

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CARGA E DESCARGA NO PORTA-ALVO DE
IRRADIAÇÃO DE $H_2^{18}O$ UTILIZADO PARA A PRODUÇÃO DE $^{18}F^-$ NO
CÍCLOTRON CYCLONE 30 DO IPEN-CNEN/SP**

OSVALDO LUIZ DA COSTA

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Mestre em Ciências na
Área de Tecnologia Nuclear –
Aplicações.**

**Orientador:
Dr. Valdir Sciani**

SÃO PAULO

2009

Dedico este trabalho,

À minha esposa, Anne, e

À minha filha, Ana Beatriz.

Agradeço,

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade de execução deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Valdir Sciani.

Ao Sr. Jair Mengatti da Diretoria de Radiofarmácia do IPEN.

Ao colega do CAC Décio Borges pela precisão nas medidas na fabricação da placa de fixação dos *microswitches*.

Ao colega do CAC Adilson Abolafio pelo auxílio na montagem dos equipamentos e testes dos sensores.

Aos meus colegas do Centro de Aceleradores Cíclotron, Sandra, Zanchetta, Henrique, Amaral, Vanderlei, Marialva, Mauro, Tarcisio, Guerrero, Hylton, e Clovis.

Aos colegas da Proteção Radiológica, Christovan, Andrade, Celso e Jose Roberto pela colaboração nas verificações de contaminação e ativação das peças dos experimentos.

Ao Sr. Rachid Ayad da Ion Beam Applications pela colaboração na minha busca por respostas que não estão nos manuais do acelerador.

Ao Sr. Simon Zarembo da Ion Beam Applications pela paciência e receptividade que demonstrou nas minhas questões técnicas sobre o acelerador cíclotron Cyclone 30.

A todas as pessoas que de alguma maneira colaboraram com a execução deste trabalho.

O seguro morreu de velho.
Velho provérbio popular.

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CARGA E DESCARGA NO PORTA-ALVO DE
IRRADIAÇÃO DE H₂¹⁸O UTILIZADO PARA A PRODUÇÃO DE ¹⁸F⁻ NO
CÍCLOTRON CYCLONE 30 DO IPEN-CNEN/SP**

Oswaldo Luiz da Costa

RESUMO

O aumento da demanda no Brasil pelo radiofármaco [¹⁸F]FDG para exames de tomografia por emissão de pósitron (PET-CT) e sua meia-vida de 109,7 minutos exigem uma atenção especial para a cadeia produtiva deste radiofármaco. Desde a irradiação da água enriquecida em ¹⁸O até a passagem do paciente pelo tomógrafo, numa seqüência de procedimentos que pode durar até cerca de seis horas, todas as etapas da cadeia produtiva devem ter a maior confiabilidade possível, pois qualquer falha em uma das etapas será sentida na extremidade da cadeia produtiva. A falta de indicação de posição da válvula do Sistema de Carga e Descarga do Porta-alvo de ¹⁸F⁻ no Centro de Aceleradores Cíclotron levou a perda de produção de ¹⁸F⁻, contaminação da Sala de Irradiação e aumento da dose dos trabalhadores envolvidos na operação e manutenção dos sistemas de irradiação. Este trabalho testou o comportamento de três tipos de sensores de posição (*microswitch*, *reedswitch* e sensor de proximidade indutivo) no ambiente da Sala de Irradiação 1.2 do Centro de Aceleradores Cíclotron, que está sujeito a altas taxas de radiação gama e nêutrons devido à produção rotineira de ¹⁸F⁻ e ¹²³I, através deste teste foi possível encontrar o sensor de posição mais adequado para trabalhar no porta-alvo de ¹⁸F⁻, e através da reprogramação do controlador lógico programável, foi possível evitar este tipo de falha durante a produção de ¹⁸F⁻ no Centro de Aceleradores Cíclotron, e aumentar a confiabilidade na cadeia produtiva do [¹⁸F]FDG.

**LOAD AND UNLOAD SYSTEM OPTIMIZATION ON H₂¹⁸O IRRADIATION
TARGET USED FOR ¹⁸F⁻ PRODUCTION AT THE CYCLOTRON CYCLONE 30
FROM IPEN-CNEN/SP**

Oswaldo Luiz da Costa

ABSTRACT

The demand growing in Brazil by the radiopharmaceutical [¹⁸F]FDG in positron emission tomography (PET-CT) and the 109,7 minutes half life claim special attention to the productive chain of this radiopharmaceutical. Since the [¹⁸O]water irradiation until the tomograph patient scanning, in sequential procedures that may spent about six hours, all the productive chain stages must be as reliable as possible, because any stage failed will be perceived in productive chain extremity. The position indication absence from Load and Unload ¹⁸F⁻ Target System valve in Cyclotron Accelerators Center resulted in ¹⁸F⁻ production loss, Irradiation Room contamination and the increase workers' dose responsible by operation and maintenance of irradiation systems. This study tested the behaviour of three types of position sensors (microswitch, reedswitch and inductive sensor), into Irradiation Room 1.2 environment of the Cyclotron Accelerators Center, where there are high gamma radiation and neutrons rates because the routine ¹⁸F⁻ and ¹²³I production, through this test was possible to discover the fitter position sensor to run on ¹⁸F⁻ Target, and after rewriting the programmable logic controller software was possible avoid this type of fail at ¹⁸F⁻ production time in Cyclotron Accelerators Center, and to grow up the reliability on [¹⁸F]FDG productive chain.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Histórico	15
1.2 Relevância do tema	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 Alcance da pesquisa e delimitação do assunto	20
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
3.1 Uma breve história dos aceleradores	21
3.2 O caminho do íon	28
3.2.1 A seleção do gás	29
3.2.2 A criação do íon negativo	29
3.2.3 A extração do feixe de íons H ⁻	31
3.2.4 Ajuste de direção e primeira focalização do feixe	32
3.2.5 Agrupamento por Buncher e segunda focalização	34
3.2.6 Inflexão do feixe de íons H ⁻	34
3.2.7 A aceleração dos íons H ⁻	35
3.2.8 A extração dos íons H ⁻	43
3.2.9 O transporte dos íons H ⁺	45
3.2.10 O diagnóstico do feixe de íons H ⁺	48
3.2.11 A colisão do feixe de íons H ⁺ com o material alvo	48
4 REVISÃO DA LITERATURA	51
4.1 A evolução dos cíclotrons	51
4.2 A evolução do porta-alvo de ¹⁸ F ⁻	52
4.2.1 O porta-alvo de cobre com folha de Havar frontal	52
4.2.2 Os porta-alvos de aço inox e titânio com folhas de Havar e titânio	52
4.2.3 O porta-alvo de prata com janelas de prata ou titânio	53
4.2.4 Os porta-alvos de titânio e nióbio	53
4.2.5 O porta-alvo de tântalo de 1 kW com janela de Havar	54

4.2.6 O comportamento da água na cavidade durante a irradiação.....	54
4.2.7 Previsão da produção de [¹⁸ F]FDG através da monitoração de nêutrons	55
4.2.8 Radionuclídeos contaminantes da água irradiada.....	55
4.2.9 O porta-alvo com cavidade e janela de nióbio	55
4.2.10 Passivação da folha de Havar com nióbio.....	56
5 MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.1 Materiais utilizados	57
5.1.1 Características do acelerador ciclotron Cyclone 30	57
5.1.1.1 Características de feixe	57
5.1.1.2 Consumo de potência	58
5.1.1.3 Estrutura magnética	59
5.1.1.4 Sistema de controle	60
5.1.1.5 Sistema de R.F.....	61
5.1.1.6 Fonte de íons	62
5.1.2 Características dos porta-alvos de ¹⁸ F ⁻	63
5.1.2.1 Dimensões dos porta-alvos	63
5.1.2.2 Materiais dos porta-alvos.....	63
5.1.2.3 Propriedades dos porta-alvos	63
5.1.2.4 Características do feixe	63
5.1.3 Sensores.....	65
5.1.3.1 Características do sensor de proximidade indutivo.....	65
5.1.3.2 Características da chave magnética (<i>reedswitch</i>).....	66
5.1.3.3 Características da chave fim de curso (<i>microswitch</i>).....	67
5.2 Procedimento experimental.....	68
5.2.1 Posicionamento dos sensores na Sala de Irradiação	68
5.2.2 Teste dos sensores.....	69
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
6.1 Ausência de solução dos fabricantes.....	71
6.2 Corrente integrada das produções rotineiras.....	72
6.3 Ativação radioativa dos sensores	73
6.4 Comportamento dos sensores irradiados.....	74
6.5 Montagem do sensor na válvula	78
6.6 Funcionamento do sistema de carga e descarga	79
6.7 Modificação na programação do CLP	80

7 CONCLUSÕES.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1 - Linha histórica principal.....	21
TABELA 2 - Segunda linha histórica	22
TABELA 3 - Terceira linha histórica	22
TABELA 4 - Fabricantes de cíclotrons comerciais e suas características.....	27

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1 - Número de procedimentos médicos realizados com [¹⁸ F]FDG produzido no IPEN	16
FIGURA 2 -Linha do tempo da cadeia produtiva do [¹⁸ F]FDG	18
FIGURA 3 - Esquema do acelerador cíclotron clássico	23
FIGURA 4 - Exemplos de setores de Thomas	24
FIGURA 5 - Crescimento do número de cíclotrons no mundo	26
FIGURA 6 - Acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN.....	28
FIGURA 7 - Funcionamento da fonte de íons do cíclotron Cyclone 30	31
FIGURA 8 - Esquema elétrico da fonte de íons do cíclotron Cyclone 30.....	32
FIGURA 9 - Bobina de Desvio XUYU do cíclotron Cyclone 30	33
FIGURA 10 - Esquema de focalização da Einzell Lens	33
FIGURA 11 - Esquema simplificado da atuação do Buncher.....	34
FIGURA 12 - Inflector do cíclotron Cyclone 30 do IPEN.....	35
FIGURA 13 - Região central do cíclotron Cyclone 30	36
FIGURA 14 - Dês e região central do cíclotron Cyclone 30	37
FIGURA 15 - Diagrama do Sistema de RF do cíclotron Cyclone 30.....	38
FIGURA 16 - Eletrodos Dês do cíclotron Cyclone 30	40
FIGURA 17 - Dês de 30° e Fase de RF para aceleração em 4ª harmônica	41
FIGURA 18 - Mecanismo do Stripper do cíclotron Cyclone 30	43
FIGURA 19 - Trajetórias de extração do cíclotron Cyclone 30	44
FIGURA 20 - Mapa das interações do íon H ⁻ atravessando a matéria	45
FIGURA 21 - Magneto Comutador do cíclotron Cyclone 30.....	46
FIGURA 22 - Magnetos de Desvio XY do cíclotron Cyclone 30	46
FIGURA 23 - Quadrupolo do cíclotron Cyclone 30	47
FIGURA 24 - Magneto Comutador Externo	47
FIGURA 25 - Porta-alvo de produção de ¹⁸ F ⁻ do CAC	48
FIGURA 26 - Vista interna do porta-alvo de ¹⁸ F ⁻	49
FIGURA 27 - Função de excitação até 30 MeV da reação ¹⁸ O(p,n) ¹⁸ F	49
FIGURA 28 - Função de excitação até 12 MeV da reação ¹⁸ O(p,n) ¹⁸ F	50

FIGURA 29 - Câmara de vácuo do ciclotron de 4 polegadas de Livingston (1931, à esquerda) e ciclotron CV 28 do IPEN (1998, à direita)	51
FIGURA 30 - Acelerador ciclotron Cyclone 30 do IPEN	58
FIGURA 31 - Estrutura magnética do ciclotron Cyclone 30	59
FIGURA 32 - Tela do sistema de controle do ciclotron Cyclone 30	60
FIGURA 33 - Controlador Lógico Programável do ciclotron Cyclone 30.....	60
FIGURA 34 - Estrutura dos Dês do ciclotron Cyclone 30	61
FIGURA 35 - Fonte de íons e sistema de injeção do ciclotron Cyclone 30	62
FIGURA 36 - Porta-alvo da produção de $^{18}\text{F}^-$ no IPEN com montagem linear.....	64
FIGURA 37 - Porta-alvo da produção de $^{18}\text{F}^-$ no IPEN com montagem em 90°	64
FIGURA 38 - Sensor indutivo com dimensões (em mm) e diagrama elétrico	66
FIGURA 39 - Chave magnética com dimensões (em mm)	67
FIGURA 40 - <i>Microswitch</i> com dimensões (em mm)	68
FIGURA 41 - Posicionamento do experimento	69
FIGURA 42 - Localização do experimento na Sala de Irradiação 1.2.....	70
FIGURA 43 - Montagens de indicadores de posição do fabricante.....	71
FIGURA 44 - Controle de posição da válvula Rheodyne	72
FIGURA 45 - Corrente integrada das irradiações na Sala de Irradiação 1.2.....	73
FIGURA 46 - Ativação radioativa dos três sensores.....	73
FIGURA 47 - Gráfico de controle do sensor indutivo	74
FIGURA 48 - Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 12 ^a semana	75
FIGURA 49 - Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 13 ^a semana	75
FIGURA 50 - Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 14 ^a semana	76
FIGURA 51 - Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 15 ^a semana	76
FIGURA 52 - Placa projetada para fixação dos <i>microswitches</i>	78
FIGURA 53 - Atuador com os três <i>microswitches</i> em posição.....	79
FIGURA 54 - Esquema do funcionamento da carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$...	80
FIGURA 55 - Tela do Sistema de Controle do Alvo de Flúor (neutra)	81
FIGURA 56 - Tela do Sistema do Flúor (carga/enchimento da seringa)	81
FIGURA 57 - Tela do Sistema do Flúor (carga/esvaziamento da seringa)	81
FIGURA 58 - Tela do Sistema do Flúor (fim da carga).....	82
FIGURA 59 - Fluxograma de carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$	83
FIGURA 60 - Fluxograma de carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$ (continuação)	84

LISTA DE ABREVIATURAS

ACSI - Advanced Cyclotron Systems Inc.
AVF - Azimuthally-Varying Field
CAC - Centro de Aceleradores Cíclotron
CDTN - Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear
CLP - Controlador Lógico Programável
CRCN - Centro Regional de Ciências Nucleares
CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTI - Computer Technology and Imaging Inc.
EOB - End of Bombardment
EOS - End of Synthesis
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDG - Fluordesoxiglicose
FFAG - Fixed-Field Alternating Gradient
FM-USP - Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo
GE - General Eletric
IAEA - Internacional Atomic Energy Agency
IBA - Ion Beam Applications
IEN - Instituto de Engenharia Nuclear
INCOR - Instituto do Coração
IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LLRF - Low Level Radiofrequency
PET-CT - Positron Emission Tomography – Computed Tomography
SPECT - Single Photon Emission Computed Tomography
TCC - The Cyclotron Corporation
USP - Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

B - Campo magnético

D^- - Íon negativo do isótopo hidrogênio-2

D^+ - Íon positivo do isótopo hidrogênio-2 ou dêuteron

E_c - Energia cinética

f - Freqüência

[^{18}F]FDG – Radiofármaco fluordesoxiglicose que é marcado com o radioisótopo Flúor-18

h - Modo harmônico do Sistema de Radiofreqüência de um cíclotron

H^- - Íon negativo do átomo de hidrogênio

H^+ - Íon positivo do átomo de hidrogênio ou próton

H_2^{18}O - Água enriquecida no isótopo Oxigênio-18, que apresenta maior quantidade deste isótopo em seu conteúdo do que a normalmente encontrada na natureza, que é de 0,2%

M - Massa

N - Número de aberturas de aceleração num cíclotron

N_{voltas} - Número de voltas que uma partícula executa num cíclotron

q - Carga

r - Raio

$V_{D\hat{e}}$ - Voltagem máxima do eletrodo $D\hat{e}$ de um cíclotron

v - Velocidade

t - Período

w - Freqüência angular

w_{RF} - Freqüência angular do Sistema de Radiofreqüência do cíclotron

w_{P} - Freqüência angular da partícula acelerada no cíclotron

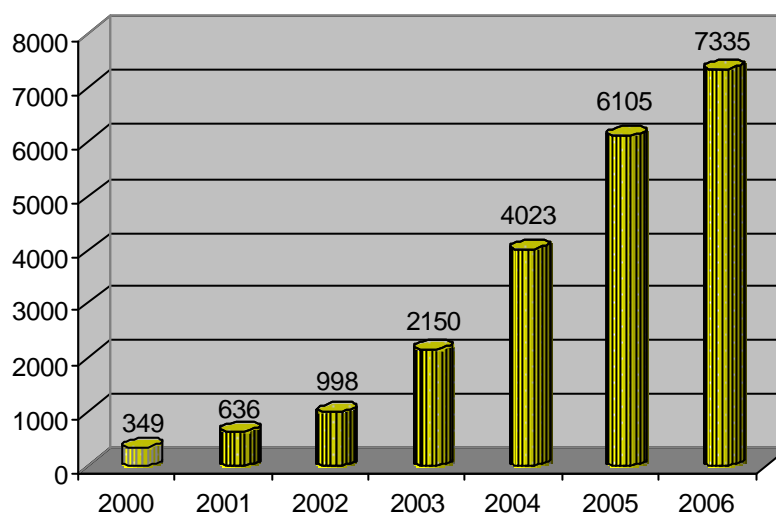
1 INTRODUÇÃO

O Centro de Aceleradores Cíclotron (CAC) do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) é o maior produtor brasileiro do radioisótopo $^{18}\text{F}^-$, utilizado no radiofármaco ^{18}F FDG (fluordesoxiglicose). Este radiofármaco é utilizado em aparelhos denominados tomógrafos PET-CT (Positron Emission Tomography -Computed Tomography) em diagnóstico por imagem para detecção de tumores e acompanhamento de terapias na medicina nuclear. Desde o início da produção rotineira deste radiofármaco pelo IPEN sua procura tem aumentado a taxas em torno de 20% ao ano de acordo com o IPEN (2006). Durante a produção do radioisótopo $^{18}\text{F}^-$ no CAC, algumas falhas ocorridas no sistema de carga e descarga da água enriquecida com oxigênio-18 (H_2^{18}O) resultaram em perda da produção, contaminação por $^{18}\text{F}^-$ nas proximidades do porta-alvo e maior dose de radiação recebida pelos trabalhadores envolvidos com a produção do radioisótopo $^{18}\text{F}^-$. Com base nestas falhas ocorridas foi estabelecido o procedimento de confirmação visual de posicionamento da válvula de carga e descarga do porta-alvo, pelo trabalhador responsável, durante a produção de $^{18}\text{F}^-$, contribuindo para o aumento da dose de radiação recebida por estes trabalhadores em funções rotineiras. Como o fabricante, Ion Beam Applications (IBA), não dispõe de um produto que apresente a solução para este problema esta pesquisa foi realizada.

