. Fonte de íons

Figura 5: Plano médio geométrico do Ciclotron CV-28

## LINHAS DE TRANSPORTE DE FEIXES

As linhas de transporte de feixes têm como objetivo fazer com que as partículas que são aceleradas pelo Cíclotron atinjam os alvos a serem irradiados com características específicas e com a qualidade ótica desejada.

Estas linhas são normalmente constituídas por tubulações de alumínio e são mantidas em alto vácuo.

O sistema de transporte é composto por uma linha principal, que conecta a câmara ao ímã distribuidor, e este as linhas secundárias, que no caso do Cíclotron CV-28 do IEN são em número de sete.

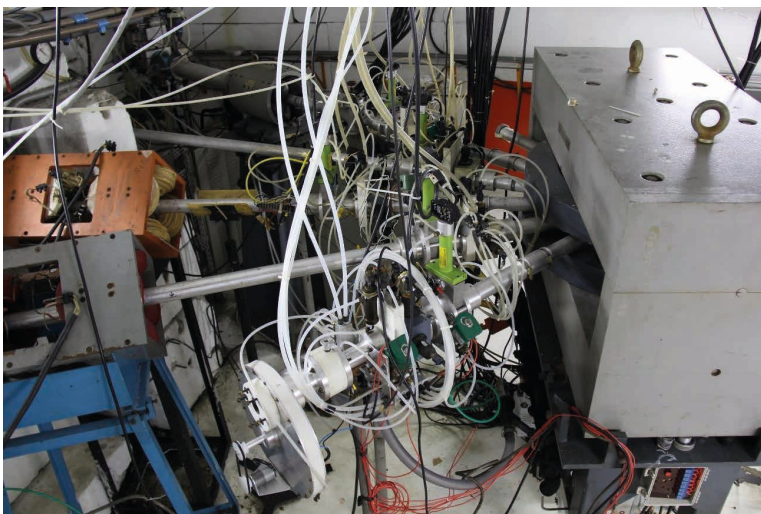


Figura 6: Face do ímã distribuidor com as sete saídas.

O ímã distribuidor tem como atribuição deflexionar o feixe de partículas que chega pela linha principal direcionando-o por vez para uma das sete linhas secundárias que estão angularmente deslocadas de  $20^\circ$  entre si. Estas linhas secundárias permitem irradiar até sete experimentos diferentes, ou seja, sete alvos, porém nunca simultaneamente. No momento, utilizam-se cinco linhas, sendo duas no interior da caverna onde se encontra o Cíclotron. As três restantes em cavernas secundárias localizadas na área experimental, conforme diagrama apresentado na figura 7.



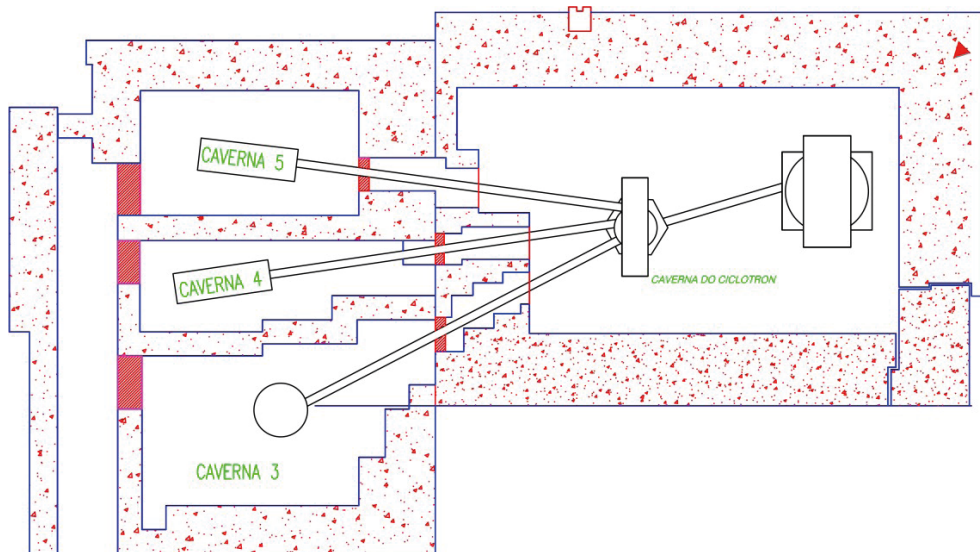


Figura 7: Planta da Caverna do CV-28 e Cavernas da Área Experimental.

A caverna 5 abriga a unidade de irradiação do sistema “Kipros 2” (KIPROS, 1998), (Figura 8), que é utilizada para a produção de iodo 123.

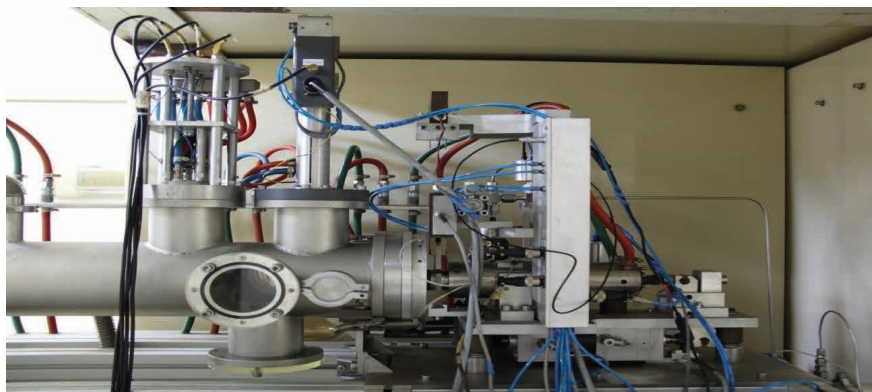


Figura 8: Foto do Alvo do “Kipros 2”.

A caverna 4 abriga o alvo utilizado para a produção de flúor-18 (figura 9).

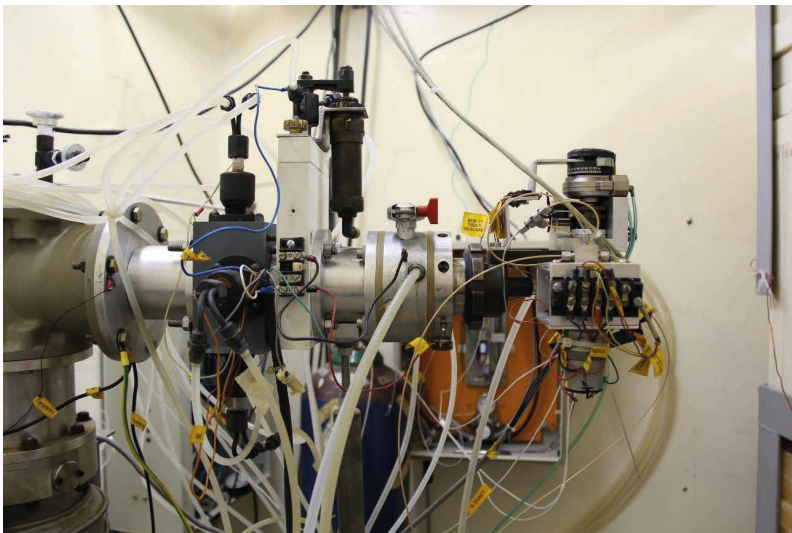


Figura 9: Foto do Alvo de Flúor 18.

A caverna 3 é onde são realizadas irradiações voltadas para aplicações de técnicas nucleares e estudos em física nuclear e atômica, (figura 10).



Figura 10: Foto da Câmara de Irradiação.

Para que as partículas cheguem ao alvo com a qualidade ótica desejada, estas linhas possuem uma série de dispositivos que são remotamente comandados, tais como:

- Estações de alto vácuo colocadas ao longo das linhas a distâncias regulares, que mantêm o vácuo sempre melhor (menor) que  $10^{-4}$  mmHg;
- Eletroímãs direcionadores que são utilizados para realizar pequenas deflexões no feixe de partículas, no valor de aproximadamente  $\pm 2$  graus, acima-abaixo,

ou, esquerda direita que se destinam a corrigir pequenos desalinhamentos entre o feixe e o centro geométrico das tubulações das linhas;

- Lentes quadripolares para realizar a focalização do feixe. Cada linha usa de dois a três quadripolos, incluindo-se o que está instalado na linha principal;
- Sistemas de análise de feixes e da medida da corrente, constituídos de:
  - a. Parador de feixe, refrigerado à água deionizada que está eletricamente isolado e é remotamente acionado através de comando eletropneumático. É utilizado para interceptar a corrente do feixe de partículas, sendo esta monitorada no painel de controle;
  - b. Colimadores de quatro setores, ajustáveis de zero até 40 mm de abertura, estão eletricamente isolados, e também são refrigerados à água deionizada. Através da monitoração da corrente do feixe em cada setor pode-se monitorar a focalização, ou seja, a qualidade do feixe.

O sistema de centralização e focalização do feixe opera por meio de bobinas que produzem um campo magnético, mostrado na figura 4, permitindo que o feixe seja convenientemente transportado até o material a ser irradiado, sem que sofra desvios que acarretem perdas significativas. Isto é particularmente importante em aceleradores de íons positivos, pois existe um limite prático de dissipação de calor no sistema de deflexão, da ordem de 3 kW, que limita a intensidade de corrente extraída. Dessa maneira, quanto maior a perda na transferência, menor a corrente efetiva no alvo.

Apesar de a máquina possuir capacidade para acoplar até sete linhas de irradiação, atualmente têm-se quatro operacionais. Essas linhas devem estar sempre alinhadas, pois seu posicionamento é fundamental para que o feixe de partículas tenha um transporte eficiente até o alvo.

Existem alguns equipamentos acoplados às linhas de feixe:

- Sistema de centralização e focalização de feixe;
- Sistema de varredura de feixe;
- Sistema de monitoração de feixe e
- Válvula de gaveta



# MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o sistema de irradiação como um todo e seus diversos componentes separadamente.

## SISTEMA DE IRRADIAÇÃO

O Sistema de Irradiação, desenvolvido e empregado no presente trabalho, está posicionado a um ângulo de 90° em relação à linha de feixe, denominado **sistema frontal**. Todo o Sistema é refrigerado com água deionizada à temperatura de aproximadamente 10°C. O Sistema de Irradiação é composto por um colimador de quatro setores, um parador de feixe, uma válvula de gaveta, um colimador circular, uma janela degradadora e a câmara de irradiação propriamente dita, conforme ilustrado na figura 11.

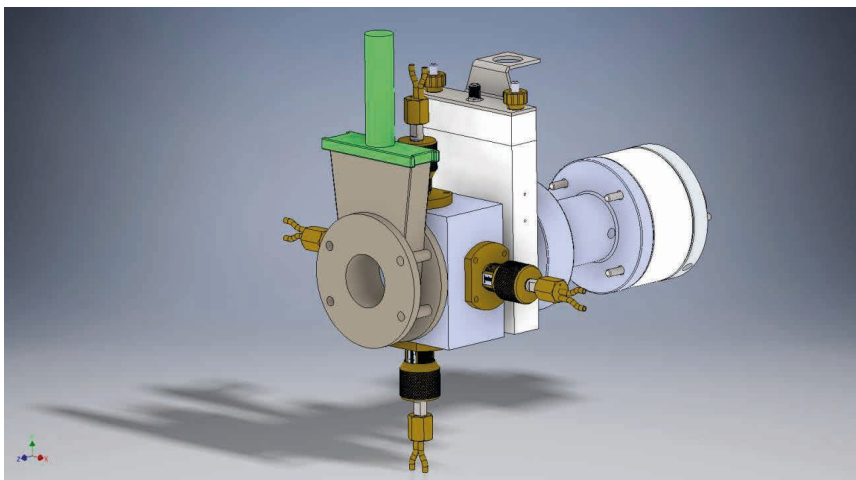


Figura 11: Sistema de Irradiações.

Na fabricação das peças aqui desenvolvidas foi utilizado o alumínio como elemento base, primeiro por tratar-se de um material leve, com boa condutividade térmica e elétrica e boa resistência mecânica, e segundo, porque quando exposto à irradiação, produz radionuclídeos de meia-vida ( $T_{1/2}$ ) curta. Cabe salientar que, o alumínio deve ter alto grau de pureza, evitando a formação de radionuclídeos indesejáveis devido às impurezas, que possua meia-vida mais longa. Em função dessa característica, a não formação de radioisótopos de meia-vida longa, torna-se um material adequado a esse tipo de uso. Por isso, pode ser manuseado após um curto período de tempo de decaimento, o que não ocorre com a maioria dos outros materiais.

Outro material utilizado foi o PVC, por ser fácil usinagem e tem como principal característica boa resistência mecânica e ser um excelente isolante elétrico.

## VÁLVULA DE GAVETA

A válvula de gaveta, da marca VAT, figura 12, tem a propriedade de isolar os sistemas de vácuo da linha principal do Cíclotron e o sistema de vácuo da câmara a ser irradiada. Essa válvula é de suma importância, pois ela só atua quando todo o sistema de porta alvos estiver em vácuo, evitando danificar o vácuo da linha principal do Cíclotron. Essa válvula também permite realizar a troca das janelas e qualquer outra manutenção no porta alvo sem levar a linha principal à atmosfera.

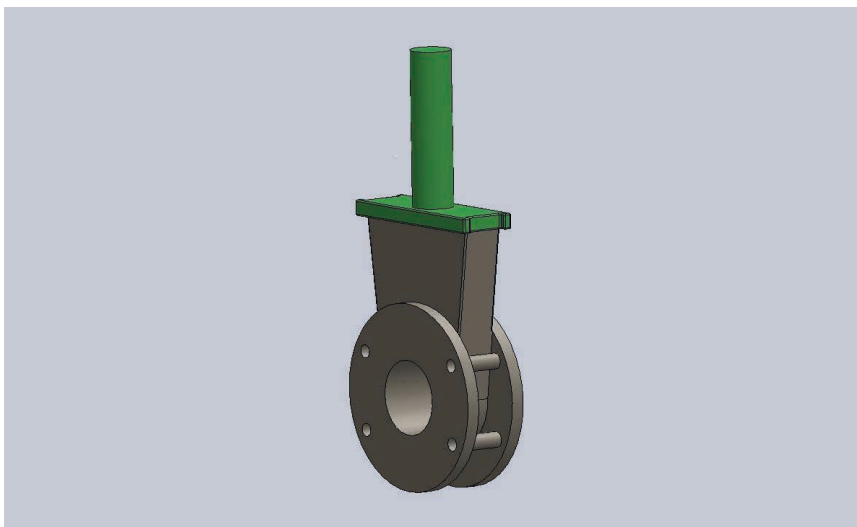


Figura 12: Representação esquemática da Válvula de Gaveta VAT.

## COLIMADOR DE QUATRO SETORES

Conforme ilustrado na figura 13 o colimador de quatro setores é composto por quatro blocos de alumínio, montados em um bloco de PVC e são isolados eletricamente entre si. Esse isolamento elétrico permite medir simultânea e independentemente a corrente que incide nos quatro quadrantes ao redor da área irradiada, fornecendo informações para que se possam fazer os ajustes necessários no feixe de partículas, tornando-o mais adequado e eficiente.

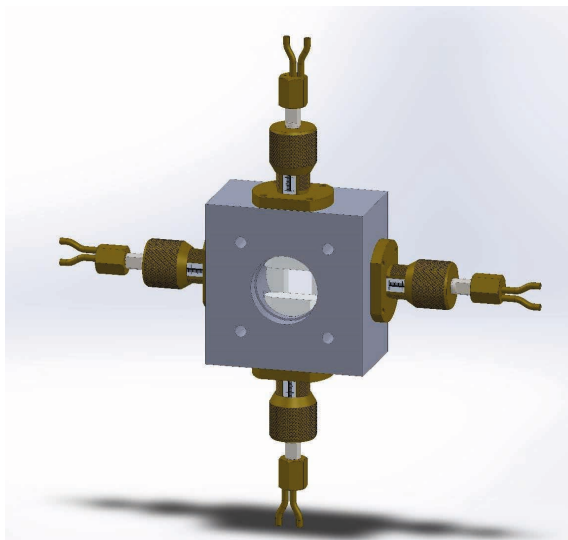


Figura 13: Representação esquemática do Colimador de Quatro Setores.