1.1 Histórico

O início da produção rotineira de $^{18}\text{F}^-$ no IPEN ocorreu no ano de 1997, sendo utilizado o cíclotron modelo CV-28 fabricado pela The Cyclotron Corporation (TCC) e um porta-alvo de pequeno volume (0,3 mL) fabricado pela IBA. O principal cliente era o Instituto do Coração (INCOR) do Hospital da Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (FM-USP) e para a síntese do ^{18}F FDG foi utilizado um Módulo de Síntese de ^{18}F FDG da IBA e a produção de ^{18}F FDG oscilava em torno de $7,4 \times 10^9$ Bq (200 mCi)/irradiação

(EOS). Ao longo dos anos a demanda pelo $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ cresceu, como pode ser visto na FIG. 1 (IPEN, 2006), demanda esta fortemente influenciada pela aquisição de aparelhos PET-CT pelos hospitais e clínicas do estado de São Paulo e de alguns outros centros de medicina nuclear do Brasil. Para atender ao crescimento da demanda pelo $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$, foram feitos investimentos no CAC, como a aquisição do acelerador cíclotron Cyclone 30 da IBA, inaugurado em 1998, e a compra de mais porta-alvos para a produção de $^{18}\text{F}^-$ com câmara de irradiação de 2,4 e 5 mL da IBA. Estas câmaras também sofreram alteração no material de fabricação, passando de prata para titânio e finalmente nióbio que é utilizado até o momento. Novos módulos de síntese de $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$, modelo Tracerlab MX, também foram adquiridos da empresa General Eletric (GE), através da sua divisão GE Healthcare. O IPEN também adquiriu em 2008, com recursos da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), outro acelerador cíclotron da IBA modelo Cyclone 18+ para a produção de $^{18}\text{F}^-$.



Fonte: IPEN, 2006.

FIGURA 1- Número de procedimentos médicos realizados com $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ produzido no IPEN

Várias cidades do Brasil receberam $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ produzido no IPEN, apesar das limitações técnicas de transporte causadas pela meia-vida de 109,7 minutos do $^{18}\text{F}^-$: além das tradicionais cidades de São Paulo e Campinas, pode-se citar Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Salvador e Goiânia.

Com o aumento nacional da demanda pelo $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), responsável até então pelo monopólio

estatal da produção de radiofármacos, iniciou um processo de implantação de centros produtores de [^{18}F]FDG em suas sedes regionais nas cidades do Rio de Janeiro (Instituto de Engenharia Nuclear – IEN), Belo Horizonte (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN) e Recife (Centro Regional de Ciência Nucleares - CRCN) visando atender a demanda dessas regiões.

O monopólio estatal da produção de radiofármacos foi flexibilizado a partir de 8 de fevereiro de 2006 com a aprovação pelo Congresso Nacional da Emenda Constitucional número 49, que estabelece: “... sob regime de permissão, são autorizadas a produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida igual ou inferior a duas horas...” (Brasil, 2007).

Com a flexibilização do monopólio, alguns projetos de centros produtores de [^{18}F]FDG estão surgindo, como o do Instituto do Câncer da Faculdade de Medicina da USP, através de recursos do Governo do Estado de São Paulo, e os de Porto Alegre e Brasília através de investimentos privados.

Atualmente o Centro de Aceleradores Cíclotron do IPEN produz uma atividade que alcança em torno de $2,59 \times 10^{11}$ Bq (7000 mCi)/irradiação de $^{18}\text{F}^-$ (EOB), fornecendo até $1,3 \times 10^{11}$ Bq (3500 mCi)/irradiação de [^{18}F]FDG (EOS) com um faturamento que chegou a R\$ 755.000,00 em janeiro de 2008. Os principais clientes do [^{18}F]FDG do IPEN são os Hospitais Albert Einstein, Sírio-Libanês e A. C. Camargo, todos da cidade de São Paulo.

Apenas como referência, o custo aproximado do cíclotron Cyclone 30 da IBA foi de US\$ 5.500.000,00 em 1997, e o cíclotron Cyclone 18+ também da IBA custou cerca de € 1.100.000,00 no ano de 2007.

1.2 Relevância do tema

A FIG. 2 estabelece um exemplo de linha do tempo para a cadeia produtiva do [^{18}F]FDG produzido pelo IPEN. Devido a meia-vida do produto de 109,7 minutos, não é viável a estocagem: por isso a cadeia produtiva segue o modelo *Just in Time* onde a quantidade produzida é estabelecida pela demanda diária. O sistema de vendas do IPEN registra a quantidade de doses pedidas pelos hospitais e clínicas no dia anterior à produção. O acelerador cíclotron é acionado a partir das 3:30 horas da manhã, a carga do porta-alvo com água enriquecida acima ou igual a 95% em ^{18}O é realizada por volta das 3:45 horas e o material alvo começa a ser irradiado em torno das 3:50 horas. Após

aproximadamente duas horas de irradiação, onde acontece a transformação do ^{18}O em $^{18}\text{F}^-$ através da reação nuclear $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. A água enriquecida com ^{18}O é transferida junto com o $^{18}\text{F}^-$ dissolvido para o módulo de síntese do $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$, o processo de síntese consome cerca de 28 minutos. Após a síntese o produto é fracionado, embalado e rotulado, seguindo através de transporte rodoviário/aeroviário para os hospitais e clínicas que realizam o exame. Concomitantemente é realizado o controle de qualidade do produto.

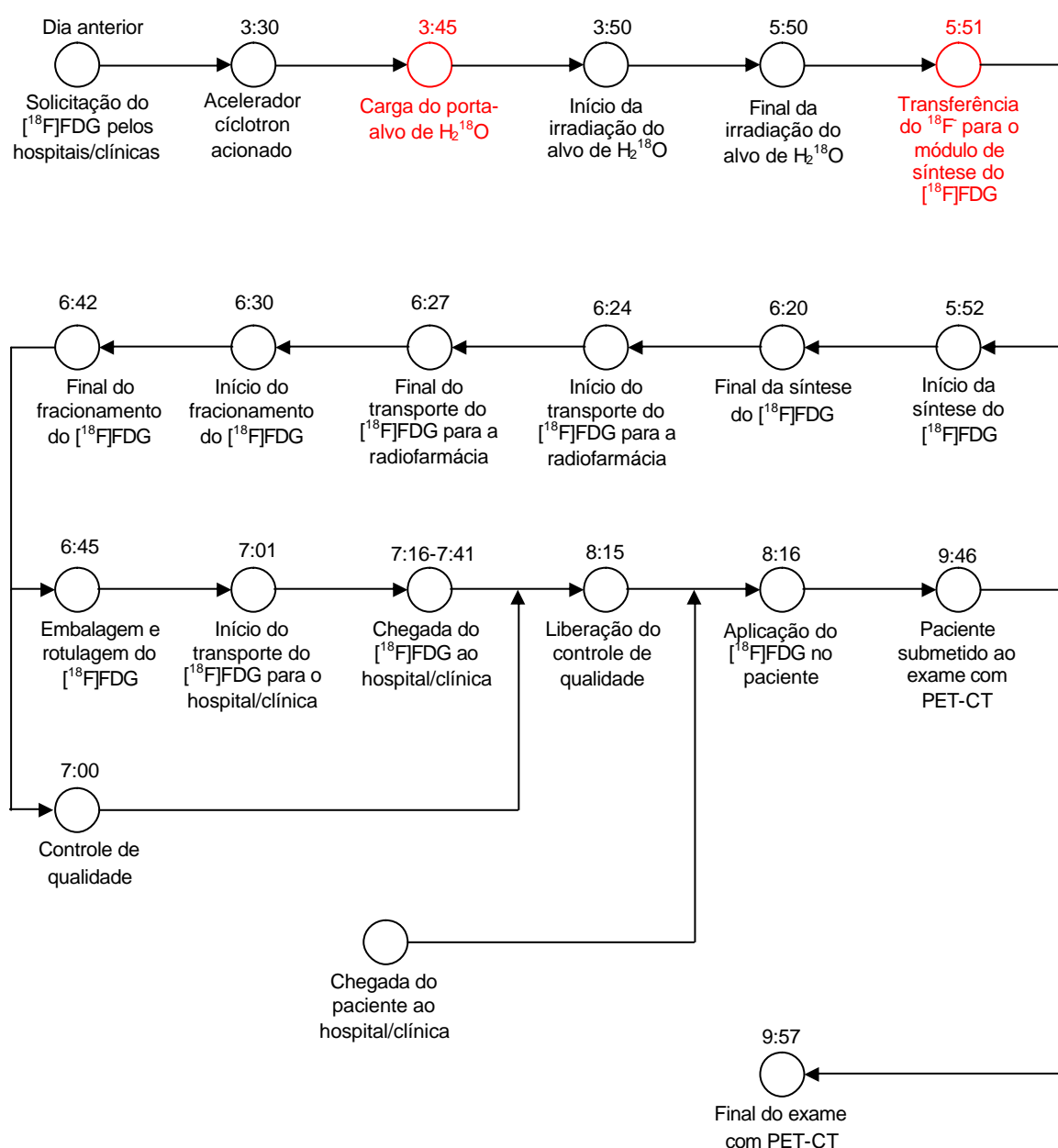


FIGURA 2 – Linha do tempo da cadeia produtiva do $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$

A preparação do paciente segue paralelamente ao processo produtivo, pois com a chegada do $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ ao hospital/clínica o paciente já deve estar

preparado para receber a dose, aguardar o tempo de absorção que o protocolo estabelece, e ser encaminhado ao PET-CT, o tempo de permanência do paciente no tomógrafo depende do protocolo, no exemplo acima foi de 11 minutos.

Uma falha na produção do [^{18}F]FDG pode atrasar ou impedir o fornecimento do produto para o hospital/clínica, e como há poucos centros produtores deste radiofármaco no Brasil, além de sua meia-vida curta inviabilizar economicamente o transporte por longas distâncias, há muito poucas opções para substituições imediatas de fornecedor. Portanto, a confiabilidade da cadeia produtiva é de vital importância para todos os envolvidos na realização de exames com PET-CT utilizando o radiofármaco [^{18}F]FDG.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é otimizar os procedimentos de carga e descarga do porta-alvo utilizado para a produção de $^{18}\text{F}^-$ no cíclotron Cyclone 30 do IPEN, aumentando a confiabilidade dos procedimentos e sua eficácia, além de diminuir a exposição à radiação dos trabalhadores responsáveis por estas tarefas.

2.1 Alcance da pesquisa e delimitação do assunto

Este trabalho busca determinar os componentes mais adequados para corrigir a falha apresentada no sistema de carga e descarga de H_2^{18}O durante a produção de $^{18}\text{F}^-$ no Centro de Aceleradores Cíclotron do IPEN. A intenção não é estabelecer qual componente é o melhor, mas sim qual possui características que permitam funcionar adequadamente, com a maior vida útil possível, num ambiente sujeito a altas taxas de radiação, principalmente radiação gama e nêutrons, além de fortes campos magnéticos que existem dentro da Sala de Irradiação do cíclotron Cyclone 30 do IPEN, onde está montado o porta-alvo para a irradiação de H_2^{18}O utilizado nas produções de $^{18}\text{F}^-$. Não é propósito deste trabalho buscar soluções para os problemas que os componentes apresentem neste tipo de ambiente, apenas defini-los como adequados ou não para a tarefa que irão desempenhar.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Uma breve história dos aceleradores

A história dos aceleradores é muito bem resumida por Bryant (1994) através de três seqüências de eventos distintos que o autor chama de “Linha histórica principal”, “Segunda linha histórica” e “Terceira linha histórica”, que estão representadas nas TAB. 1, 2 e 3.

TABELA 1 – Linha histórica principal

1895	Lenard. Espalhamento de elétrons em gases (Prêmio Nobel).	Elétrons <100 keV.
1913	Franck e Hertz provocam excitação em camadas de elétrons por bombardeamento de elétrons.	Máquinas do tipo Wimshurst.
1906	Rutherford bombardeia folhas de mica com núcleos de partícula alfa naturais e desenvolve a teoria do espalhamento atômico.	Partículas alfa naturais de vários MeV.
1911	Rutherford publica a teoria da estrutura atômica.	
1919	Rutherford induz uma reação nuclear com núcleos alfa naturais.	
... Rutherford acredita que necessita uma fonte de muitos MeV para continuar pesquisando sobre os núcleos. Isto é muito além do que as máquinas eletrostáticas que existiam até então, mas...		
1928	Gamov prevê o “tunelamento” (efeito túnel) e talvez 500 keV seriam suficientes...	
1928	Cockcroft & Walton iniciam o projeto de um gerador de 800 kV encorajados por Rutherford.	
1932	O gerador alcança 700 kV e Cockcroft & Walton desintegram átomos de lítio com apenas 400 keV de prótons. Eles recebem o Prêmio Nobel em 1951.	

Fonte: Bryant, 1994.

TABELA 2 – Segunda linha histórica

1924	Ising propõe campos variando no tempo através de tubos de aceleração. Esta é a “aceleração ressonante”, que pode alcançar energias acima da fornecida pela maior voltagem no sistema.
1928	Wideröe demonstra o princípio de Ising com um oscilador de 1 MHz e 25 kV para criar íons de potássio de 50 keV.
1929	Lawrence, inspirado por Wideröe e Ising, idealiza o cíclotron.
1931	Livingston demonstra o cíclotron pela aceleração de íons hidrogênio a 80 keV.
1932	O cíclotron de Lawrence produz prótons de 1,25 MeV e ele desintegra o átomo umas poucas semanas após Cockcroft & Walton (Lawrence recebeu o Prêmio Nobel em 1939).

Fonte: Bryant, 1994.

TABELA 3 – Terceira linha histórica

1923	Wideröe, um jovem estudante norueguês, esboça no seu caderno de anotações do laboratório o projeto do bétatron com a conhecida regra 2 para 1. Dois anos mais tarde ele acrescenta a condição para a estabilidade radial mas não publica .
1927	Mais tarde em Aachen, Wideröe faz um bétatron modelo, mas ele não funciona. Desencorajado, ele muda o curso e constrói o acelerador linear mencionado na TAB. 2.
1940	Kerst reinventa o bétatron e constrói a primeira máquina que funciona para elétrons de 2,2 MeV.
1950	Kerst constrói o maior bétatron do mundo de 300 MeV.

Fonte: Bryant, 1994.

Para conseguir compreender melhor a estrutura da matéria, houve a necessidade de acelerar partículas a energias cada vez maiores. A limitação da energia das partículas aceleradas sempre esteve ligada a critérios técnicos e econômicos. O projeto do acelerador do tipo cíclotron surgiu neste contexto, e desde então muitas melhorias foram feitas, podendo ser citada como uma das principais, a solução de Thomas para os problemas de focalização e sincronismo que o cíclotron clássico tinha. O cíclotron foi concebido por Lawrence como um acelerador em que as partículas executam uma trajetória espiral no interior de um campo magnético constante, ganhando energia quando atravessam a área que divide os dois eletrodos chamados de Dês: a polaridade dos Dês oscila com o

tempo através de uma fonte de R.F. (radiofreqüência), conforme FIG. 3 e, para a partícula ganhar energia, a passagem dela na área entre os dois eletrodos deve estar sincronizada com a alternância de polaridade dos eletrodos. Este tipo de projeto garantiu a criação de aceleradores compactos, que não necessitam de uma área muito grande para a instalação, o que é uma vantagem econômica.

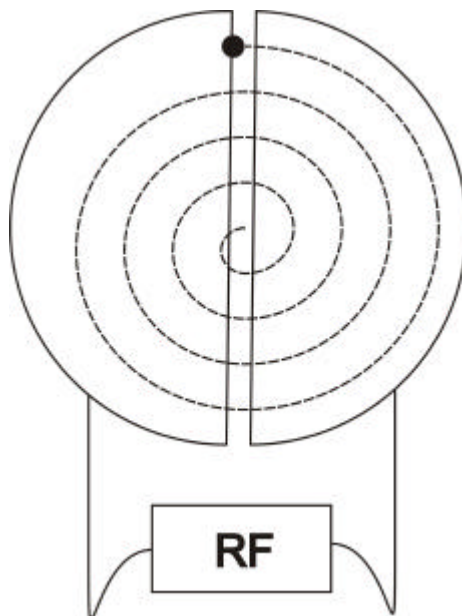


FIGURA 3 – Esquema do acelerador cíclotron clássico

No acelerador cíclotron, o equilíbrio entre a força centrípeta e a força eletromagnética é dado por:

$$\frac{Mv^2}{r} = qvB. \quad (1)$$

Através deste equilíbrio pode-se estabelecer a velocidade da partícula como sendo:

$$v = \frac{qBr}{M} \quad (2)$$

onde q é a carga da partícula, B é o campo magnético, r o raio da trajetória da partícula e M a massa da partícula. O período para a partícula completar uma volta é:

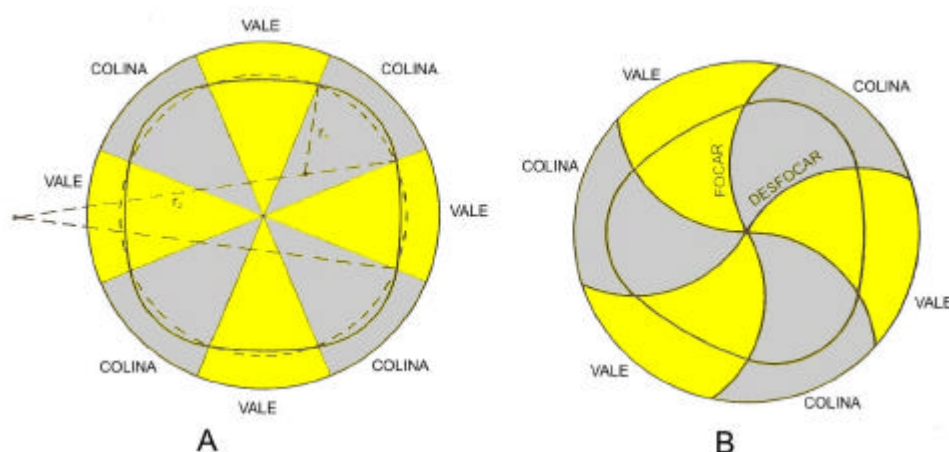
$$t = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi r}{qBr / M} = \frac{2\pi M}{Bq} \quad (3)$$

A Eq. 3 mostra que o período de revolução da partícula independe da velocidade e do raio da órbita, e sim da intensidade do campo magnético e da

relação carga-massa. Assim, para os aceleradores cíclotron de frequência fixa basta ajustar o campo magnético para atingir a condição de ressonância.