## PARADOR DE FEIXE

O Parador de Feixe com acionamento eletropneumático destina-se a monitorar o feixe e medir a intensidade de corrente que será colocada no alvo. Sua utilização, aliado ao colimador de quatro setores, é de fundamental importância na otimização do feixe a ser aplicado. Desta maneira o feixe somente incide no alvo após estar efetivamente ajustado, o que permite realizar irradiações com tempos otimizados e sem submeter o alvo a eventuais danos.

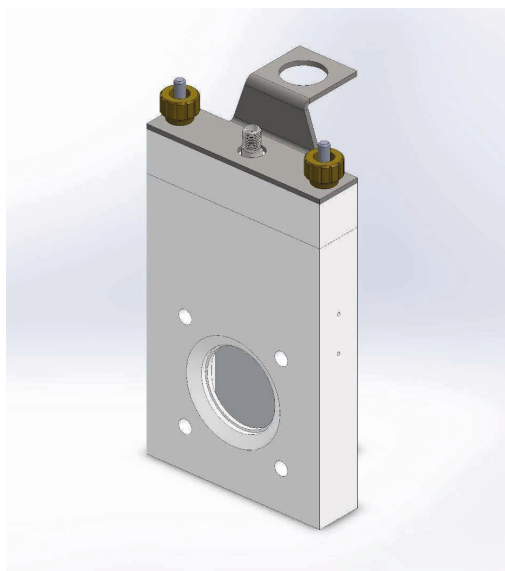


Figura 14: Representação esquemática do Parador de Feixe.

## PORTA ALVOS

A partir de um tarugo de alumínio de 6 polegadas de diâmetro e 150 mm de comprimento, foi usinada uma peça para funcionar como colimador e porta alvos, simultaneamente. Nessa peça, foram criadas conexões, uma para instalação de bomba mecânica, a fim de realizar pré-vácuo no Sistema, e outra para instalação do sensor de vácuo que tem por finalidade informar e habilitar o funcionamento do Sistema.

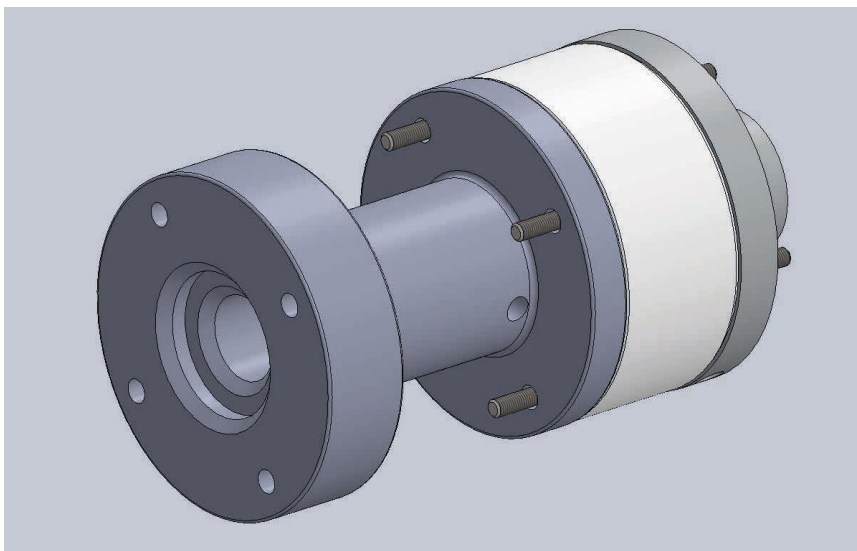


Figura 15: Representação esquemática do Porta Alvos montado.

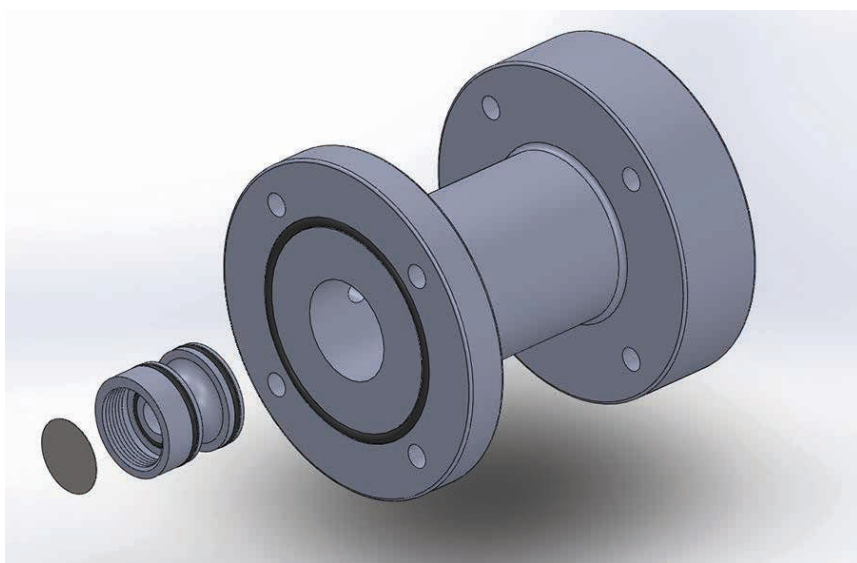


Figura 16 - Porta Alvos, colimador circular desmontado (13 mm) e janela Degradadora.

O feixe de partículas, no caso próton, incidindo em qualquer destas partes, dissipa energia na forma de calor. Esse calor gerado é absorvido em parte pelos colimadores e em parte pelo porta alvos propriamente dito, nos quais o feixe de partículas incide diretamente. Para que esse calor gerado não venha causar danos ao material alvo e aos componentes, faz-se necessário retirá-lo do ambiente de forma eficiente e rápida, caso contrário, pode vir a ocorrer alterações físicas que venham a comprometer tanto resultados como equipamentos, ou ainda provocar fusão ou até mesmo volatilização do material alvo.

Considerando a baixa temperatura da água com que os colimadores, o parador de feixe e o porta alvos são refrigerados e sendo o alumínio um excelente condutor térmico, a dissipação de calor torna-se bastante eficiente, preservando assim a integridade do sistema.

## **COLIMADOR CIRCULAR**

O colimador circular tem a propriedade de delimitar a área a ser irradiada ou ativada. Esse equipamento é montado em conjunto com o suporte de porta- alvos, de forma a permitir um alinhamento perfeito entre alvo e colimador. Sua principal função é garantir que somente a área de interesse será irradiada.

Destaca-se que quando se referir a sistema de porta-alvo inclui-se também o colimador, necessário e útil para qualquer propósito de trabalho a ser realizado.

Neste colimador uma janela degradadora, confeccionada com tântalo de 0,5 mm de espessura, é acoplada. O sistema foi idealizado de forma a permitir instalar janelas de várias espessuras ou algumas de mesma medida simultaneamente. A variação da espessura da janela possui a capacidade de variar a energia do feixe

A fim de garantir a boa qualidade do vácuo foram utilizados anéis de vedação (o' rings) entre a janela degradadora e o colimador. Os o' rings utilizados são de silicone, pois este composto é mais resistente às altas temperaturas. Utilizamos também dois o'rings para fazer a vedação da água de refrigeração do colimador propriamente dito.

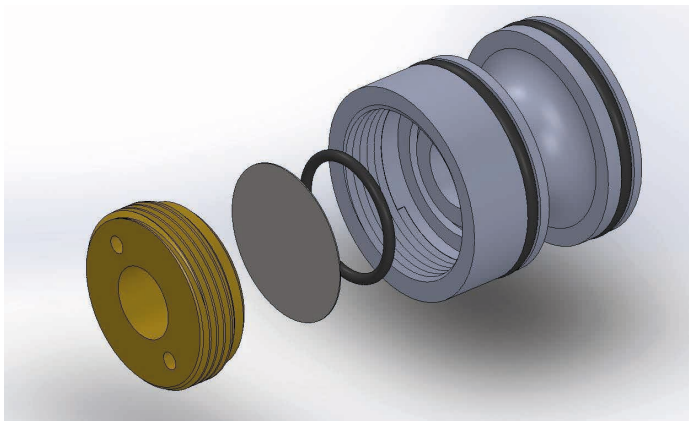


Figura 17: Representação esquemática do Colimador Circular e Janela degradadora.

### Colimador circular (9 mm)

Este colimador foi utilizado exclusivamente na 2ª irradiação, com o objetivo de restringir ainda mais a incidência do feixe de partículas carregadas no anel externo, ou seja, na área mais próxima às paredes da câmara. Como o primeiro colimador de 13 mm está posicionado a aproximadamente 20 cm de distância dos alvos, buscou-se, com essa segunda irradiação, determinar o grau de interferência das partículas espalhadas pelo primeiro colimador na ativação dos alvos, a partir da comparação dos resultados das duas experiências. É importante observar que este colimador é composto por um anel de alumínio montado num cilindro com 5 cm de comprimento de um material isolante (teflon), de forma a garantir o isolamento entre este e as lâminas, possibilitando a necessária monitoração da corrente que incide exclusivamente no conjunto de alvos. A maximização da corrente nos alvos é o que se busca durante o processo de irradiação.

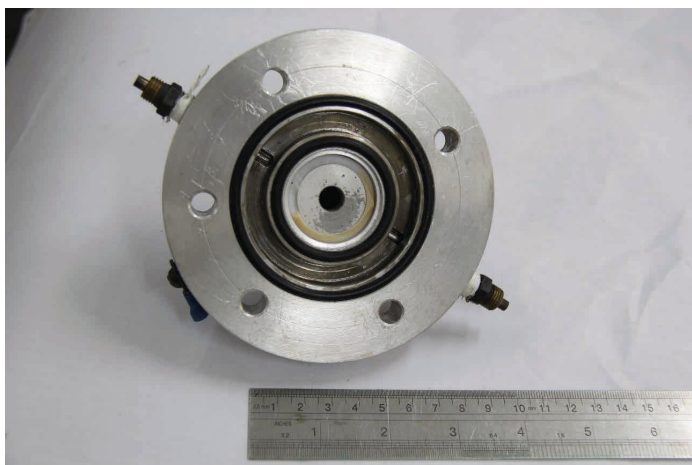


Figura 18: Colimador Circular (9 mm).

## CÂMARA DE IRRADIAÇÃO INSTALADA

A instalação do sistema aqui desenvolvido, na saída número 2 do “Distribuidor Magnético” se deu por meio de uma conexão de alumínio preparada para resistir a alto vácuo, por meio de vedantes do tipo o-rings e fixada por abraçadeiras de aço. Sua sustentação é garantida por meio de um suporte próprio confeccionado em aço, com base no solo, que garante a manutenção do alimento previamente realizado. A figura 19 mostra o sistema já instalado, com as devidas conexões para a água de refrigeração, ar comprimido, contatos elétricos, bem como o duto para vácuo.

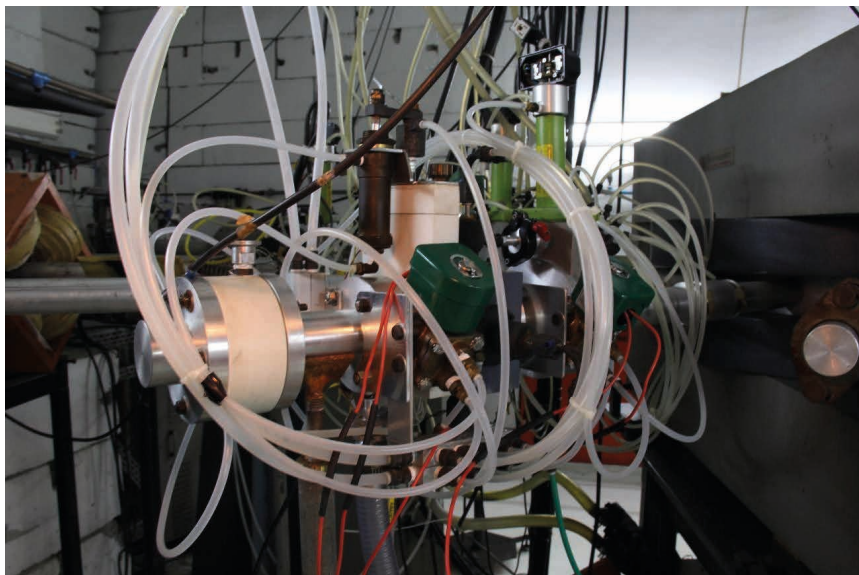


Figura 19: Câmara de Irradiação Instalada no CV-28.

## SISTEMA ELETRÔNICO DE COMANDO E MONITORAÇÃO

Como mostrado anteriormente, o Sistema de irradiação está instalado no interior da casamata do ciclotron CV-28, o que torna o seu acionamento e medição necessariamente remotos. Para isso foi instalado na mesa de controle do CV-28 um painel próprio para o acionamento dos diferentes componentes do sistema, tais como: pré-vácuo do sistema, válvula de conexão com a linha principal (VAT) e o acionamento do parador de feixe. Este dispositivo eletrônico possibilita o sequenciamento das operações de forma a evitar a abertura indevida da válvula VAT. A figura 20 apresenta o painel em sua configuração atual.



Figura 20: Painel de Controle da Câmara de Irradiação Instalada no CV-28.

Também apresentamos na figura 21, a vista frontal do painel de controle que será utilizado no projeto de automatização de todos componentes do sistema de vácuo do CV-28, interiores à caverna do mesmo. Essa modernização dará mais confiabilidade e segurança ao acelerador, compatível com as exigências da produção de radiofármacos. A instalação da linha de irradiação número dois foi a primeira etapa desse processo.

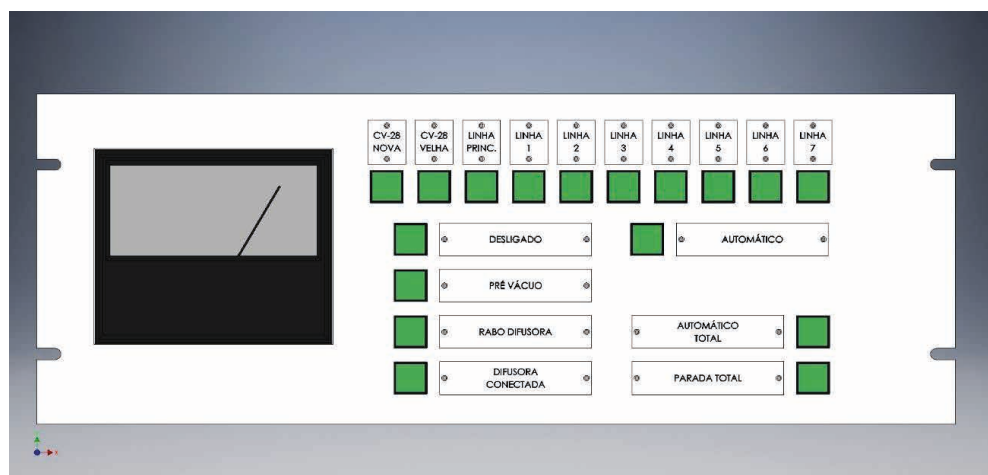


Figura 21: Projeto do Painel de Controle do Alvo – Vista Frontal.



# RESULTADOS E DISCUSSÕES

## TRANSMISSÃO E ALINHAMENTO DO FEIXE DE PRÓTONS

A primeira etapa da fase experimental foi desenvolvida com o propósito de alinhar a Câmara de Irradiação a ser utilizada, posto que a linha principal do CV-28 já se encontrava alinhada conforme prevê os parâmetros de operação. Objetiva-se com o este alinhamento otimizar o feixe antes de inci-di-lo no alvo; destacando-se que a linha 2, onde foi instalada a câmara, estava inoperante.