Para conseguir acelerar partículas com energia cada vez maiores usando aceleradores do tipo cíclotron, torna-se necessário projetar cíclotrons com bobinas magnéticas e eletrodos Dês com raios cada vez maiores. Porém, o aumento da massa da partícula devido a efeitos relativísticos e a dificuldade de focalização do feixe nas últimas órbitas limitaram a energia dos aceleradores cíclotron com este tipo de projeto entre 20 e 25 MeV, conforme Livingood (1961).

Segundo Livingood (1961), L. H. Thomas publicou em 1938 um trabalho que tratava da estabilidade radial e axial das órbitas das partículas aceleradas através de condução e focalização magnética. Várias expressões são utilizadas para descrever o princípio de Thomas como FFAG, “*fixed-field alternating gradient*” (campo fixo, gradiente alternado), AVF, “*azimuthally-varying field*” (campo variável azimutalmente), ou foco por setor. Nos cíclotrons que adotam esta solução, as faces dos pólos da bobina principal não são constantemente nivelados, mas apresentam uma variação da distância de abertura entre eles através de setores circulares, gerando variações no campo magnético azimutalmente no interior do acelerador. As regiões de menor abertura são denominadas de montes ou colinas, e possuem o campo magnético mais forte, enquanto as de maior abertura são denominadas de vales com um campo



Fonte: Livingood, 1961.

FIGURA 4 – Exemplos de setores de Thomas

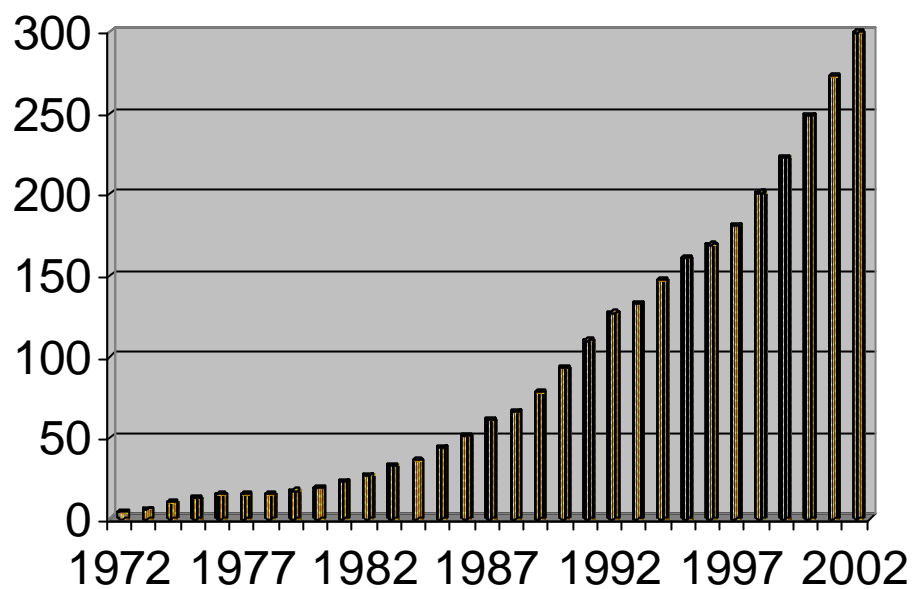
magnético mais fraco. A FIG. 4 representa exemplos de setores de Thomas, que de acordo com Livingood (1961), aumentam a estabilidade axial e provocam o aumento do campo magnético médio em função do raio, podendo deste modo

corrigir o efeito relativístico de aumento da massa da partícula. Com estas e outras correções, os chamados cíclotrons isócronos conseguiram atingir faixas de energia da ordem de centenas de milhões de elétron-volt. No IPEN, o cíclotron Cyclone 30 de fabricação belga possui os setores de Thomas similares aos da FIG. 4-A, enquanto o antigo cíclotron CV-28, de procedência norte-americana, utilizava setores de Thomas similares aos da FIG. 4-B.

A construção de grandes aceleradores continua até hoje, como o Grande Colisor de Hádrons (LHC – Large Hadron Collider) na fronteira franco-suíça, e o projeto do Colisor Linear Internacional (ILC – Internacional Linear Collider). Mas, os aceleradores do tipo cíclotron ganharam escala industrial de produção devido a uma série de fatores, cujos principais são faixa de energia compatível para atender a demanda mundial de fabricação de radioisótopos e o custo de fabricação e instalação. Em IAEA (2006), a Agência Internacional de Energia Atômica (Internacional Atomic Energy Agency - IAEA) conclui que:

- Existem cerca de 350 cíclotrons ou mais, operando no mundo, que estão envolvidos em algum aspecto com a produção de radionuclídeos;
- É significativo e crescente o número de instituições que distribuem radiofármacos, e o $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ em particular, e pelo menos 75% dos cíclotrons são usados para a produção de $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$;
- A expansão do número de cíclotrons nos últimos dez anos tem sido dirigida pelo advento dos avanços em instrumentação de imagens médicas (PET, SPECT e mais recentemente PET-CT), além da fabricação de cíclotrons compactos específicos para a área médica por diversos fabricantes, e o pagamento pelo governo ou por companhias de seguro-saúde de reembolso de exames feitos com radiofármacos para PET;
- Não há dúvidas que o maior crescimento deste segmento do mercado é a distribuição comercial de $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ para hospitais locais;
- O número de tipos de cíclotrons disponíveis comercialmente é grande e crescente, a faixa de energia vai de alguns poucos MeV para a produção de radioisótopos para exames com PET até centenas de MeV para terapia com prótons ou produção de radioisótopos que requerem altas energias.

A FIG. 5 mostra o crescimento do número de aceleradores cíclotrons no mundo desde a década de 70 até o ano de 2002.



Fonte: IAEA, 2006.

FIGURA 5 – Crescimento do número de cíclotrons no mundo

A TAB. 4 lista os fabricantes de cíclotrons comerciais e suas características de acordo com IAEA (2006).

TABELA 4 – Fabricantes de cíclotrons comerciais e suas características

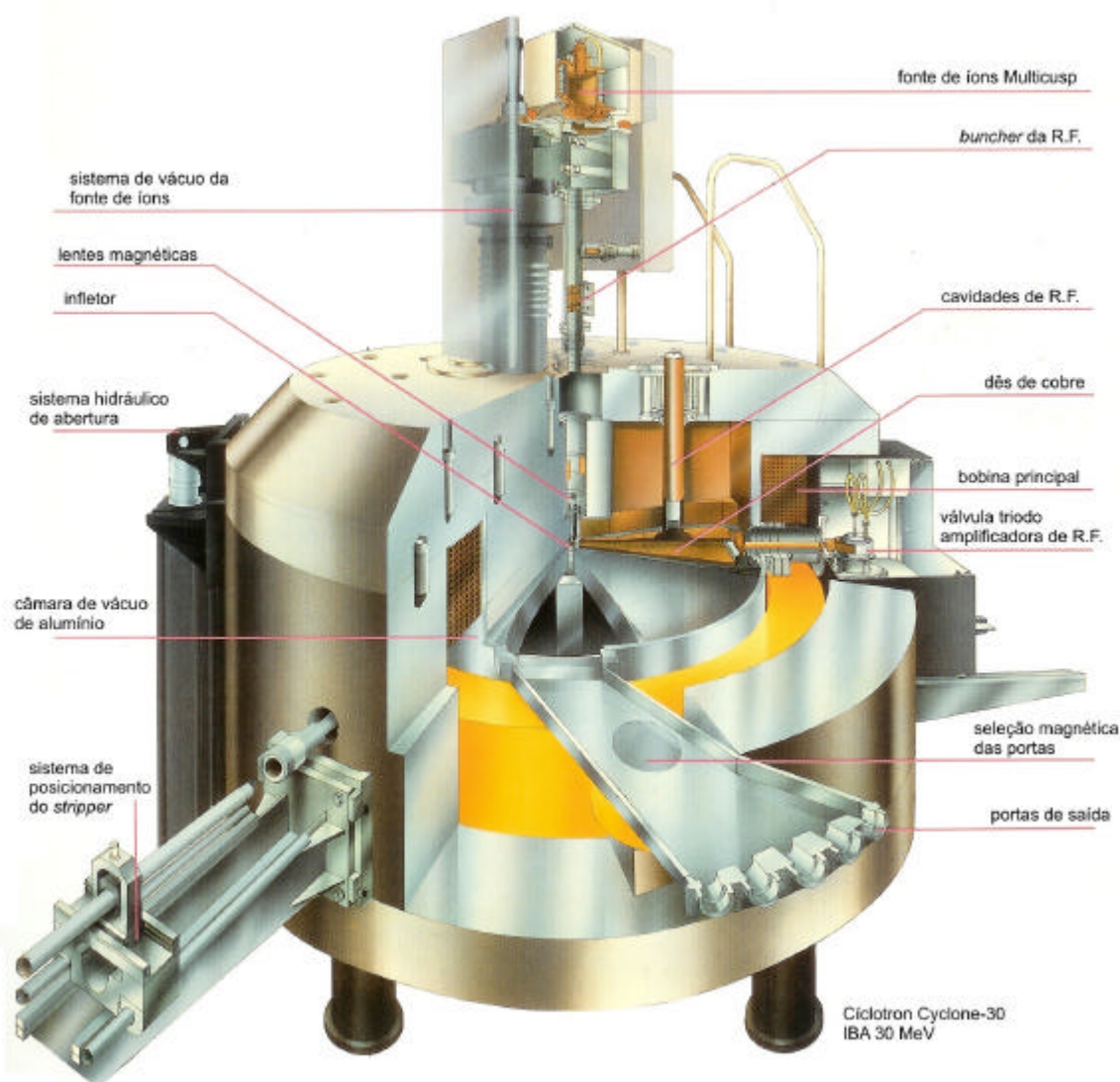
Companhia	Modelo	Descrição	Op.	Pl.
CTI, Inc.	RDS 111	11 MeV H ⁺ , 60μA	44	10
	RDS 112	11 MeV H ⁺ , 60μA	30	
Ebco Technologies	TR14	11-14 MeV H ⁺ , 100μA	2	
	TR19	19 MeV H ⁺ , 160μA	2	
	TR19/9	19 MeV H ⁺ , 9 MeV D ⁻ , 160μA	1	3
	TR30	30 MeV H ⁺ , 100μA	2	
	TR30/15	30MeV H ⁺ , 15 MeV D ⁻ , 160μA	1	
D. V. Efremov Institute	MGC-20	18 MeV H ⁺ , 10 MeV D ⁻ , 160μA	4	2
General Eletric	MiniTrace	9,6 MeV H ⁻ , 50μA	2	
	PETrace	16,5 MeV H ⁻ , 8,6 MeV D ⁻ , 80μA	16	
Ion Beam Applications	Cyclone 3	3,8 MeV D ⁻ , 60μA	2	
	Cyclone 10/5	10 MeV H ⁺ , 5 MeV D ⁻ , 60μA	3	
	Cyclone 18/9	18 MeV H ⁺ , 9 MeV D ⁻ , 80 μA	15	5
	Cyclone 18+	18 MeV H ⁺ , 80μA	1	
	Cyclone 30	30 MeV H ⁺ , 15 MeV D ⁻ , 400 μA	16	2
	Cyclone 235	240 MeV H ⁺	1	
Japan Steel Works	BC168	16 MeV H ⁺ , 8 MeV D ⁺ , 50μA	2	
	BC1710	17 MeV H ⁺ , 10 MeV D ⁺ , 60μA	7	
	BC2010N	20 MeV H ⁺ , 10 MeV D ⁻ , 60μA	2	
	BC2211	22 MeV H ⁺ , 11 MeV D ⁺ , 60μA	1	
	BC3015	30 MeV H ⁺ , 15 MeV D ⁺ , 60μA	1	
Oxford Instrument Co.	OSCAR 12	12MeV H ⁺ , 60μA	5	
Scanditronix Medical AB	MC17	17,2 MeV H ⁺ , 8,3 MeV D ⁺ , 60μA	13	
		12 MeV ³ He ⁺⁺ , 16,5 MeV ⁴ He ⁺⁺ , 60μA		
	MC30	30 MeV H ⁺ , 15 MeV D ⁺ , 60μA		
	MC32NI	15-32 MeV H ⁺ , 8-16 MeV D ⁻ , 60μA	3	
	MC40	10-40 MeV H ⁺ , 5-20 MeV D ⁺ , 60μA	6	
		13-53 MeV ³ He ⁺⁺ , 10-40 MeV ⁴ He ⁺⁺ , 60μA		
	MC50	18-52 MeV H ⁺ , 9-25 MeV D ⁺ , 60μA	1	
24-67 MeV ³ He ⁺⁺ , 18-50 MeV ⁴ He ⁺⁺ , 60 μA				
MC60	50 MeV H ⁺ , 60μA	1		
K130	6-90 MeV H ⁺ , 10-65 MeV D ⁻ , 60μA 16-173 MeV ³ He ⁺⁺ , 20-130 ⁴ He ⁺⁺			
Sumitomo Heavy Industries	Cypris 325	16 MeV H ⁺ , 8 MeV D ⁺ , 60μA	1	
	Cypris 370	16 MeV H ⁺ , 10 MeV D ⁺ , 60UA	4	
	HM18	18 MeV H ⁺ , 10 MeV D ⁻ , 60μA	7	
	HM12	12 MeV H ⁺ , 6 MeV D ⁻ , 60μA	1	
	480 AVF	30 MeV H ⁺ , 60μA	1	
	AVF 680	40 MeV H ⁺ , 60μA	1	
	AVF 715	50 MeV H ⁺ , 60μA		
	AVF 750	70 MeV H ⁺ , 60μA	1	
	AVF 930	90 MeV H ⁺ , 60μA	2	
	AVF 1000	80 MeV H ⁺ , 60μA		
	Ring Cyclotron 400	400 MeV H ⁺ (K=400), 60μA	1	
	Ring Cyclotron 540	240 MeV H ⁺ (K=540), 60μA	1	
	C235	240 MeV H ⁺ , 60μA	1	
KIRAMS	Kirams-13	13 MeV H ⁺ , 100μA	3	

Op.=operacionais; Pl.= planejados

Fonte: IAEA,2006.

3.2 O caminho do íon

O acelerador cíclotron utilizado no IPEN para a produção de radioisótopos é um modelo Cyclone 30, conforme FIG. 6, foi fabricado pela empresa belga Ion Beam Applications e suas características técnicas encontram-se no capítulo 4, Materiais e métodos. Esta seção pretende descrever, de uma forma simples, a criação e o caminho do íon ao longo de sua trajetória no acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN até a colisão com o material alvo e as respectivas reações nucleares.



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 6 - Acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN

3.2.1 A seleção do gás

O gás utilizado para a criação dos íons no acelerador é o hidrogênio, fabricado pela empresa Air Products. Ele é armazenado num cilindro de 8,1 m³ de gás, sob uma pressão de 18202,8 kPa (2640 PSIG) a 21°C, e suas características técnicas estão descritas abaixo (de acordo com o Certificado de Análise expedido pela empresa fabricante Air Products):

Grau de pureza	99,999% (mínimo de H ₂) Ultra Puro
N ₂	5,0 ppm máximo
H ₂ O	1,0 ppm máximo
O ₂	1,0 ppm máximo
CO	1,0 ppm máximo
CO ₂	1,0 ppm máximo
THC	1,0 ppm máximo

Na saída do cilindro, a pressão do gás hidrogênio é reduzida para 100 kPa (1 bar), sendo conduzido através de uma tubulação até a válvula de controle de fluxo, que regula o fluxo de entrada do gás na fonte de íons em uma faixa de vai de $1,67 \times 10^{-7}$ a $3,33 \times 10^{-7}$ m³/s (10 a 20 cm³/minuto padrões).

3.2.2 A criação do íon negativo

O cíclotron Cyclone 30 do IPEN possui uma fonte de íons marca AEA Technology, modelo *series 4/3N injector*, fabricada no Reino Unido (AEA Technology, 1994). Esta fonte é do tipo “MULTICUSP”, desenvolvida na Universidade de Berkeley por K. N. Leung. Segundo IBA (1994), o uso de uma fonte de íons externa nos cíclotrons que aceleram íons negativos (H⁻) evita problemas com o excesso de gás dentro da câmara de aceleração. Nas fontes de íons internas, a maioria do gás é lançado dentro da câmara de aceleração, prejudicando o vácuo no interior do acelerador. Além disso, o aumento da pressão causa o *stripping* parcial dos íons H⁻ durante a aceleração levando a perdas significativas do feixe, causando ativação no acelerador e deste modo aumentando a exposição dos trabalhadores durante as operações de manutenção. Com a fonte de íons externa, o hidrogênio não ionizado é bombeado pelo sistema de vácuo da fonte de íons.

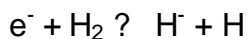
Segundo Angert (1994), as fontes de íons do tipo “MULTICUSP” são adequadas para produzir um grande volume de plasma estável e uniforme, conseqüentemente, altas correntes de feixe.

Na FIG. 7 pode ser vista uma representação gráfica da formação e extração dos íons H^+ na fonte de íons do cíclotron. Com a fonte de íons desligada, o vácuo no seu interior chega a 9×10^{-9} Pa (9×10^{-7} mbar) e, uma vez ligada, a válvula de injeção de hidrogênio é acionada e o vácuo no interior da fonte diminui para cerca de 2×10^{-7} Pa (2×10^{-5} mbar). A seguir, são ligadas todas suas fontes de potência elétrica, projetadas para fornecer as tensões e correntes necessárias para os diversos dispositivos: Filamento, Arco, Supressor de Elétrons, Puller e Grade de Plasma, FIG. 8.

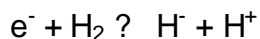
O Filamento funciona como um catodo e as paredes da câmara de plasma da fonte de íons funcionam como um anodo, e quando ligados, ocorre a formação de arco voltaico entre o Filamento e as paredes da câmara. A fonte de Arco, que alimenta as paredes, trabalha com até 120 V de tensão e corrente de trabalho máxima em torno de 20 A.