Esse alinhamento foi viabilizado com o uso do colimador de quatro fendas, do parador de feixe e do colimador de 13 mm instalados no Sistema. Esses dispositivos tornam possível a indispensável otimização do feixe antes de fazê-lo incidir no alvo.

O procedimento que permite atestar que o feixe produzido pelo CV-28 está devidamente alinhado em relação ao centro da Câmara de Irradiação é a constatação da ausência de sinal de corrente nos medidores que monitoram o Colimador de Quatro Setores após o fechamento das fendas do colimador (13 mm). Esses medidores se encontram no Painel Auxiliar do Controle do CV-28 (Figura 22).



Figura 22: Medidores de Corrente na Câmara e Fendas da linha 2.

## DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO PERFIL DE ATIVAÇÃO

Nessa etapa da fase experimental foram irradiados dois conjuntos de alvos compostos de três discos metálicos com diâmetro externo de 31,8 mm e espessura de 2 mm cada. Cada conjunto é composto por uma placa com orifício centralizado medindo 5,4 mm diâmetro; uma placa com orifício centralizado medindo 7,4 mm diâmetro, e uma placa sem furação qualquer.

A utilização desses modelos de placas teve como propósito medir a distribuição do feixe em regiões concêntricas ao eixo central de forma a se verificar a variação da

densidade de corrente na área útil da câmara de irradiação. Esses conjuntos de alvos podem ser observados na Figura 23.



Figura 23: Placas de aço utilizadas como Alvos.

### Primeira irradiação

A primeira irradiação foi realizada em duas etapas ocorridas nos dias 08 e 16 de outubro de 2015, totalizando uma Carga Integrada no alvo de  $21600 \mu\text{C}$ , correspondente à Carga Integrada de uma irradiação de  $2 \mu\text{A}$  de corrente, durante um tempo de 180 minutos.

As amostras irradiadas não foram medidas logo após o término da segunda irradiação devido às altas atividades verificada nas mesmas, inviabilizando o seu manuseio. Foi necessário aguardar alguns dias, de forma que os radionuclídeos de meia-vida curta decaíssem e que as amostras irradiadas atingissem um nível conveniente para as medições, em razão das correções devido ao "tempo morto" do detector de raios gama utilizado nas medidas da atividade, que se mostravam inadequadas (superiores a 30%).

O alto nível de atividade das amostras irradiadas foi resultado da corrente relativamente elevada ( $2 \mu\text{A}$ ) e o somatório do tempo de irradiação, considerada de forma cumulativa. Esse experimento serviu para testar os limites de produção do  $^{56}\text{Co}$  em aço com o uso do dispositivo desenvolvido.

Decorridos 73 (setenta e três) dias de decaimento das amostras irradiadas e realizadas as medidas com o detector de Germânio Hiperpuro – HPGe foram identificadas atividades dos seguintes radionuclídeos:  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ , a partir da visualização de seus raios-gama característicos.

## Segunda irradiação

Fundamentado nos dados obtidos no primeiro experimento verificou-se ser desnecessário utilizar o mesmo tempo de irradiação e a mesma intensidade de corrente para irradiar as amostras do segundo experimento.

No segundo experimento a irradiação das amostras totalizou uma Carga Integrada de 900  $\mu\text{C}$ , correspondente à Carga Integrada equivalente a uma irradiação de 0,5  $\mu\text{A}$ , durante o tempo de 30 minutos.

Neste segundo experimento foi acrescentado um colimador de 9 mm; esse a uma distância de aproximadamente 42 mm das amostras de aço, com o objetivo de concentrar o feixe no centro das mesmas.

Na análise das amostras irradiadas, medidas no mesmo detector Germânio Hiperpuro – HPGe, identificou-se os mesmos radionuclídeos presentes no primeiro experimento. Os dados referentes às irradiações realizadas constam na tabela 2.

Parâmetros	Experimento 1	Experimento 1	Experimento 2	Unidade
Data	08/10/2015	16/10/2015	29/01/2016	Dia
Tempo de irradiação	95	84	37	Minuto
Corrente média	1,89	2,14	0,41	$\mu\text{A}$
Carga integrada	10800	10800	900	$\mu\text{C}$
Corrente final no alvo	2,0	2,3	0,7	$\mu\text{A}$
Corrente final Stop LP-21	2,2	2,4	0,8	$\mu\text{A}$
Corrente final Stop LP-2	2,2	2,5	0,8	$\mu\text{A}$
Corrente final Stop LP-1	2,9	2,8	1,0	$\mu\text{A}$
Corrente final raio de extração	4,0	4,2	1,0	$\mu\text{A}$
Corrente interna 12"	5,0	4,8	1,1	$\mu\text{A}$
Frequência do Feixe	25,452	25,467	25,434	MHz

Tabela 2 – Dada das Irradiações Realizadas.

## ATIVAÇÃO DAS AMOSTRAS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

A figura 24 mostra como foi feita a montagem das folhas de Aço, no porta alvo com o colimador de alumínio, conjunto esse, que foi submetido ao feixe de prótons produzidos no ciclotron.



Figura 24: Colimador de 9 mm, placas de aço e Porta Alvos da Câmara de Irradiação Instalada no CV-28.

Ambas as irradiações também serviram para verificar experimentalmente as condições de transmissão do feixe, a fim de diagnosticar e otimizar o perfil de transmissão para a unidade de irradiação a ser acoplada ao sistema, como por exemplo, o sistema de degradação e ativação de amostras metálicas para estudos de desgaste, objeto de estudo em desenvolvimento. Como resultado obteve-se um perfil da focalização e convergência do feixe extraído na linha 2 (dois) com o uso do dispositivo aqui desenvolvido.

## DETECTOR DE GERMÂNIO HIPERPURO – HPGe

A contagem da atividade das amostras irradiadas foi realizada com o detector de Germânio Hiperpuro – HPGe, Camberra, modelo GC 2518, com tensão de operação de 4.500 Volts positiva.

A figura 25 destaca a blindagem do detector e o porta amostras especialmente confeccionado em acrílico, que garante a reprodutibilidade da geometria fonte / detector para todas as contagens. Ressalta-se que a distância fonte / detector foi mantida em 40 cm.

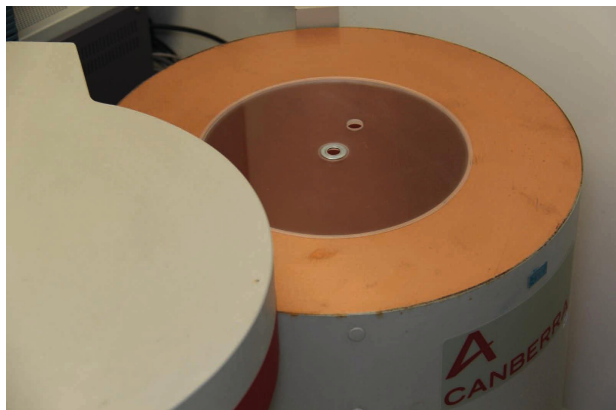


Figura 25: Blindagem do Detector HPGe e posição de contagem de um dos alvos.

# Espectros da primeira irradiação

A figura 26 mostra o espectro de calibração do detector com o uso de uma fonte calibrada de  $^{152}\text{Eu}$ , com atividade de 53,141kBq em 27/05/2002. Deve-se observar que não houve necessidade de determinação da atividade total induzida em cada amostra, pois a comparação das atividades relativas permite a obtenção das informações necessárias, desde que sejam garantidas a reprodução das mesmas condições para cada contagem. A correção do tempo de decaimento entre as contagens também se mostrou desnecessária, dada a longa meia-vida do  $^{56}\text{Co}$  (~77 dias). As figuras 27, 28 e 29 apresentam os resultados obtidos para a primeira irradiação, onde se destaca o pico referente ao raio-gama de 847 keV, cujas contagens foram calculadas e inseridas na tabela 3.

As figuras 30, 31, 32 e 33 apresentam os espectros de calibração e amostras irradiadas na segunda experiência, sendo que a tabela 4 relaciona seus resultados.