O Filamento de tungstênio trabalha com voltagem de até 12 VCC e corrente na faixa de 35 a 55 A (a intensidade do feixe é ajustada pela intensidade da corrente do Filamento). Com o aquecimento do Filamento, ocorre a geração de elétrons livres através da emissão termoiônica e a formação da carga espacial (nuvem de elétrons em torno do Filamento). Estes elétrons livres reagem com as moléculas de hidrogênio no interior da fonte de íons através de um mecanismo físico-químico denominado “processos de volume por impacto de elétrons”. As fontes de íons do tipo “MULTICUSP” possuem sua câmara de geração de plasma circundada por imãs com a polaridade alternada, refrigerados a água, cuja função é criar um filtro magnético transversal próximo à região de extração, que pode ser visto na FIG. 7. Este campo magnético é suficientemente forte para impedir que elétrons primários, energeticamente carregados, provenientes do filamento (catodo), penetrem na região de extração. Íons positivos e negativos juntos com elétrons lentos podem penetrar no filtro para formar um plasma frio em que o íon H^+ pode ser produzido com alta eficiência através dos processos de volume por impacto de elétrons (Angert, 1994):

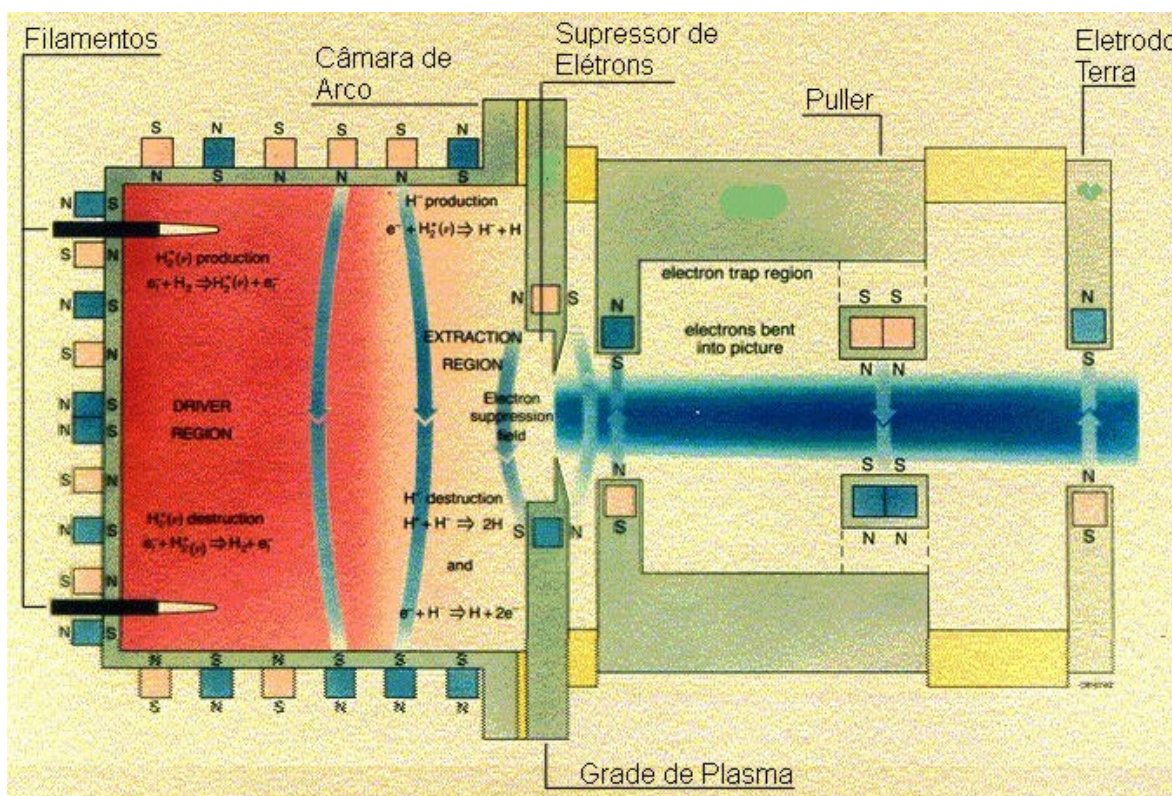
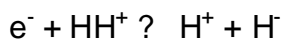
- Ligação dissociativa: elétrons lentos se ligam a átomos durante suas interações com moléculas neutras



- Ligação dissociativa polar: o elétron não é capturado, apenas provoca a excitação da molécula para um estado instável



- Recombinação dissociativa: colisões de elétrons lentos com íons moleculares positivos provocam a criação de íons negativos



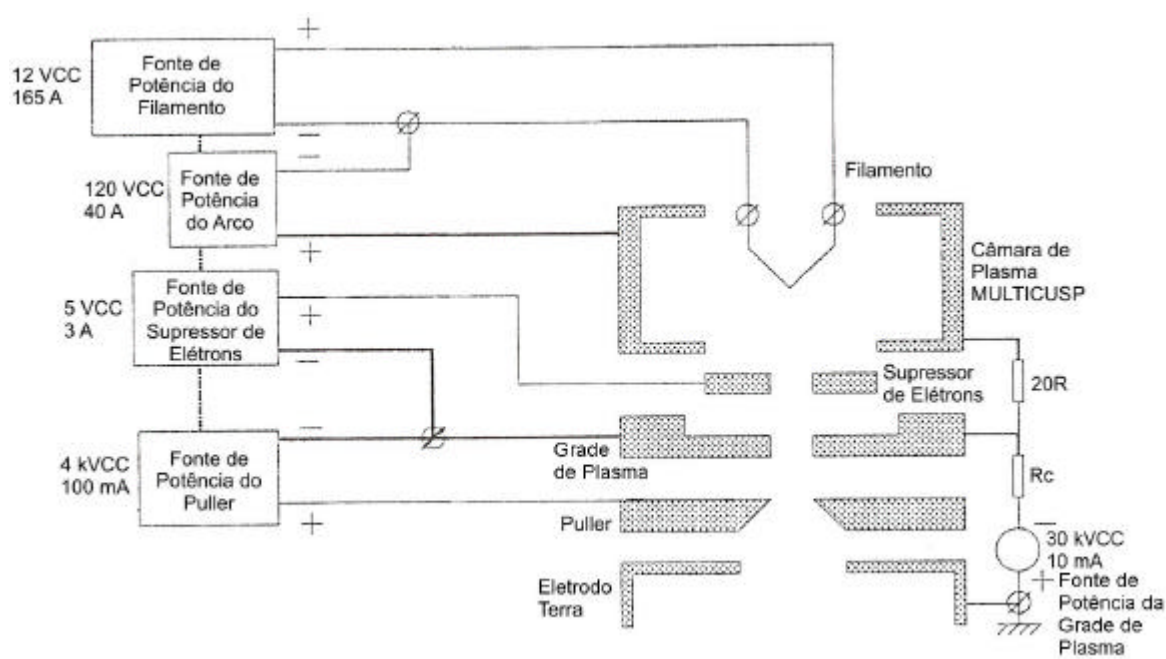
Fonte: IBA.

FIGURA 7 – Funcionamento da fonte de íons do cíclotron Cyclone 30

3.2.3 A extração do feixe de íons H^-

Com a criação de um grande volume estável e uniforme de plasma de H^- na Câmara de Arco, é necessário extrair um feixe destes íons e direcioná-lo para o centro do cíclotron, tarefa esta realizada pelos eletrodos mostrados nas FIG. 7 e 8. A Grade de Plasma atua com um potencial de referência para os outros eletrodos, conforme FIG. 8, e ajuda a confinar o plasma no interior da câmara, ocorrendo a formação de uma fronteira curvada de plasma acima do orifício central da Grade de Plasma (Angert, 1994). Esta fronteira é criada pelo equilíbrio entre a pressão do plasma e a voltagem aplicada na grade. Os íons H^-

que estão na fronteira curvada de plasma são “puxados” pelo Puller, também conhecido como eletrodo de extração, que está num potencial em torno de +3 kVCC, e convergem na direção do Puller, ao passarem pelo orifício da Grade de Plasma (que está num potencial próximo a -30 kVCC) eles ganham energia e são acelerados em direção ao centro da máquina (injeção axial). Para poder filtrar os elétrons livres que também seguem o fluxo dos íons H^+ o Supressor de Elétrons, através de um potencial que alcança até +5 VCC, desvia os elétrons do feixe de íons H^+ em formação.



Fonte: IBA.

FIGURA 8 – Esquema elétrico da fonte de íons do ciclotron Cyclone 30

3.2.4 Ajuste de direção e primeira focalização do feixe

Ao sair da Fonte de Íons, os primeiros dispositivos que o feixe acelerado de H^+ encontra são dois dipolos magnéticos, chamados de Bobinas de Desvio ou Steering Coils, vistas na FIG. 9, que são utilizados para o ajuste fino da trajetória axial do feixe de H^+ , e provocam deslocamento lateral ao longo de dois eixos perpendiculares entre si, ambos perpendiculares à injeção axial (IBA, 1995). Estes dois dipolos centralizam o feixe de H^+ na linha de injeção.

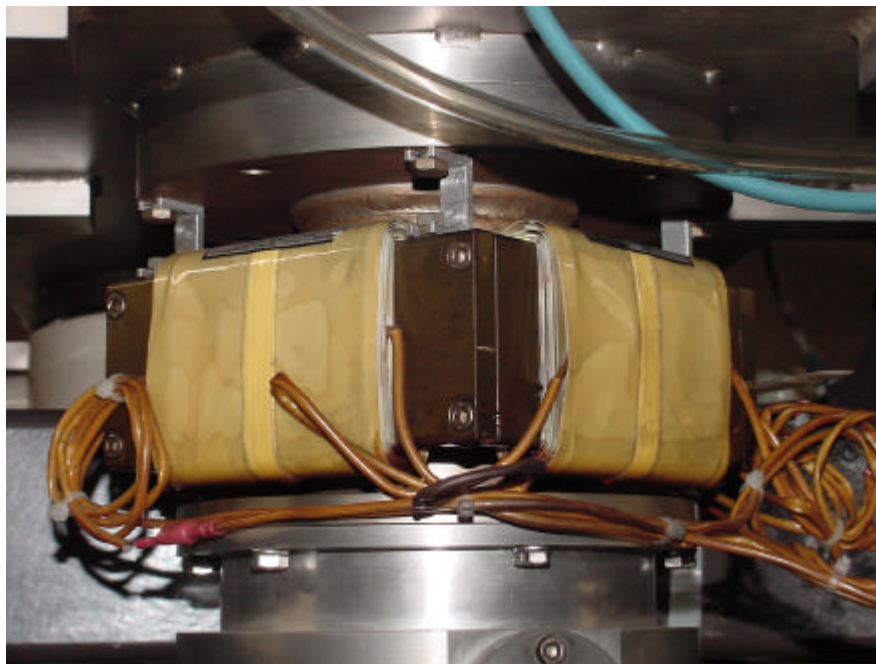


FIGURA 9 – Bobina de Desvio XUYU do cíclotron Cyclone 30

Após passar pelos dipolos magnéticos o feixe de íons H^+ sofre a ação de uma lente eletrostática conhecida como Einzel Lens, FIG. 10. Esta lente trabalha com voltagem de até -20 kVCC , e ao passar pelo interior do eletrodo o campo elétrico fornece uma primeira e fraca focalização na linha de injeção.

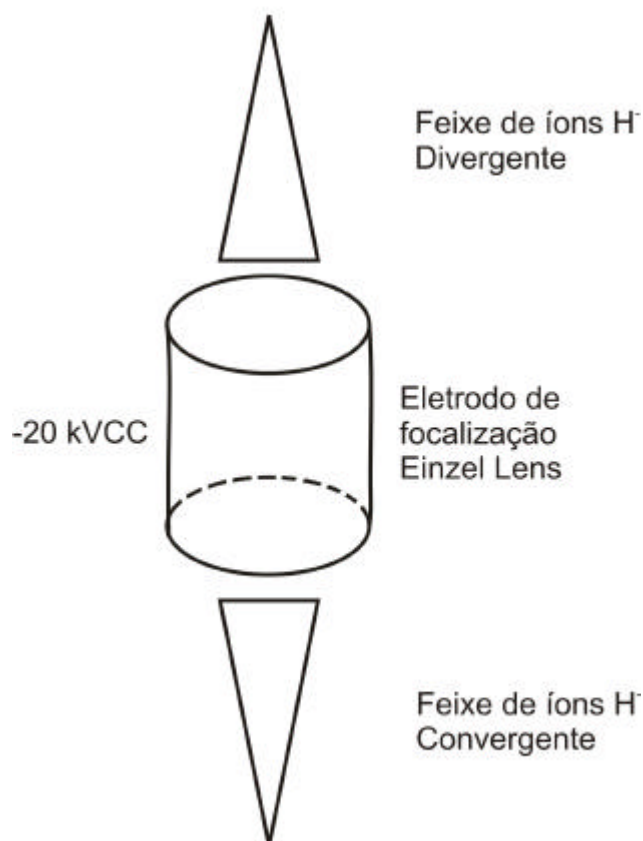


FIGURA 10 – Esquema de focalização da Einzel Lens

3.2.5 Agrupamento por Buncher e segunda focalização

De acordo com Gardini (1982) *buncher* é o eletrodo de uma válvula de velocidade modulada que concentra em grupos os elétrons do feixe de corrente constante de elétrons, e *buncher space* ou *buncher gap* é a parte de um tubo a seguir ao espaço de aceleração onde existe um campo de alta frequência devido ao sinal de entrada, no qual ocorre a modulação de velocidade do feixe de elétrons. No caso do ciclotron Cyclone 30, necessita-se apenas trocar elétrons por íons H^- para usar estas definições. Ao passar pelo Buncher, FIG. 11, o feixe de íons H^- sofre a ação de um campo de radiofrequência de 65,5 MHz, que causa um agrupamento dos íons H^- ao longo do feixe que aumenta a eficiência de aceleração dos eletrodos Dês no interior do acelerador.

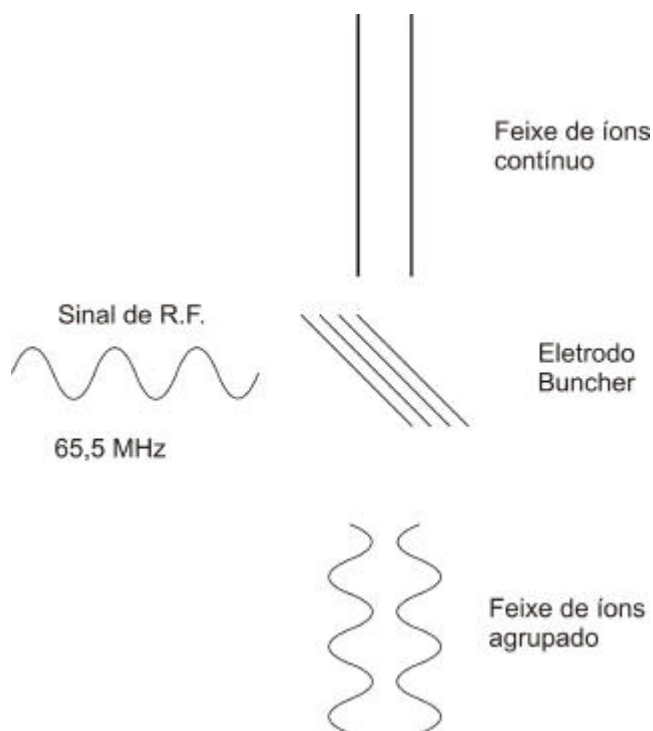


FIGURA 11 – Esquema simplificado da atuação do Buncher

Após passar pelo Buncher, o feixe de íons H^- sofre a ação de uma lente solenóide chamada de Glaser, suportada por uma fonte de potência de 330 A e 15 VCC. A Glaser tem a função de focalizar fortemente o feixe para que ele fique num formato aceitável para a entrada do Inflector (IBA, 1995).

3.2.6 Inflexão do feixe de íons H^-

O Inflector mostrado na FIG. 12, é uma peça em formato pseudocilíndrico (IBA, 1994), localizado na região central do acelerador, nas quais

são aplicadas tensões de até +/-10 kVCC (um eletrodo é polarizado positivamente, enquanto o outro é polarizado negativamente). Os dois eletrodos do Inflector geram um campo elétrico que desvia o feixe de íons H^- perpendicularmente a sua trajetória (IBA, 1995), e assim o feixe atinge a primeira volta da região central do cíclotron, mostrada na FIG. 13, podendo sofrer a ação dos eletrodos Dês e do campo magnético principal.



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 12 – Inflector do cíclotron Cyclone 30 do IPEN

3.2.7 A aceleração dos íons H^-

A aceleração dos íons H^- no interior do acelerador é obtido pela condição de ressonância, conforme visto na Eq. 3 na seção 3.1. Sabe-se que a freqüência é o inverso do período $f = 1/t$, então a freqüência para o acelerador cíclotron pode ser representada como:

$$f = \frac{Bq}{2\pi M} \quad (4)$$

E como a freqüência angular é dada por:

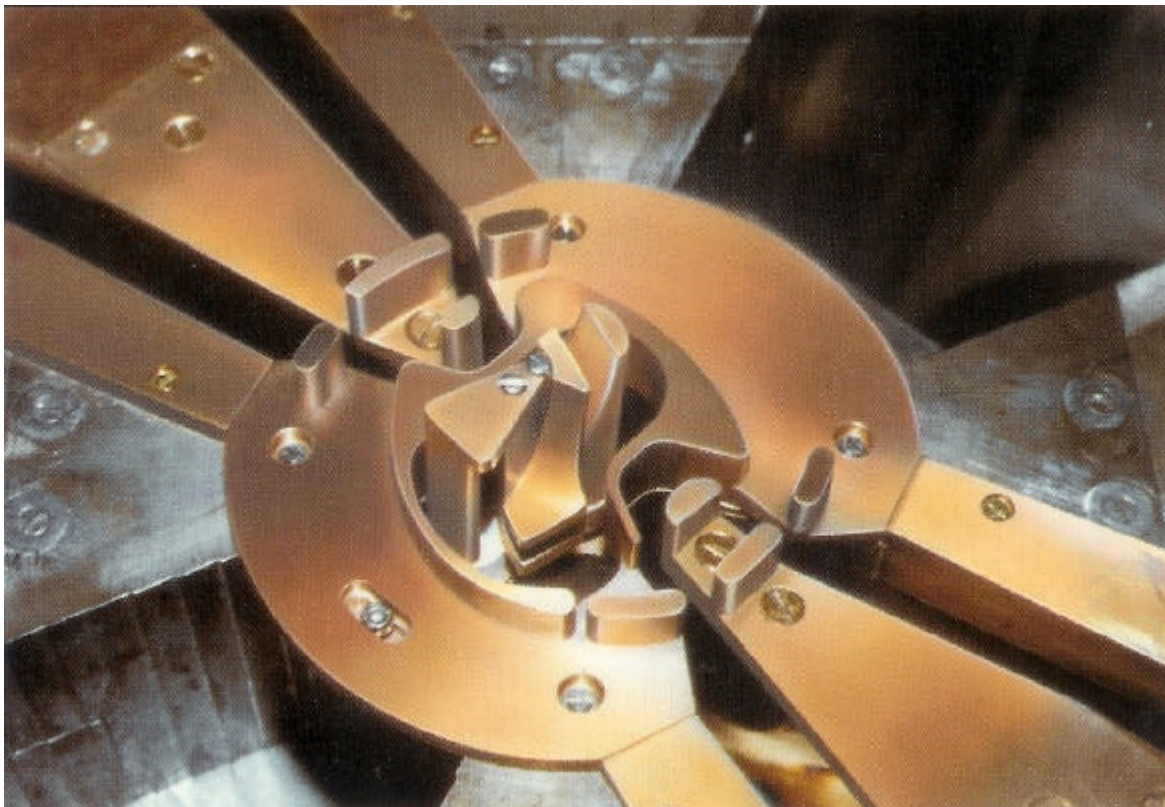
$$\omega = 2\pi f \quad (5)$$

Obtém-se a freqüência angular ou freqüência cíclotron como sendo:

$$\omega = \frac{qB}{M} \quad (6)$$

De acordo com Heikkinen (1994), nos cíclotrons isócronos a freqüência angular da partícula não depende da energia, como pode ser observado na Eq. 6.