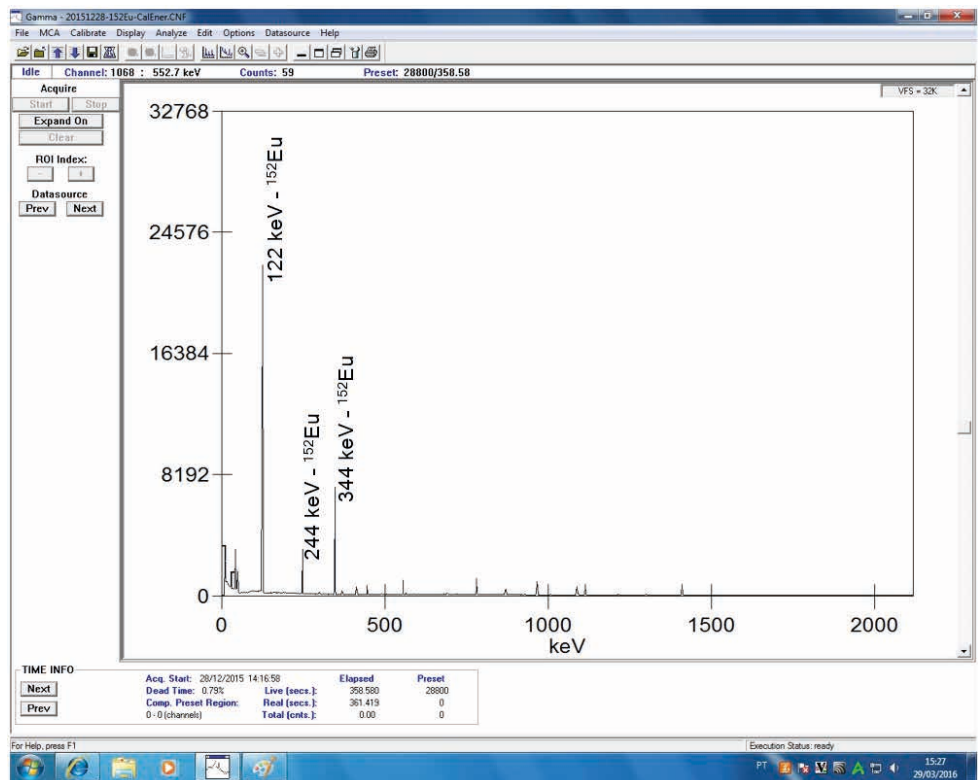


Figura 26: Contagem do  $^{152}\text{Eu}$ - (28/12/2015).

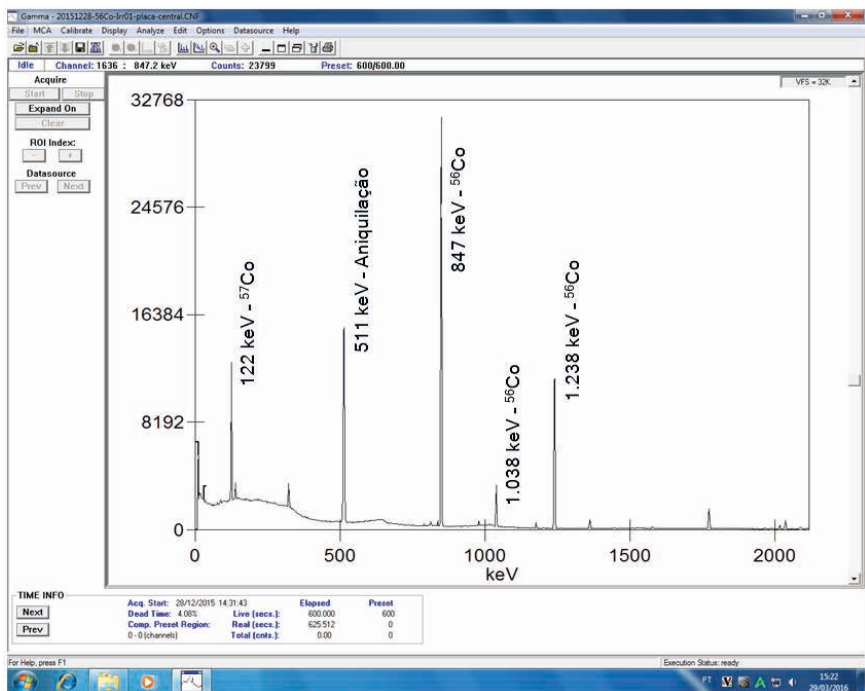


Figura 27: Contagem  $^{56}\text{Co}$ - Irr01- alvo central (28/12/2015).

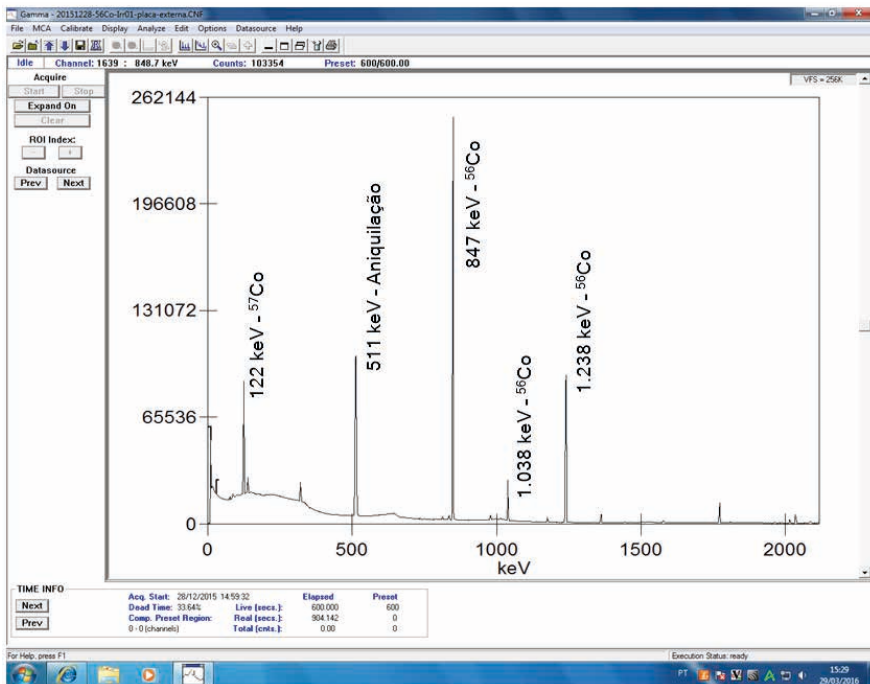


Figura 28: Contagem  $^{56}\text{Co}$ - Irr01- alvo externo (28/12/2015)

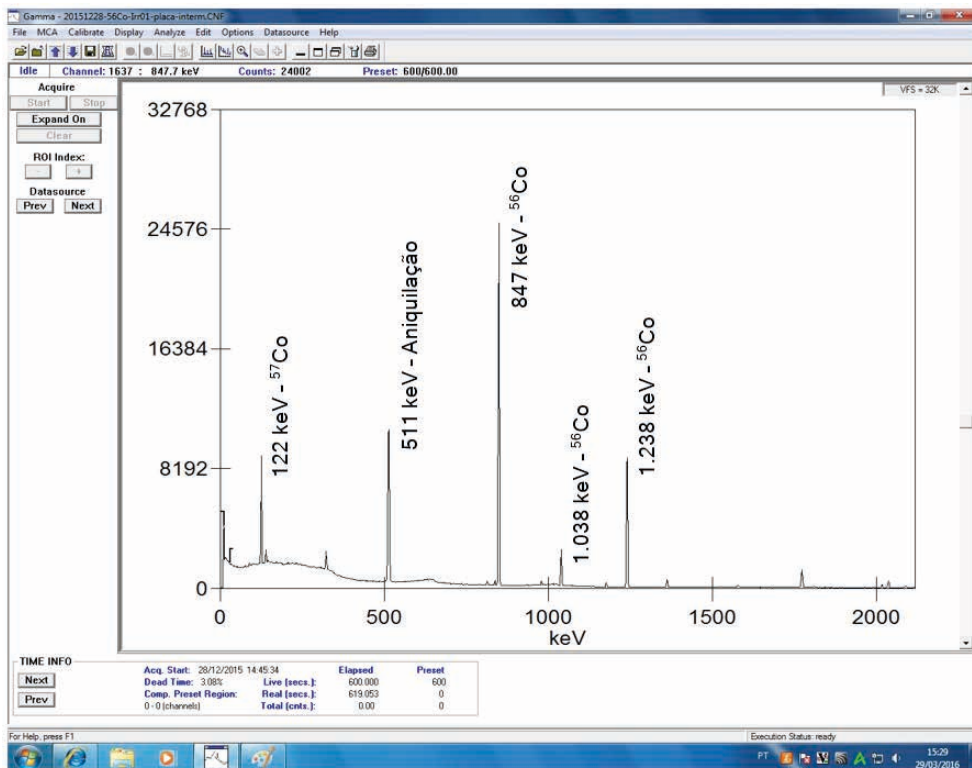


Figura 29: Contagem  $^{56}\text{Co}$ - Irr01- alvo interno (28/12/2015).

ENERGIA $\gamma$	LÂMINA	NÚMERO DE CONTAGENS $\pm$ ERRO	ÁREA IRRADIADA $\text{mm}^2$	CONTAGENS / ÁREA IRRADIADA $\text{mm}^{-2}$
847 keV	CENTRAL	$111952 \pm 0,31\%$	$2,5^2 \pi$	570.165,520
	INTERNA	$84645 \pm 0,35\%$	$3,5^2 \pi - 2,5^2 \pi$	449.054,621
	EXTERNA	$872,764 \pm 0,11\%$	$6,5^2 \pi - 3,5^2 \pi$	926.029,199

Tabela 3- Contagens da 1ª Irradiação.

# Espectros da segunda irradiação

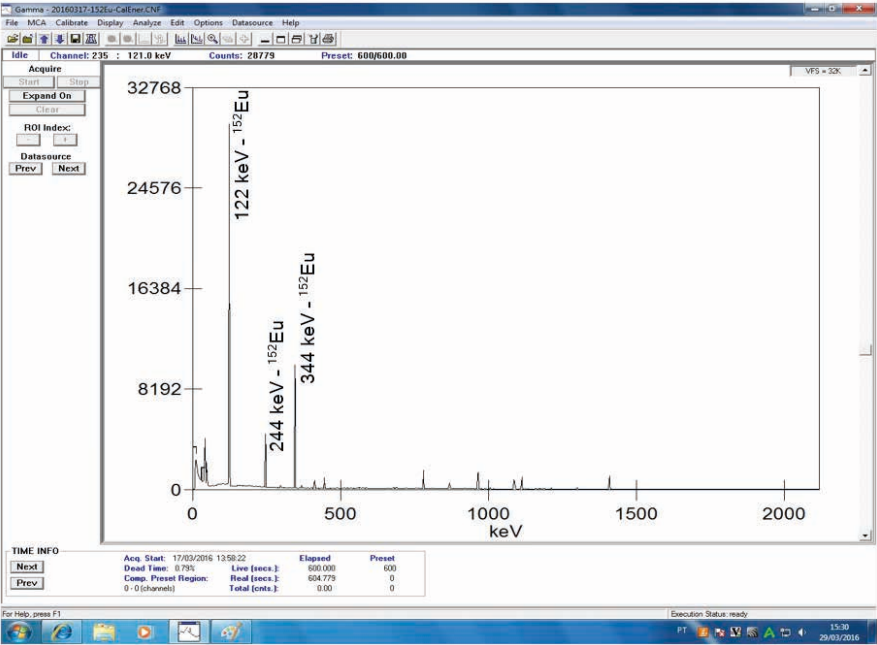


Figura 30: Contagem do  $^{152}\text{Eu}$  - (17/03/2016).

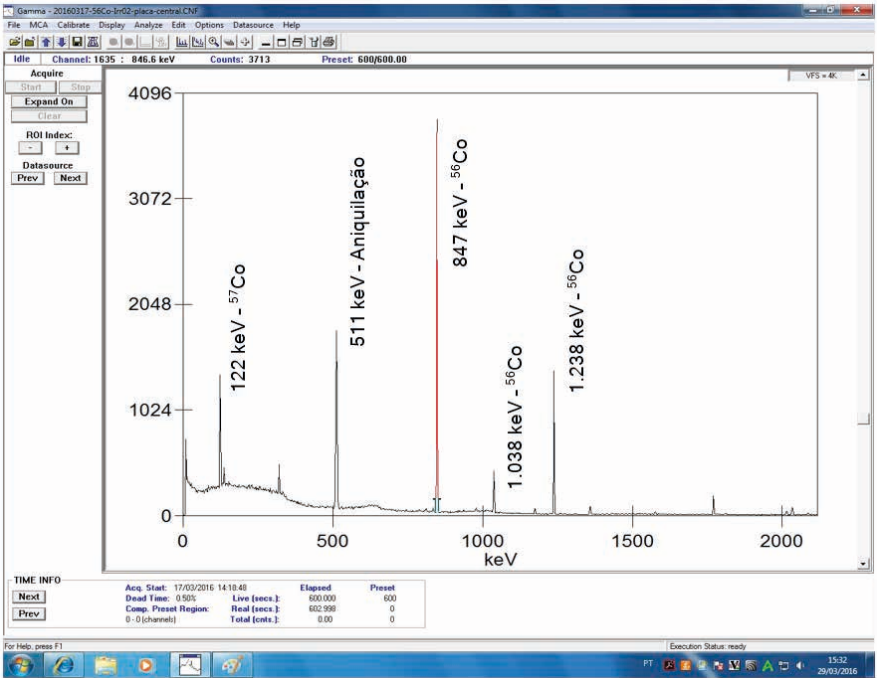


Figura 31: Contagem  $^{56}\text{Co}$  - Irr02- alvo central (17/03/2016).



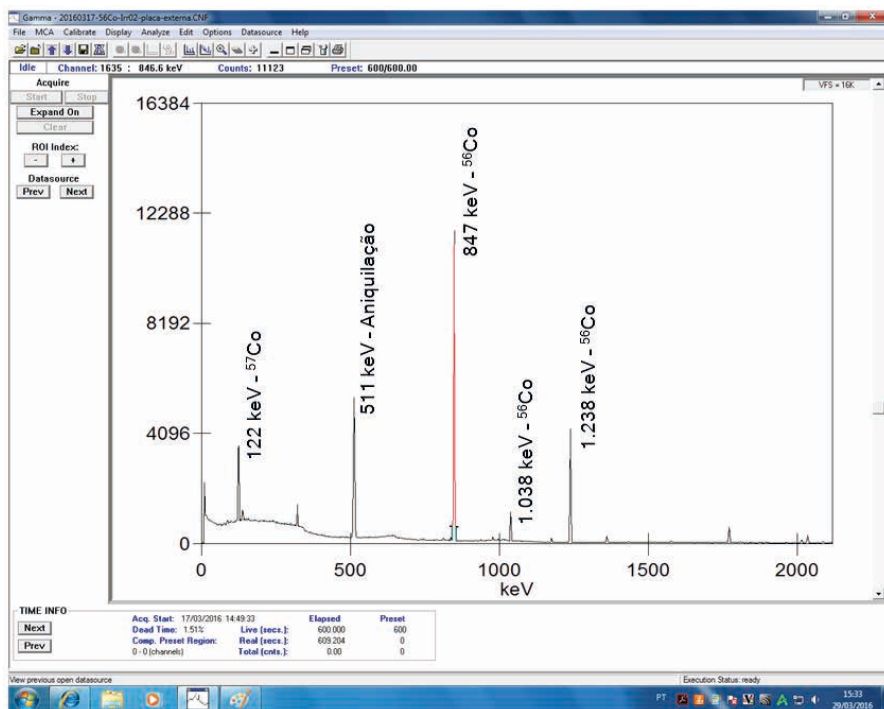


Figura 32: Contagem  $^{56}\text{Co}$  - Irr02- alvo externo (17/03/2016).