Partículas na mesma abertura de aceleração mas em fases diferentes obtêm ganho de energia diferentes, e esta diferença tende a aumentar ao longo das aberturas de aceleração, e por conta disso, o aumento da faixa de energia de um agrupamento de partículas (*bunch*) tende a aumentar a largura do *bunch* radialmente, dificultando a eficiência de extração.



Fonte: IBA, 1994.

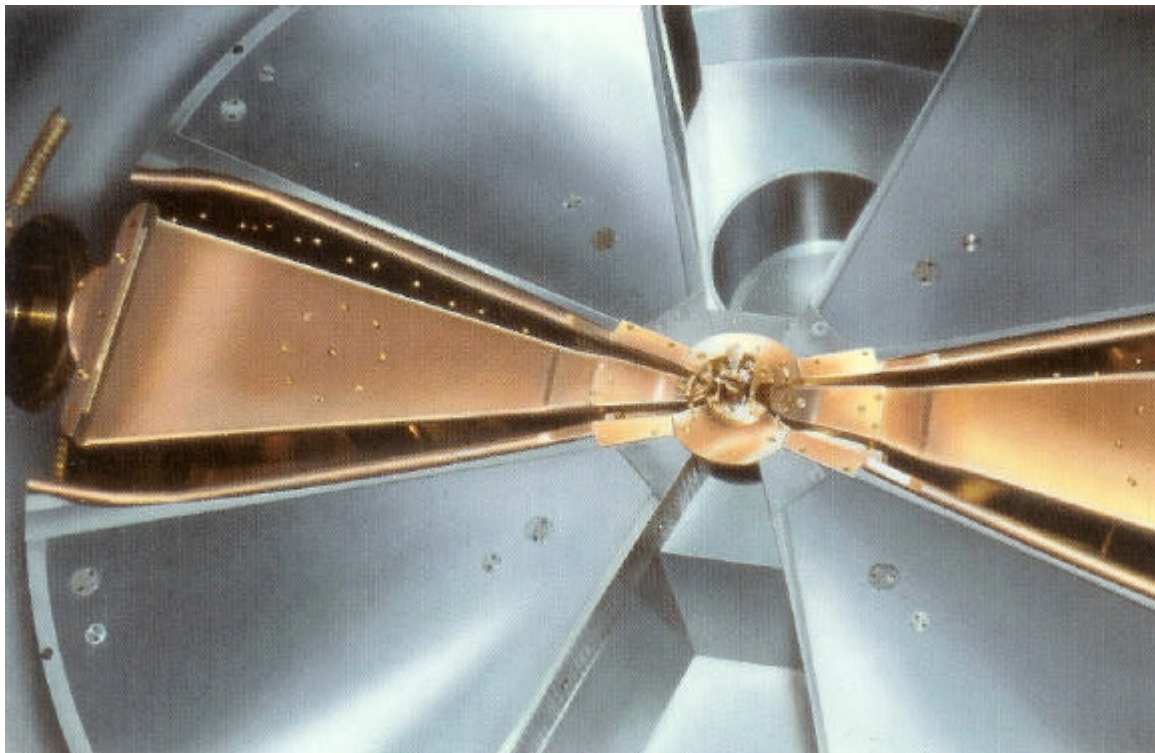
FIGURA 13 – Região central do ciclotron Cyclone 30

A aceleração em um ciclotron isócrona acontece na transição de energia, e portanto não há estabilidade de fase (Heikkinen, 1994). A maioria dos ciclotrons atuais usam diferentes modos harmônicos na frequência de aceleração dos eletrodos Dês ($\omega_{RF} = h\omega_p$), onde h é o número do modo harmônico, RF é radiofrequência e p representa a partícula, e apresentam ao menos quatro aberturas de aceleração por volta (dois Dês e dois Falsos Dês, *dummy dees*).

Segundo Heikkinen (1994), o máximo ganho de energia por volta depende do número harmônico e do ângulo do Dê, e pequenos ganhos de energia levam a um maior número de voltas e a uma pequena separação por volta, o que leva a maior dificuldade de extração.

No ciclotron Cyclone 30, os Dês estão posicionados completamente na região dos vales, mostrado na FIG. 14, e possuem ângulo efetivo de 30° , a

freqüência de operação é de 65,5 MHz, trabalhando no quarto modo harmônico em relação à freqüência de revolução da partícula, com uma voltagem de 50 kV (IBA, 1994).



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 14 – Dês e região central do cíclotron Cyclone 30
Como no cíclotron Cyclone 30 $f_{RF}=65,5$ MHz e $h=4$, então:

$$f_p = \frac{65,5}{4} = 16,375 \text{ MHz}$$

Através da Eq. 4 pode-se obter uma aproximação do campo magnético médio do cíclotron Cyclone 30:

$$B = \frac{2pMf}{q} = \frac{2p \times 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 16,375 \times 10^6 \text{ s}^{-1}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1,07 \text{ T}$$

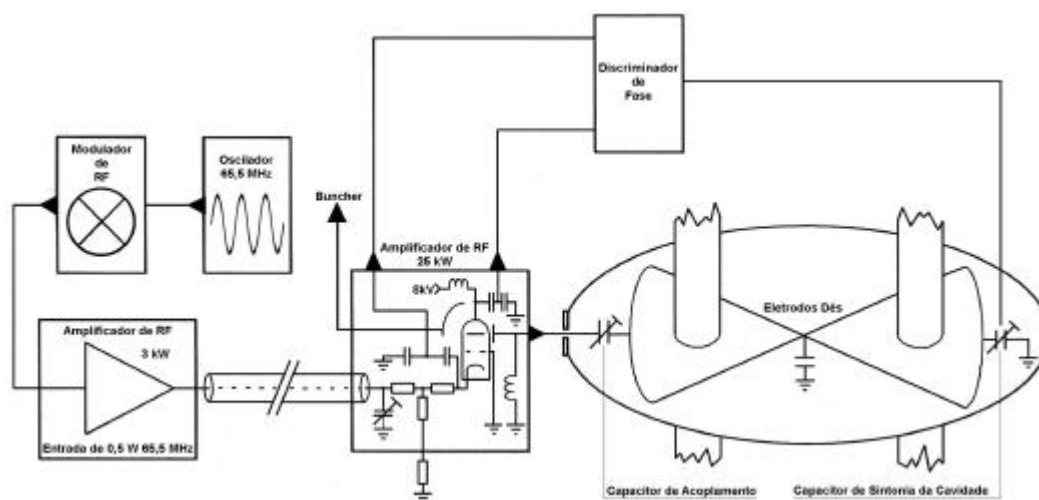
O que está de acordo com os valores apresentados pelo fabricante, constante na seção 4 desta dissertação, campo magnético para as colinas de 1,7 T e campo magnético para os vales de 0,12 T.

No cíclotron Cyclone 30 o ângulo azimutal de 30° dos Dês, em conjunto com as quatro aberturas de aceleração e a operação do sistema de RF no quarto modo harmônico da freqüência de revolução do íon garantem ao acelerador um bom ganho de energia por volta, facilitando a extração do feixe pelo Stripper. Medindo-se a distância entre as posições do Stripper para a extração de feixe na

maior e na menor energia projetada para a máquina, obtém-se que a diferença entre o raio de extração de um feixe de 30 MeV e um feixe de 15 MeV é de aproximadamente 210 mm, o que resulta em 14 mm/MeV, ou 71,43 KeV/mm.

A FIG. 15 mostra um diagrama simplificado do Sistema de RF do ciclotron Cyclone 30. A cadeia de amplificação de RF é composta por quatro elementos principais:

- 1) Low Level Radiofrequency (LLRF) - gabinete que é composto de vários módulos eletrônicos como Oscilador/Modulador de RF, Detetor/Demodulador de RF, Discriminador de Fase e Controle do Motor de Sintonia da Cavidade Ressonante. O principal objetivo deste equipamento é produzir uma voltagem de aceleração regulada e sintonizar a cavidade de RF do ciclotron, e as duas funções principais do LLRF Rack são o Controle da Potência de RF e a Sintonia da Cavidade (IBA, 2005). O Oscilador/Modulador fornece um sinal senoidal de 65,5 MHz e 0,5 W para o Amplificador de RF de 3 kW.



Fonte: IBA, 2005.

FIGURA 15 – Diagrama do Sistema de RF do ciclotron Cyclone 30

- 2) Amplificador de RF de 3 kW (3 kW RF Driver Amplifier) - é o primeiro estágio de amplificação do sinal de RF. Este equipamento utiliza uma válvula triodo em um circuito com a grade aterrada, cuja função é fornecer um sinal de RF de 3 kW que é injetado no cátodo do próximo estágio de amplificação.
- 3) Amplificador de RF de 25 kW (25 kW Amplifier) - é o último estágio de amplificação do sinal de RF. Ele também usa uma válvula triodo com a grade aterrada, o sinal transmitido pelo Amplificador de RF de 3 kW é

injetado no catodo da válvula triodo, esta válvula funciona com uma tensão de anodo de 8 kV e está conectada à Cavidade Ressonante do cíclotron através de um acoplamento capacitivo, uma parte do sinal de RF é utilizada no Buncher.

- 4) Cavidade Ressonante - este elemento do Sistema de RF pode ser visto nas FIG. 6 e 14. Para Puglisi (1994), uma cavidade ressonante ideal é um volume composto por um dielétrico perfeito limitado por paredes infinitamente condutoras. Gardini (1982) descreve uma cavidade ressonante como um espaço fechado por um condutor metálico no qual é armazenada energia eletromagnética oscilante, em que o tamanho e o formato do invólucro determinam a frequência de ressonância. O fator Q de uma cavidade ressonante é muito elevado, onde fator Q é o coeficiente de sobretensão. Em um circuito sintonizado, é a relação entre a reatância indutiva do circuito, a frequência de ressonância e a sua resistência de radiofrequência. Quando o fator Q de um circuito sintonizado é alto, as voltagens que o atravessam são altas e a seletividade é boa. No cíclotron Cyclone 30, a cavidade ressonante está totalmente localizada na região dos vales (área revestida com cobre na FIG. 14), os dois Dês são suportados na parte superior e inferior por hastes de cobre, conforme visto na FIG. 6, e como pode ser visto logo abaixo na FIG. 16, estão posicionados em vales opostos e estão conectados pelo centro. A conexão dos dois Dês é feita abaixo do plano médio do acelerador (FIG. 13 e 14), para permitir a instalação do Inflector e da região central. A Cavidade Ressonante recebe o sinal de RF do Amplificador de 25 kW através do acoplamento capacitivo, e a sintonia é obtida através do Capacitor de Sintonia da Cavidade, que é controlado pelo LLRF através do Discriminador de Fase (FIG. 15).



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 16 – Eletrodos Dês do cíclotron Cyclone 30

No cíclotron Cyclone 30 as quatro aberturas de aceleração são formadas pela área entre os Dês e os Falsos Dês de cobre, que são as partes dos pólos magnéticos cobertas com cobre (FIG. 13 e 14). Os grupos de íons conhecidos como *bunches* ao saírem do Inflector sofrem a ação do campo magnético e iniciam uma trajetória circular no plano médio do acelerador. Ao atravessar uma abertura de aceleração o *bunch* ganha energia e com isso o raio de sua órbita aumenta para conseguir uma condição mais estável. No cíclotron Cyclone 30 ocorre a formação de quatro *bunches* por revolução, como as pás de um moinho de vento: para que isto ocorra, é necessário o sincronismo das fases dos *bunches* e da frequência de RF.

Na FIG. 17 pode-se observar o desenho representando os dois Dês de 30° do cíclotron Cyclone 30, os Falsos Dês de cobre (*cooper dummy dees*) que estão aterrados, as quatro aberturas de aceleração representadas pelas letras A, B, C e D, os pólos magnéticos (colinas) na cor cinza e os vales na cor amarela. Usando um *bunch* de íons negativos como referência, verifica-se que para obter aceleração na entrada dos Dês (D e B), o potencial de RF deve ser positivo (*pull*, puxa), e para obter aceleração na saída dos Dês (A e C), o potencial de RF deve ser negativo (*push*, empurra). Por isso, o *bunch* deve passar pelo eixo de simetria dos Dês em 0° e 180° quando o potencial de RF estiver em 0 kV. Os dois Dês trabalham com a mesma Fase de RF e o *bunch* deve atingir a primeira abertura de aceleração (A) quando o potencial de RF estiver em $-43,3 \text{ kV} (V_{Dê_{max}} \times \sin 60^\circ)$. Isto acontece em 60° de Fase de RF. Para completar a revolução no cíclotron, o *bunch* deve atingir as outras aberturas de aceleração (B, C e D) nas Fases de RF especificadas na FIG. 17.

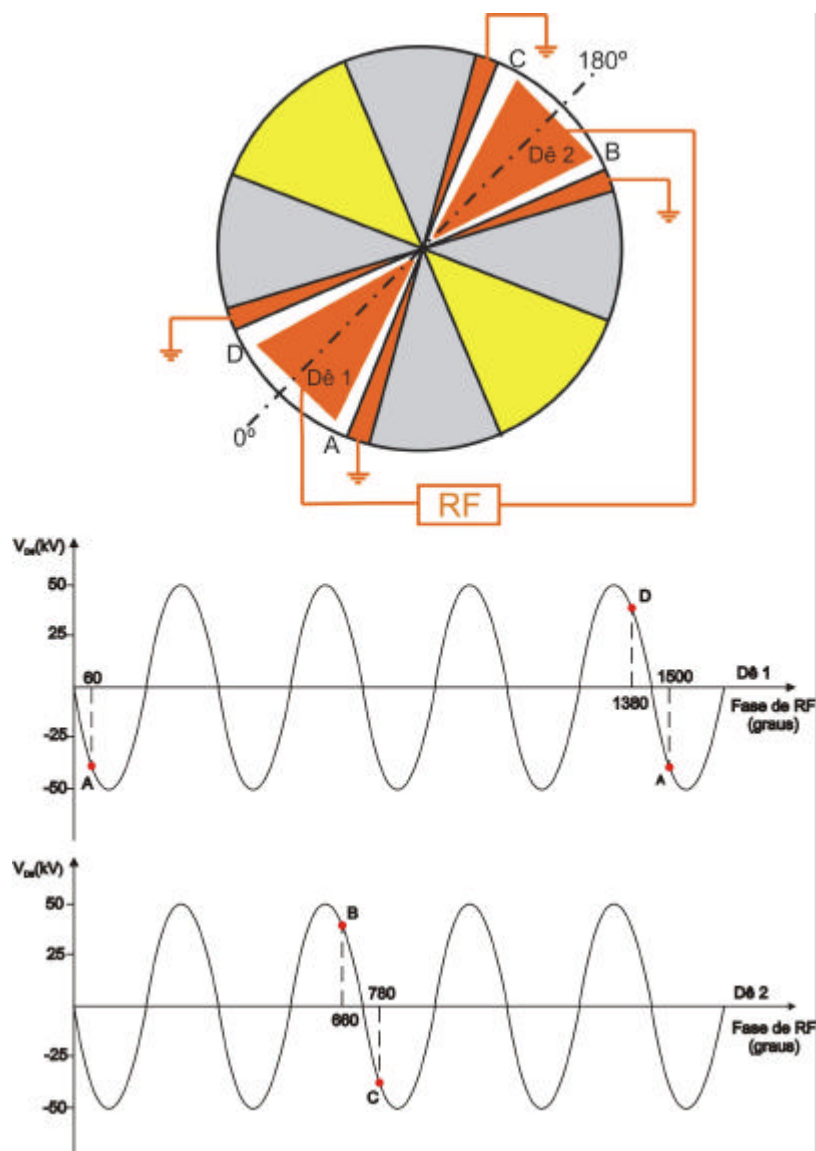


FIGURA 17 – Dês de 30° e Fase de RF para aceleração em 4ª harmônica

Os *bunches* acelerados no cíclotron Cyclone 30 estão defasados em 360° de Fase de RF, ou 90° de fase da revolução do *bunch*. Deste modo, o feixe extraído do cíclotron terá pulsos de *bunches* em um período de:

$$P_{Bunches} = \frac{1}{4 \times f_p} = \frac{1}{4 \times 16,375 \times 10^6} \cong 15ns$$

O ganho de energia cinética dos íons por volta pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$\Delta E_c = N \times q \times V_{Dê} \times \text{sen}\left(\frac{hq}{2}\right).$$

Onde N é o número de aberturas de aceleração, q é o estado da carga em unidades de elétrons, $V_{Dê}$ é a voltagem máxima nos Dês, h é o modo

harmônico e ? o ângulo azimutal do Dê, assim para o cíclotron Cyclone 30 tem-se:

$$\Delta E_c = 4 \times 1 \times 50000 \times \text{sen}\left(\frac{4 \times 30}{2}\right) \cong 173 \text{keV/volta}.$$