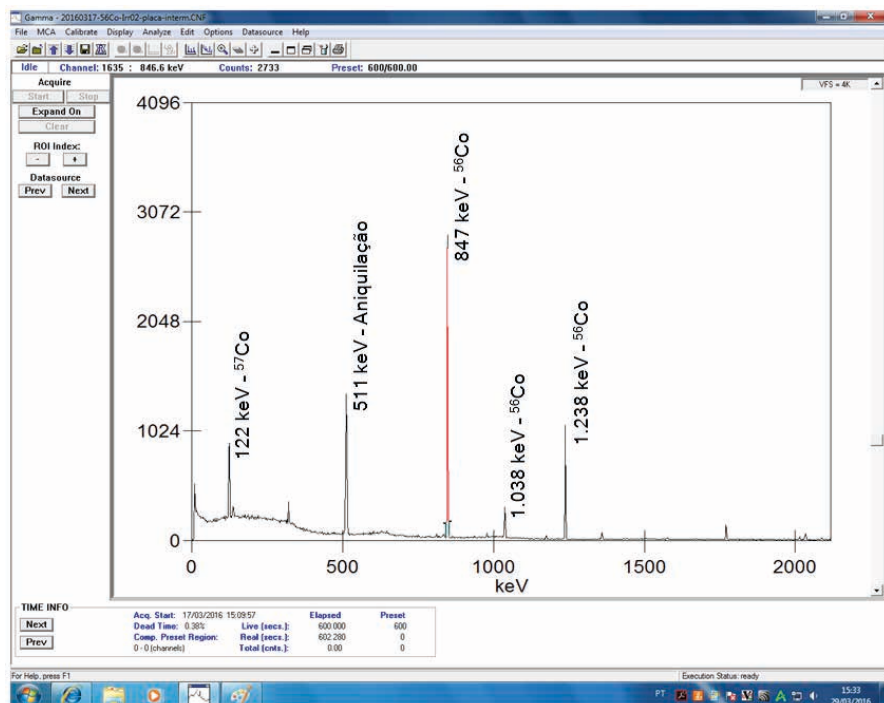


Figura 33: Contagem  $^{56}\text{Co}$  - Irr02- alvo interno (17/03/2016).

ENERGIA $\gamma$	LÂMINA	NÚMERO DE CONTAGENS $\pm$ ERRO	ÁREA IRRADIADA $\text{mm}^2$	CONTAGENS / ÁREA IRRADIADA $\text{mm}^{-2}$
847 keV	CENTRAL	$13.339 \pm 0,89 \%$	$2,5^2 \pi$	67.934,810
	INTERNA	$10.058 \pm 1,03\%$	$3,5^2 \pi - 2,5^2 \pi$	53.359,222
	EXTERNA	$40.767 \pm 0,51\%$	$6,5^2 \pi - 3,5^2 \pi$	162.206,35

Tabela 4- Contagens da 2ª Irradiação.

## CONCLUSÃO

A metodologia experimental adotada no presente trabalho se propôs a desenvolver um sistema que viabilize irradiações em linha interna a casamata do ciclotron (linha 2), que possibilite intensidade de feixe e versatilidade de configuração da geometria de irradiação, através do uso de um sistema de transporte, diagnóstico e focalização de feixe de partículas carregadas, o que foi efetivamente alcançado.

O desempenho do sistema aqui desenvolvido foi avaliado com a realização de dois experimentos que atestaram a eficiência de transmissão e a uniformidade do feixe numa área circular de 7,4 mm de diâmetro. Dentro dessa área a variação da densidade de corrente se manteve inalterada a despeito do uso de um colimador adicional (9 mm). Esse resultado define as condições de irradiações futuras.

A versatilidade desse sistema, dada às suas dimensões, posicionamento e possibilidades de configurações, permite sua acoplagem a outros sistemas complementares de irradiações, de acordo com suas especificidades.

A viabilização do uso da linha 2 do CV-28 permite a abertura de novas linhas de pesquisas e de estudos para usuários internos e externos à Divisão de Radiofármacos. Há de se destacar também sua importância para o Programa de Pós-graduação do IEN com a possibilidade de seu uso para o desenvolvimento de dissertações e aulas. Cabe ressaltar que o presente trabalho já possibilitou o desenvolvimento da dissertação “Sistema de degradação do Feixe para a Uniformização do Perfil de Ativação ao Longo da Espessura da Amostra com Aplicações em Estudos de Desgastes de Peças Metálicas” (ANTUNES, 2016).

## SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Utilização da Câmara de Irradiação para irradiar alvos de pequeno e médio porte, sem a necessidade dos mesmos estarem confinados num ambiente com vácuo.

Levantamento das condições de irradiações com uso de outras partículas carregadas, como alfas e dêuterons.

Desenvolvimento de dispositivo para a medição da energia das partículas carregadas “in beam”, com o uso de detector de barreira de superfície.

Realização de análises por ativação com partículas carregadas em peças metálicas com dimensões definidas no presente trabalho.

Sistema de degradação do feixe para a uniformização do perfil de ativação ao longo da espessura da amostra com aplicações em estudos de desgastes de peças metálicas (já implementada).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ANTUNES, 2016) – ANTUNES, J. F. O. Projeto e Desenvolvimento de Sistema para análise de desgaste em peças metálicas com o uso do Ciclotron CV-28 do IEN. - Dissertação do Programa de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares - Instituto de Engenharia Nuclear - IEN - Julho de 2016.

(ARRUDA, 1996), ARRUDA W.O. , “100 anos da descoberta do Raio-X – Arq. Neuropsiquiatr”, 54(3) 525, 1996.

(BORRELI, 1995), BORRELI S. I. , “TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO COM O USO DE ACELERADOR DE ELÉTRONS” - Dissertação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/USP - 1995.

(FURLANETTO, 1998) - FURLANETTO, J.A.D., Projeto e Desenvolvimento de um Varredor de Feixe para a utilização em Aceleradores de Partículas Carregada - Dissertação do Instituto Militar de Engenharia - Julho de 1998.

(KIPROS, 1998), BRAGHIROLI, A. M. *Produção de 1-123 Ultra Puro. Nota técnica do Instituto de Engenharia Nuclear. 1998.*

(SUMIYA, 2000) - SUMIYA, L. C. A., Medidas de desgaste em aço inoxidável AISI 316 por meio de Ativação Superficial em Ciclotron - Dissertação do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/USP 2000.

(THE CYCLOTRON, 1976) - THE CYCLOTRON CORPORATION Instruction and service manual for the Cyclotron Corporation's - Model CV - 28 Cyclotron, ser. nº 604 US Patent (TCC Ins-26), Nov. 12, 1976.

(THE CYCLOTRON, 1974) - THE CYCLOTRON CORPORATION. *Instruction and service Manual for the Cyclotron Corporation's Model CV-28 Cyclotron, ser. nº 238 US Patent (TCC Ins-19), June, 1974.*

(WIDERÖE, 1928) – WIDERÖE E. R. “Über ein Neues Prinzip Zur Herstellung Hoher Spannungen” – Archiv für Elektrotechnik 21 (4) 387. doi:10.1007/BF01656341.

(VAN DE GRAFF, 1931) VAN DE GRAFF R. – “A 1.5 MeV eletrostatic generator” Phys. Rev. 38, 1919 (1931)

**MAURO LUCIO BORGES LEMOS** - Nasci na Vila Isabel, no Rio de Janeiro, em 1960. Fui aluno de escola pública até o ensino médio, o que é motivo de orgulho. Licenciado em Matemática e Mestre em Ciência e Tecnologias Nucleares. Sou técnico em eletrônica na Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e também professor regente na rede municipal do Rio de Janeiro. Sou pai de Livia e avô de Julia. Como a vida nos reserva muitas surpresas, agora também sou autor deste livro.

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO  
DE FEIXES PARA O ACELERADOR DE PARTÍCULAS

---

# CÍCLOTRON CV 28

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO  
DE FEIXES PARA O ACELERADOR DE PARTÍCULAS

---

# CÍCLOTRON CV 28

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)