Através deste valor pode-se calcular o número de voltas que um íon leva para atingir 30 MeV:

$$N_{\text{voltas}}(30 \text{MeV}) = \frac{30000}{173} \cong 173 \text{voltas}.$$

Pelo cálculo o íon executa pelo menos 173 voltas, pois na extração, a energia é sempre um pouco acima de 30 MeV. Com o número de voltas e a freqüência de revolução do íon pode-se calcular o tempo total de aceleração da partícula para uma energia de 30 MeV:

$$t(30 \text{MeV}) = N_{\text{voltas}} \times \frac{1}{f_p} = 173 \times \frac{1}{16,375 \times 10^6} \cong 10,5 \text{ms}.$$

Para o calculo da separação entre as voltas próximas a região de extração (sem levar em conta os fatores relativísticos), algumas considerações podem ser feitas: a energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade, a velocidade angular do íon é constante porque o cíclotron é isócrono e a velocidade linear é proporcional ao raio da órbita. Então:

$$E_c \approx r^2.$$

Derivando esta expressão,

$$dE_c \approx 2r dr.$$

Dividindo a segunda expressão pela primeira obtém-se:

$$\frac{dE_c}{E_c} \approx \frac{2dr}{r}.$$

Conhecendo o valor aproximado do raio de extração para uma energia de 30 MeV como sendo igual a 730 mm , e a variação de energia por volta calculada anteriormente como 173 keV/volta, pode-se obter o valor aproximado de dr como sendo:

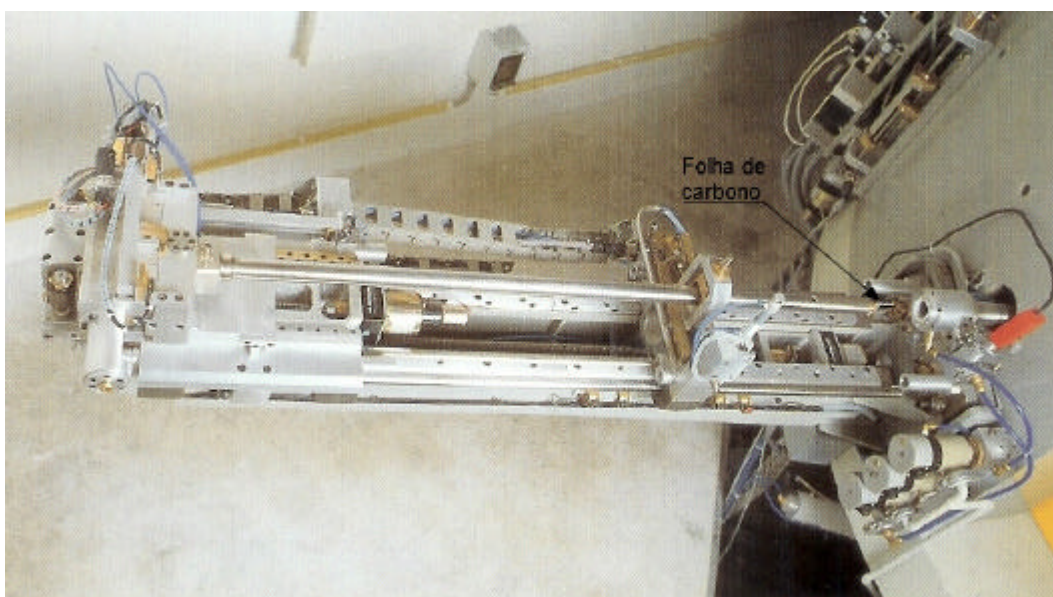
$$dr \approx \frac{dE_c r}{2E_c} \approx \frac{173 \times 730}{2 \times 30000} \approx 2 \text{mm}.$$

Observações experimentais feitas por Zarembo da IBA sobre o feixe acelerado do cíclotron Cyclone 30 têm mostrado que o perfil do feixe pode ser

considerado aproximadamente como uma seção circular de 2 mm de raio (comunicação pessoal). Conseqüentemente, algumas voltas do feixe ficam sobrepostas, e quando o feixe chega na folha do Stripper, parte dele atravessará o Stripper enquanto a outra parte dará a volta seguinte, distanciando-se mais do centro até alcançar novamente a folha do Stripper. Portanto, pelo menos duas voltas consecutivas serão extraídas ao mesmo tempo do cíclotron. O cenário descrito anteriormente é ideal, pois devido a oscilações radiais intrínsecas da aceleração de partículas em aceleradores circulares (Livingood, 1961), pode ocorrer a chegada ao mesmo tempo de mais voltas na folha do Stripper, além das duas descritas anteriormente. Porém, a separação por volta de 2 mm calculada anteriormente pode ser considerada como grande e o número máximo de voltas que passa pelo Stripper é 3, o que dá uma variação na energia da partícula extraída da ordem de 346 keV (30 MeV mais ou menos uma volta), ou seja, aproximadamente 1% ($346/30000$) da energia desejada.

3.2.8 A extração dos íons H^-

Como mencionado na seção anterior, um bom ganho de energia por volta facilita a extração dos íons H. O mecanismo utilizado para a extração do feixe de íons é o Stripper (FIG. 18).

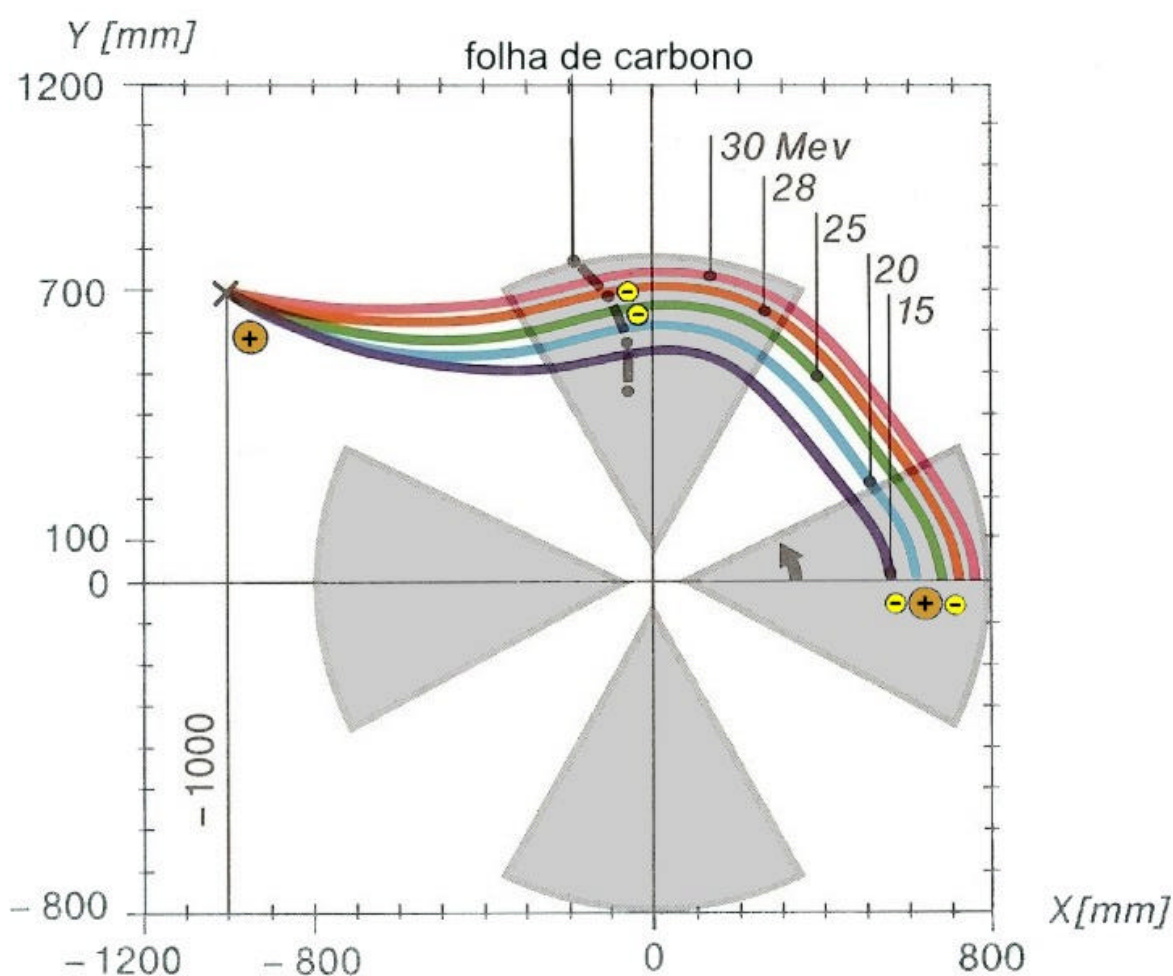


Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 18 – Mecanismo do Stripper do cíclotron Cyclone 30

O Stripper é composto de uma folha de carbono com densidade de 40 mg/cm^2 (Bol et al., 1991), montada na ponta de uma haste cilíndrica que é

inserida radialmente na região de um dos pólos magnéticos do cíclotron. A folha de carbono é posicionada dentro do acelerador de acordo com a energia da partícula desejada (FIG. 19). Quando os íons H atravessam a folha de carbono perdem os dois elétrons, transformando-se em íons H^+ (prótons). Com a mudança de polaridade da carga dos íons sua trajetória é alterada devido a interação com o campo magnético e os prótons são direcionados para uma das portas de saída do cíclotron. Gulley et al. (1996) estudaram o rendimento de *stripping* de folhas de carbono para íons H de 800 MeV. As interações que ocorrem quando um íon H relativístico atravessa a matéria estão mostradas na FIG. 20.

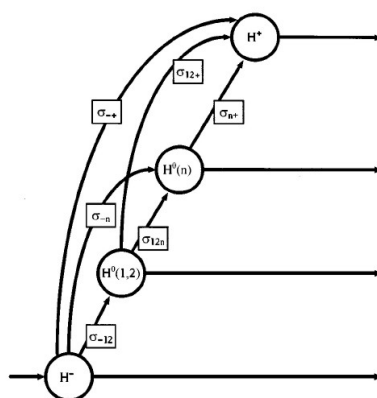


Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 19 – Trajetórias de extração do cíclotron Cyclone 30

Segundo Gulley et al. (1996), o volume do elétron externo de um íon H é da ordem de quatro vezes do volume de um átomo de carbono. Quando um feixe de íons H atravessa uma folha de carbono, alguns íons têm ambos os elétrons removidos, resultando em prótons (H^+) com seção de choque de *stripping* igual a s_{+} , outros perdem apenas um elétron tornando-se átomos de hidrogênio

$[H^0(n)]$ com seção de choque de *stripping* de s_{-n} , enquanto alguns atravessam a folha sem nada sofrer. Outras interações são possíveis como H^0 com $n=1$ ou 2 , onde n é o número quântico principal do estado esférico, e também pode ser excitado a um estado de maior energia com uma seção de choque de *stripping* de s_{12n} . A probabilidade de retirada dos elétrons do íon H^- que atravessa uma folha de carbono com uma determinada densidade de área é proporcional a seção de choque das interações e ao número de átomos por micrograma do material da folha.



Fonte: Gulley et al., 1996.

FIGURA 20 – Mapa das interações do íon H^- atravessando a matéria

Existem dois mecanismos de Stripper montados diametralmente opostos no ciclotron Cyclone 30 que extraem os íons do acelerador para direcioná-los às linhas de feixe. Segundo IBA (1994), este método de extração garante aproximadamente 100% de eficiência. O sistema de extração também permite a extração de dois feixes simultaneamente, ajustando a posição das folhas de carbono. O formato do pólo magnético favorece a extração do feixe, pois permite que ele passe pela extremidade do pólo magnético em um ângulo próximo de 90° (FIG. 19), minimizando efeitos de desfocalização e contribuições de sextupolos devido a pequenos ângulos de cruzamento (IBA, 1994).

3.2.9 O transporte dos íons H^+

Ao ser extraído do acelerador, o feixe de íons H^+ passa por vários dispositivos, cuja principal função é transportar o feixe até o alvo. Estes dispositivos ajustam a direção ou a focalização do feixe. São eles:

- Magneto comutador (Switching Magnet). Localizado nas duas portas de saída do ciclotron (FIG. 21) Este dipolo magnético tem como função

direcionar o feixe para o centro da linha de feixe desejada, suas bobinas são alimentadas por uma fonte de potência de até 200 A e 40 VCC, com inversão de polaridade da corrente elétrica;

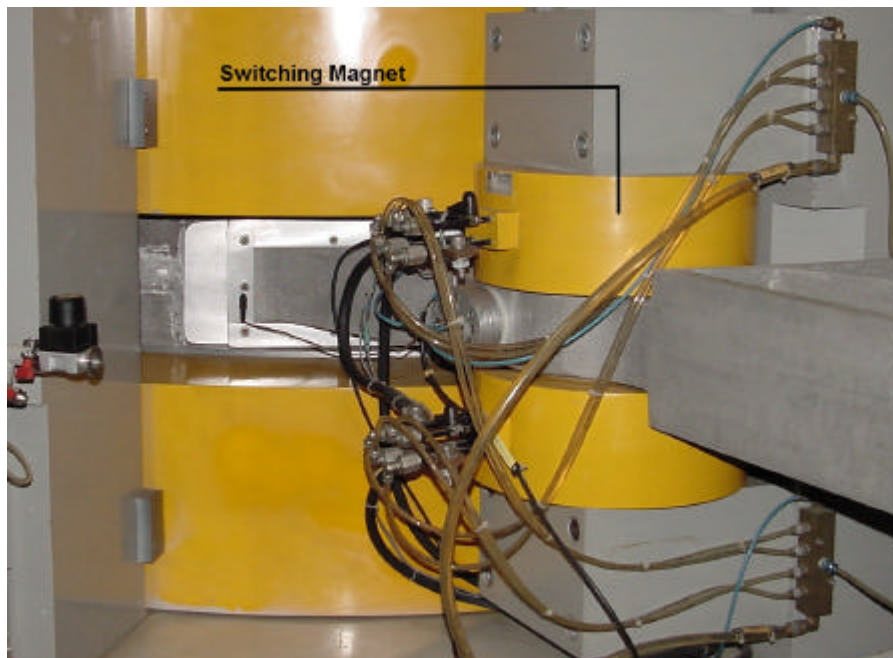


FIGURA 21 – Magneto Comutador do cíclotron Cyclone 30

- Magnetos de Desvio XY (XY Steering Magnets). Este é o primeiro dispositivo que o feixe de íons H^+ atravessa na linha de feixe (FIG. 22), é composto de dois dipolos magnéticos que desviam horizontalmente e verticalmente o feixe. As bobinas são alimentadas por uma fonte de potência de 3 A e 26 VCC, com inversão de polaridade de corrente elétrica;

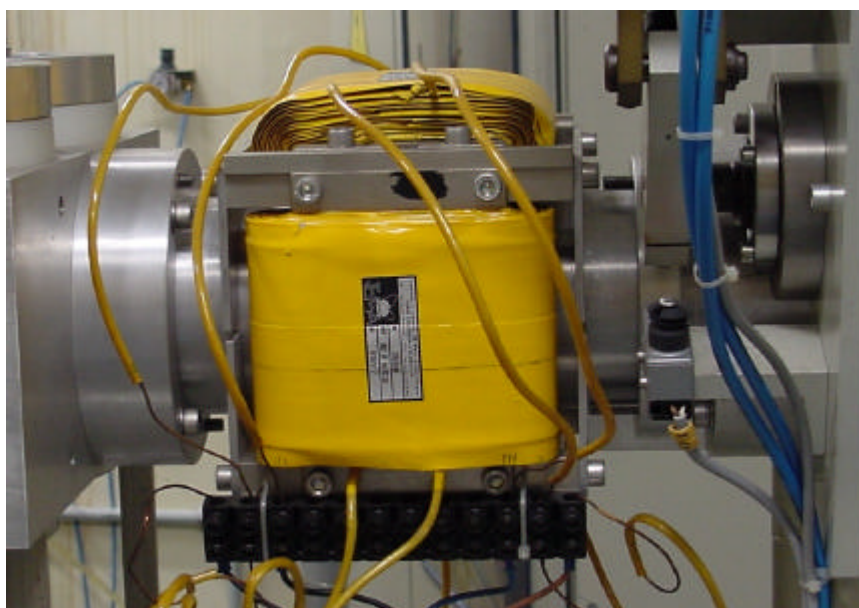


FIGURA 22 – Magnetos de Desvio XY do cíclotron Cyclone 30

- Quadrupolo. É um tripleto de bobinas quadrupolares (FIG. 23). Os singletos externos focalizam o feixe horizontalmente, enquanto o singletto interno focaliza o feixe verticalmente, cada singletto é alimentado por uma fonte de potência de até 90 A e 26 VCC;

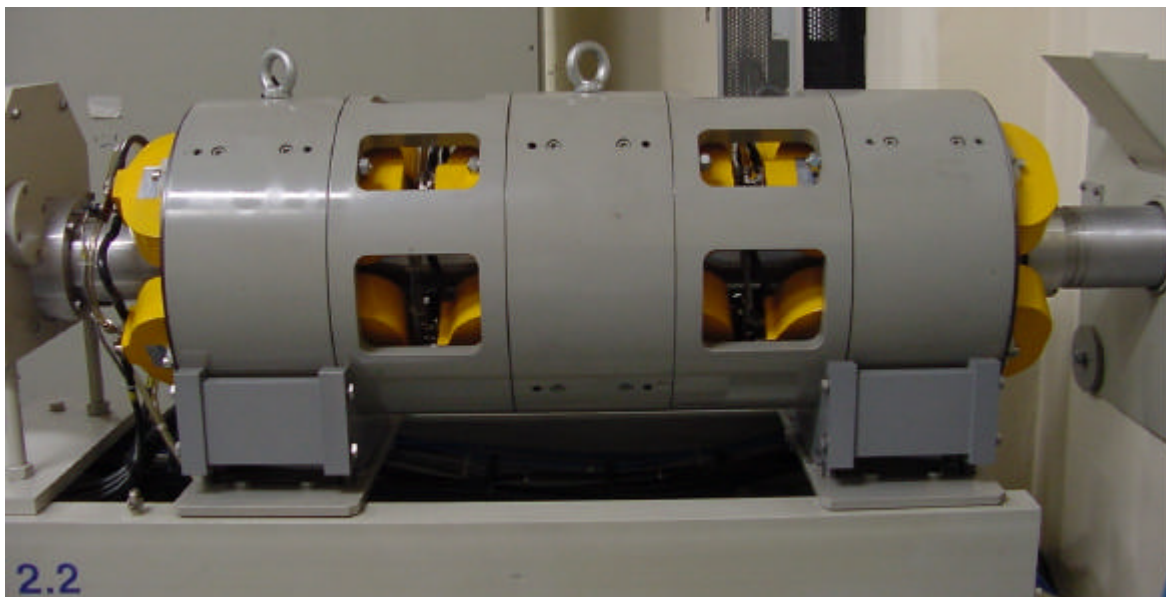


FIGURA 23 – Quadrupolo do cíclotron Cyclone 30

- Magneto Comutador Externo (External Switching Magnet). É um dipolo magnético similar ao Magneto Comutador da porta de saída do cíclotron (FIG. 24), cuja função é direcionar o feixe para uma das cinco direções possíveis de montagem dos alvos, e é alimentado por uma fonte de potência de 160 A e 45 VCC.



FIGURA 24 – Magneto Comutador Externo

3.2.10 O diagnóstico do feixe de íons

Ao longo do caminho dos íons no ciclotron Cyclone 30 existem vários dispositivos de diagnóstico do feixe. Estes dispositivos têm como função fornecer informação ao operador sobre a intensidade de corrente do feixe de íons (Copo de Faraday - Faraday Cup, Popup e Visor de Faraday - Faraday Viewer), ou sobre o perfil do feixe (colimadores, Visor de Faraday e colimadores de 4 setores). O Copo de Faraday está localizado na linha de injeção do ciclotron Cyclone 30, antes do Buncher. O Popup está localizado dentro do acelerador logo após as primeiras voltas da região central. O Visor de Faraday está localizado na linha de feixe antes do Comutador Magnético Externo, além disso, há colimadores na saída dos Comutadores Magnéticos, no início das linhas de feixe, na entrada do Comutador Magnético Externo e antes de cada porta-alvo, os colimadores de 4 setores estão localizados antes dos porta-alvos. A intensidade de corrente do feixe que colide com o alvo também é medida através de um microamperímetro e é feita a integração da corrente de feixe que incide no alvo para a determinação da carga acumulada.

3.2.11 A colisão do feixe de íons H^+ com o material alvo

Os porta-alvos são construídos para acondicionar o material alvo em seu interior, e possibilitar a transferência de calor entre o feixe de prótons e o material alvo (FIG. 25). No porta-alvo utilizado na produção de $^{18}F^-$ no CAC, a água enriquecida em ^{18}O é acondicionada na cavidade central do porta-alvo (FIG. 26), sendo refrigerada através de um circuito de água deionizada.

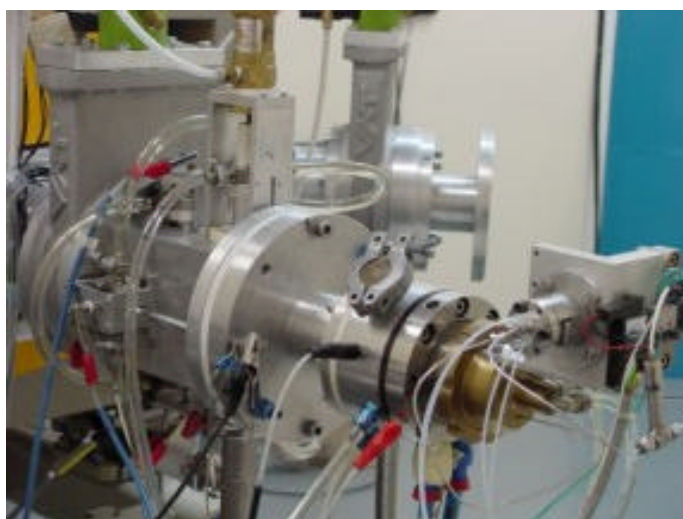


FIGURA 25 – Porta-alvo de produção de $^{18}F^-$ do CAC

Quando o feixe de íons H^+ atinge o material alvo ocorre a reação nuclear desejada: no caso estudado, o material alvo é a água enriquecida com oxigênio-18 (geralmente acima de 95% de enriquecimento). Esse nível de enriquecimento garante um maior rendimento na produção de $^{18}F^-$ através da reação nuclear $^{18}O(p,n)^{18}F$.

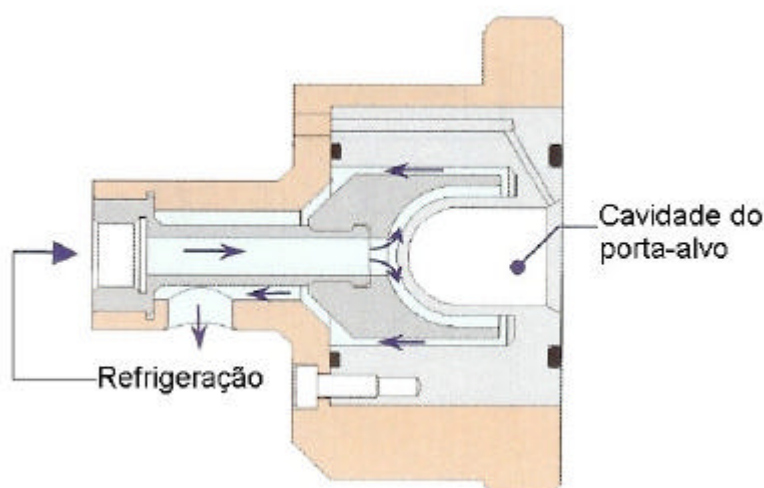


FIGURA 26 – Vista interna do porta-alvo de $^{18}F^-$

Para que a reação nuclear desejada ocorra, é necessário que o feixe de íons H^+ tenha o seu caminho através do material alvo, com energia num intervalo que abranja os maiores valores de seção de choque da reação.

As FIG. 27 e 28 mostram a função de excitação da reação nuclear $^{18}O(p,n)^{18}F$ do trabalho de Hess et al. (2001), e a comparação com os dados obtidos em outros trabalhos anteriores sobre o mesmo tema.

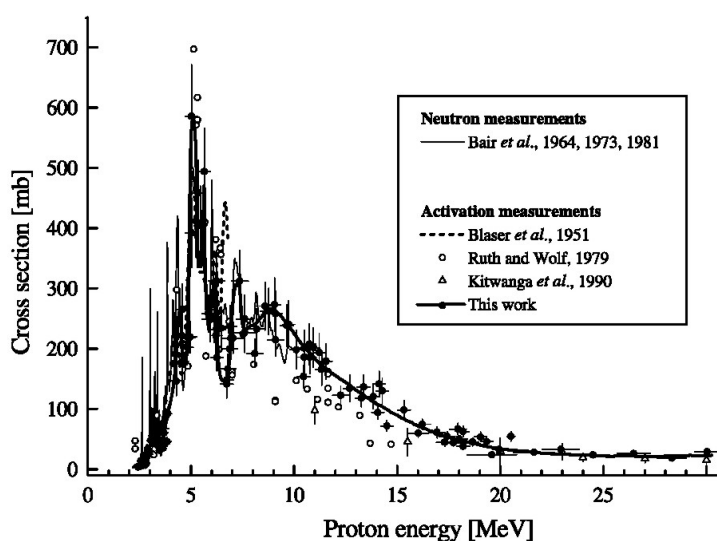


FIGURA 27 – Função de excitação até 30 MeV da reação $^{18}O(p,n)^{18}F$

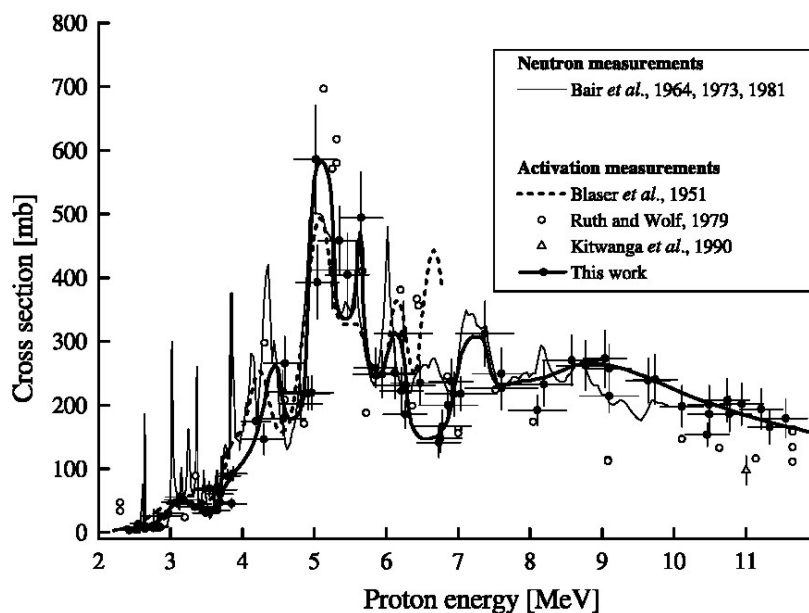


FIGURA 28 – Função de excitação até 12 MeV da reação $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$

Durante a irradiação do alvo, a sala onde ele está instalado sofre a ação de radiação gama e nêutrons, que são responsáveis pela ativação dos materiais ao redor do alvo, e também pelos danos de radiação nos materiais, implicando, algumas vezes, em perda de suas funções. Algumas perdas de funções já foram verificadas em componentes com maior sensibilidade às radiações ocasionadas pela irradiação dos alvos, tais como, membranas poliméricas utilizadas em sensores de pressão, eletrônica embutida com larga escala de integração e materiais plásticos utilizados em rolamentos.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 A evolução dos cíclotrons

Desde os primeiros experimentos com irradiação, através do uso de partículas elementares, no início do século XX até hoje, os equipamentos utilizados para este tipo de experimento vêm se modificando conforme aumenta o conhecimento sobre as diversas áreas da ciência. No caso específico dos aceleradores tipo cíclotron, a idéia original de acelerar um íon em trajetórias circulares continua a mesma, apenas se aprimorou a técnica de aceleração com a evolução dos fundamentos teóricos e a melhoria dos componentes empregados nos diversos projetos que se seguiram desde a idéia original, como pode ser notado na FIG. 29.



Fonte: Livingood, 1961.

FIGURA 29 – Câmara de vácuo do cíclotron de 4 polegadas de Livingston (1931, a esquerda) e cíclotron CV 28 do IPEN (1998, a direita)

O cíclotron Cyclone 30 também passou por várias mudanças desde o seu projeto original, conforme descrito por Bol et al. (1991). Com o desenvolvimento da máquina, maiores intensidades de corrente de feixe foram conseguidas através de melhorias na fonte de íons, no sistema de vácuo e no

sistema de radiofrequência. Outros modelos de cíclotrons foram projetados buscando alcançar maiores energias como 70 MeV e 230 MeV (Beeckman et al., 1991), este último especificamente para terapia com prótons. Zaremba et al. (1990) e Conard et al. (1990) descrevem os vários projetos de cíclotrons da IBA e suas principais características e aperfeiçoamentos. Kleeven et al. (2003) apresentam o projeto de um cíclotron da IBA com auto-extração do feixe: o feixe é extraído através de mudanças no campo magnético na região de extração, não é utilizado defletor ou *stripper*.

4.2 A evolução do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$

4.2.1 O porta-alvo de cobre com folha de Havar frontal

Os sistemas de irradiação para a produção de $^{18}\text{F}^-$ também evoluíram muito ao longo destas últimas décadas. Kilbourn et al. (1984) descrevem a utilização de um alvo de pequeno volume (3 mL), utilizado para a produção rotineira de $^{18}\text{F}^-$, através da reação nuclear $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$. A cavidade do alvo foi feita em um cilindro de cobre de 4,8 cm de diâmetro por 2,6 cm de espessura, esta cavidade media 25 mm de diâmetro por 8 mm de profundidade e foi recoberta com níquel. Na frente da cavidade era colocado uma folha de Havar (liga metálica composta por Co 42%, Cr 19,5%, Fe 19,3%, Ni 12,5%, W 2,6%, Mo 2,2%, Mn 1,7% e C 0,2%) de 0,5 mm de espessura e a parte traseira do alvo era refrigerado à água a 10°C ou água com etilenoglicol a 0°C. O alvo era preenchido com água enriquecida em ^{18}O entre 95 e 98% e irradiado com prótons com energia de 15 MeV. O alvo trabalhava com o sistema fechado, em que a pressão interna da cavidade era monitorada pelo operador, ou com o sistema aberto, quando uma das saídas do alvo era conectado a um tubo coletor através de um tubo de polietileno de 1 mm de diâmetro interno. A corrente de feixe utilizada variava entre 15 e 20 μA e o tempo de irradiação era de até 70 minutos. Uma irradiação típica com o sistema aberto produzia mais de 1 Ci de $^{18}\text{F}^-$ em 2 mL de água.

4.2.2 Os porta-alvos de aço inox e titânio com folhas de Havar e Titânio

Em outro trabalho Kilbourn et al. (1985) expõem a segunda geração de alvos para produção de $^{18}\text{F}^-$. O alvo anteriormente descrito apresentava ao longo do tempo o aumento da concentração de íons metálicos, principalmente cobre e

níquel na água irradiada, produzindo efeitos deletérios na síntese do [^{18}F]FDG. No segundo alvo projetado, a cavidade era formada por um furo no centro de um disco de aço inox ou titânio, sendo fechada na frente e atrás por folhas de Havar ou titânio, sendo a folha da parte traseira refrigerada à água. O volume das cavidades variavam de 1,2 a 2,8 mL. O alvo funcionava no sistema aberto, descrito anteriormente, e era submetido a irradiações diárias com intensidade de corrente de feixe entre 15 e 20 μA e tempo de irradiação médio de 45 minutos, com produção média de $^{18}\text{F}^-$ de 400 mCi. A contaminação da água irradiada por íons metálicos diminuiu, porém surgiram contaminações com íons de ferro, cromo e cobalto, provenientes da folha de Havar. A utilização de folha de titânio diminuiu em mais de dez vezes a concentração destes íons na água irradiada.

4.2.3 O porta-alvo de prata com janelas de prata ou titânio

Berridge e Kjellström (1999) apresentam vários projetos de alvo para produção de $^{18}\text{F}^-$ que utilizam cavidades feitas em discos de prata, com janelas de prata ou titânio na parte da frente e de trás do alvo. A janela traseira era resfriada à água e a janela dianteira era refrigerada com hélio juntamente com uma janela de Havar que fazia o isolamento da linha de feixe com o alvo. Os alvos eram carregados com volumes que variavam entre 0,65 e 1,2 mL de água enriquecida em ^{18}O . Os alvos projetados apresentavam diferenças na câmara de irradiação, que buscavam obter o máximo do perfil do feixe, e deixar um certo volume de gás acima da água. Os alvos foram irradiados com correntes de feixe entre 10 e 20 μA , com prótons de 17 MeV, num intervalo entre 5 e 120 minutos em um ciclotron MC17 da Scanditronix, obtendo de 100 a 1300 mCi (3,7 a 48 GBq) de $^{18}\text{F}^-$ por irradiação, com intervalos de manutenção entre 5 e 40 produções rotineiras.

4.2.4 Os porta-alvos de titânio e nióbio

Alvos de [^{18}O] água de titânio e nióbio de alto rendimento e baixa pressão para produção de $^{18}\text{F}^-$ em ciclotrons MC-17 da Scanditronix são apresentados por Berridge et al. (2002). Estes alvos foram projetados buscando aumentar a capacidade produtiva de $^{18}\text{F}^-$ e aumentar os intervalos de manutenção, pois os alvos de prata requeriam limpeza da cavidade em poucas semanas de uso. Os materiais escolhidos, titânio e nióbio, são menos reativos a ácidos do que a prata, a maior dureza e inércia química destes materiais também

favorecem o aumento dos intervalos de manutenção. A cavidade de titânio ou nióbio era refrigerada na parte traseira por água, e na parte dianteira duas janelas eram refrigeradas com hélio. Várias dimensões de cavidades foram testadas e no final optou-se por uma câmara de 31 mm de altura por 32 mm de largura e 6 mm de profundidade. Para irradiações de 30 μA em 75 minutos estes alvos produziam 78 GBq (2,1 Ci) e conseguiram intervalos de manutenção que variavam de 6 meses a um ano.

4.2.5 O porta-alvo de tântalo de 1 kW com janela de Havar

Alvord et al. (2005) projetaram, testaram e implementaram em larga escala um alvo de íon fluoreto compacto de 1 kW. O material utilizado na cavidade do alvo foi tântalo, com uma janela de Havar na frente, apoiada por uma grade em forma de favo de mel, refrigerada à água, com 91% de transparência. Este alvo foi testado com prótons de 11 MeV num ciclotron RDS Eclipse da CTI (Computer Technology and Imaging). As irradiações foram feitas com corrente de 60 μA por 120 minutos, e com correntes de 80 a 100 μA por 120 minutos com um ou dois alvos simultaneamente. O sistema foi capaz de produzir 10 Ci ($3,7 \times 10^{11}$ Bq) de $^{18}\text{F}^-$ em duas horas de irradiação utilizando dois alvos simultaneamente. Também foi comparado o rendimento dos alvos de tântalo com os de prata, os alvos de tântalo apresentaram maior número de produções com rendimentos acima de 90 mCi/ μA do que os de prata, 79,9% contra 69,3% respectivamente.

4.2.6 O comportamento da água na cavidade durante a irradiação

Em um estudo de 2005, Hur et al. (2005) verificam o comportamento da temperatura, pressão, fase de gás e deformação da janela de um alvo de água irradiado com prótons, sendo o interior da cavidade filmado para verificar as flutuações das bolhas. Sem irradiação, ocorre a formação de uma bolha de ar na parte superior da cavidade e durante a irradiação ocorre o espalhamento de pequenas bolhas no interior da cavidade causando aumento da pressão interna conforme se aumenta a corrente de feixe. Com o aumento da fase gasosa da cavidade há um aumento da deformação da folha da janela da frente do alvo, e conseqüentemente uma diminuição da área de irradiação na água.

4.2.7 Previsão da produção de [¹⁸F]FDG através da monitoração de nêutrons

Liu et al. (2006) monitoraram a produção de nêutrons durante a irradiação de H₂¹⁸O, proveniente da reação nuclear ¹⁸O(p,n)¹⁸F, nas produções rotineiras de [¹⁸F]FDG para estabelecer uma previsão de produção, e que também ajudou a identificar problemas ocorridos durante a irradiação, como um vazamento de água da cavidade.

4.2.8 Radionuclídeos contaminantes da água irradiada

A investigação de radionuclídeos contaminantes da água irradiada para produção de ¹⁸F⁻ foi objeto de estudo de Ito et al. (2006), utilizando um ciclotron CYPRIS MINI Trace da GE e irradiando um porta-alvo feito de prata com janela de Havar, com prótons de 9,6 MeV e corrente de 25 μA por 60 minutos. Foram encontrados dez diferentes tipos de radionuclídeos: ⁵²Mn, ⁵⁵Fe, ⁵⁵Co, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁹Ni, ⁹⁵Tc e ¹⁰⁹Cd. Nenhum dos radionuclídeos encontrados na água irradiada foi detectado no [¹⁸F]FDG purificado.

Marengo et al. (2008) também avaliaram impurezas radionuclídicas nas produções rotineiras de [¹⁸F]FDG, usando um ciclotron PETrace da GE, prótons com energia de 16,5 MeV e porta-alvo de prata com janela de Havar. As produções eram feitas com correntes variando entre 35 e 38 μA, com duração entre 60 e 70 minutos resultando numa integração média de 42,0 μAh e uma atividade média de ¹⁸F⁻ de cerca de 84 GBq (2300 mCi). O estudo detectou os seguintes radionuclídeos em diferentes fases do processo de produção: ¹⁰⁵Ag, ^{106m}Ag, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁵Co, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁶⁰Co, ⁵¹Cr, ⁵²Mn, ⁵⁴Mn, ⁵⁶Mn, ⁵⁷Ni, ¹⁸¹Re, ^{182m}Re, ¹⁸³Re, ¹⁸⁴Re, ¹⁸⁶Re, ⁹⁵Tc, ^{95m}Tc, ⁹⁶Tc, ⁹⁸Tc, ^{99m}Tc e ⁴⁸V. Na solução final de [¹⁸F]FDG, o ¹⁸F foi o único radionuclídeo detectado.

4.2.9 O porta-alvo com cavidade e janela de nióbio

Nye et al. (2006) projetaram e testaram um porta-alvo com cavidade de nióbio e janela de nióbio de 25,4 μm apoiada por uma grade de alumínio no formato de favo de mel. Apesar da melhora no rendimento da síntese de [¹⁸F]FDG, a janela de nióbio não resistiu à correntes maiores do que 30 μA e pressões maiores do que 27 bar, sendo substituída por uma janela de Havar.

4.2.10 Passivação da folha de Havar com nióbio

Johnson et al. (2007) estudaram o ganho percentual de corrente de feixe extraída num ciclotron TR30 da ACSI (Advanced Cyclotron Systems Inc.), através da variação da posição do Buncher e da Einzel Lens. Neste trabalho, também está descrito a passivação da folha de Havar da entrada da cavidade de $H_2^{18}O$ com nióbio através da técnica de *sputtering*. Esta passivação conseguiu diminuir a quantidade de íons metálicos contaminantes da água como cobalto, níquel e magnésio, e apenas quantidades menores de molibdênio foram encontradas na água do alvo, melhorando deste modo a qualidade da água com $^{18}F^-$ que vai para o módulo de síntese.

Em um estudo recente, Wilson et al. (2008) utilizaram um ciclotron TR19/9 da ACSI, prótons com energia de 17,5 MeV, corrente de feixe média de 65 μA , com irradiações de até duas horas, em um alvo com câmara de nióbio, folhas de Havar, e folhas de Havar revestido com nióbio. Eles concluíram que: a utilização de folhas de Havar revestido com nióbio diminui em mais de dez vezes a quantidade de impurezas radionuclídicas de longa vida como o ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{55-58}Co$ e ^{57}Ni , comparado com as amostras irradiadas com folhas de Havar. Porém, houve um ligeiro aumento do radionuclídeo ^{93m}Mo e os intervalos de desmontagem do alvo para manutenção também aumentaram.

Avila-Rodriguez et al. (2008) fizeram um estudo quantitativo e comparativo de impurezas químicas e radionuclídicas em amostras de água irradiada num alvo de nióbio com folha de Havar e folha de Havar revestida com nióbio. As irradiações foram feitas em um ciclotron TR19/9 da ACSI, com prótons de 17,5 MeV e correntes de feixe entre 35 e 100 μA e períodos de 1 a 2,5 horas, utilizando dois alvos com cavidade de 2,7 e 4,0 mL. O estudo apresentou vantagens significativas no uso de folhas de Havar revestidas de nióbio em comparação com folhas de Havar. Ocorreu diminuição de até dez vezes de radionuclídeos como $^{55-58}Co$, ^{57}Ni , ^{51}Cr , ^{52}Mn , $^{95-96}Tc$ e ^{181}Re , e o único radionuclídeo que apresentou um pequeno aumento foi o ^{93m}Mo . As impurezas químicas não apresentaram diferenças significativas entre as duas comparações.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados para elaboração deste trabalho foram:

- a) Acelerador de partículas do tipo cíclotron fabricado pela Ion Beam Applications modelo Cyclone 30;
- b) Porta-alvo utilizado para a produção de $^{18}\text{F}^-$ fabricado pela Ion Beam Applications com *insert* de nióbio de 5 mL e 2,4 mL;
- c) Porta-alvo utilizado para a produção de ^{123}I fabricado pelo IPEN;
- d) Sensor de proximidade indutivo marca Sense modelo PS2-8GM45-E;
- e) Chave magnética (*reedswitch*) marca Reed Switch Development Corp. modelo 2230-1051-100;
- f) Chave fim de curso subminiatura (*microswitch*) marca Camden tipo V4 modelo CSM3510A;
- g) Fonte de tensão de corrente contínua marca Hewlett Packard modelo E3612A;
- h) Multímetro marca Fluke modelo 87 III;
- i) Contador Geiger-Muller marca Eberline modelo RM25, com ponta de prova marca Eberline modelo HP360;

5.1.1 Características do acelerador cíclotron Cyclone 30

O acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN (FIG. 30) possui as seguintes características de acordo com a Ion Beam Applications (1994):

5.1.1.1 Características de feixe

Tipo de íons	acelerado	H^-
	extraído	H^+
Energia (ajustável)	máxima	30 MeV
	Mínima	15 MeV
Intensidade de corrente	garantida	350 μA

Esperada	500 μ A
Número de portas de saída projetada	até 10
Número de linhas de feixe instaladas	2
Número de feixes extraídos simultaneamente	2
Emitância normalizada dos feixes extraídos	
horizontal	=10 p.mm.mrad
vertical	=5 p.mm.mrad

5.1.1.2 Consumo de potência

Com baixa potência de feixe	= 60 kW
Com alta potência de feixe	= 90 kW

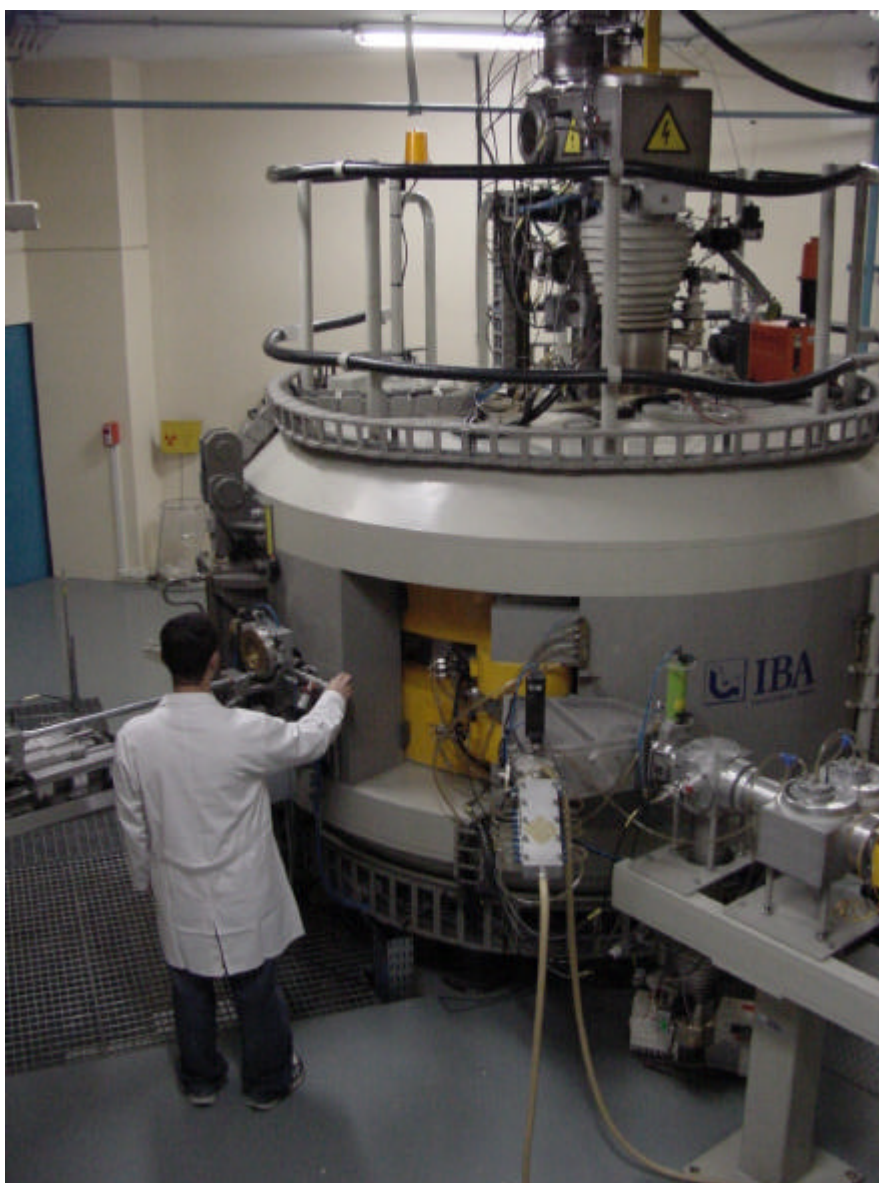
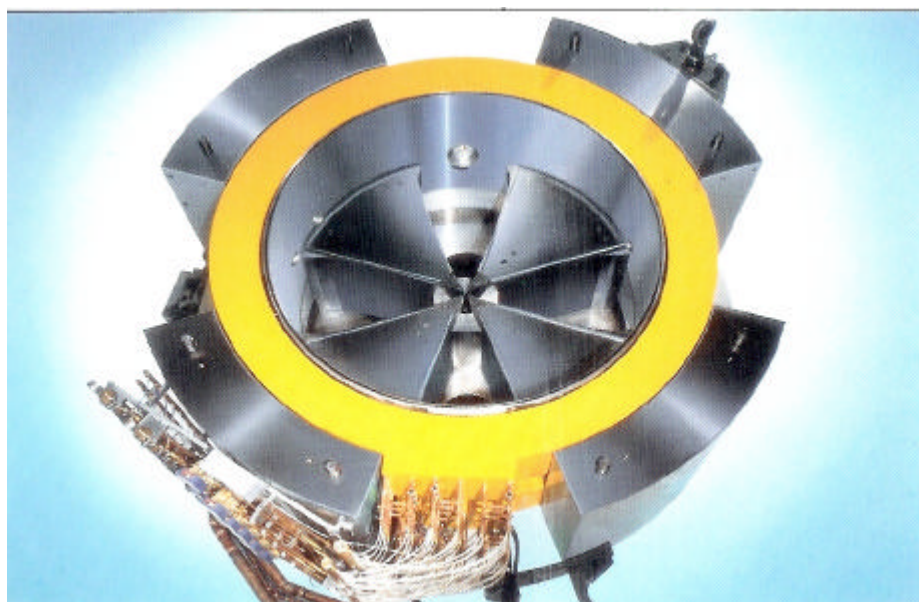


FIGURA 30 – Acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN

5.1.1.3 Estrutura Magnética

Número de setores (FIG. 31)		4
Ângulo do setor (variação radial)	máximo	58 graus
	mínimo	54 graus
Campo da colina		1,7 Tesla
Campo do vale		0,12 Tesla
Potência nas bobinas		7,2 kW
Peso do ferro		45 tons
Peso do cobre		4 tons



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 31 – Estrutura magnética do cíclotron Cyclone 30

5.1.1.4 Sistema de Controle

Software

software “In Touch”, sistema de controle por comando gráfico através de mouse, capacidade de transferência de dados, limites ajustáveis para os parâmetros do cíclotron; software de PLC Step 5 da Siemens (FIG. 32);

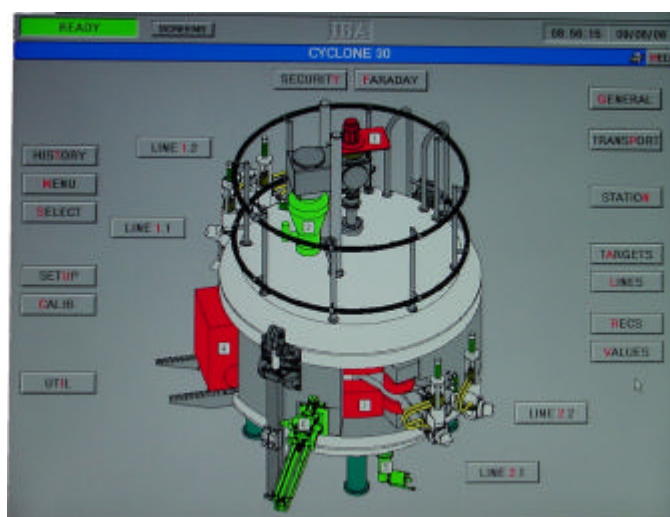


FIGURA 32 – Tela do sistema de controle do cíclotron Cyclone 30

Hardware

Controlador Lógico Programável (CLP), FIG. 33, computador compatível com IBM PC.



FIGURA 33 – Controlador Lógico Programável do cíclotron Cyclone 30

5.1.1.5 Sistema de R.F.

Números de Dês (FIG. 34)		2
Ângulos dos Dês (efetivo)		30 graus
Modo harmônico		4
Frequência (fixa)		65,5 MHz
Voltagem no Dê (nominal)		50,0 kV
Potência dissipada de R.F.	por Dê	5,5 kW
	aceleração de feixe	15,0 kW
Estágio de amplificação final		25 kW



Fonte: IBA, 1994.

FIGURA 34 – Estrutura dos Dês do cíclotron Cyclone 30

5.1.1.6 Fonte de íons

Tipo de fonte (FIG. 35)		“MULTICUSP”
Potência do filamento		0,5 kW
Vida útil do filamento		=200 horas
Potência de arco		5 kW
Fluxo de H ₂	máximo	20 cc/min padrões
	Mínimo	10 cc/min padrões
Voltagem de polarização da fonte (<i>bias</i>)		28 kV
Máxima corrente de H ⁻		> 2 mA

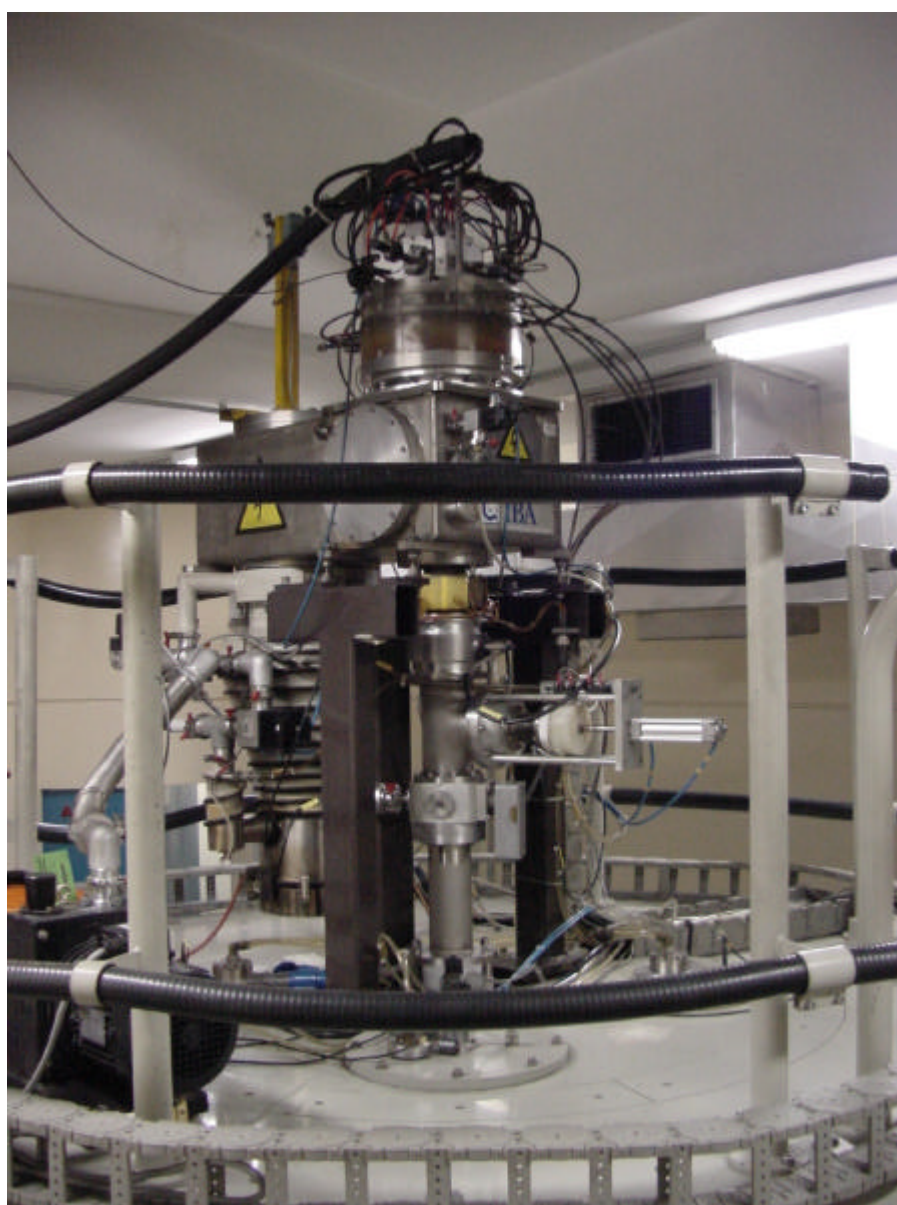


FIGURA 35 – Fonte de íons e sistema de injeção do cíclotron Cyclone 30

5.1.2 Características dos porta-alvos de $^{18}\text{F}^-$

Os porta-alvos utilizados para a produção de $^{18}\text{F}^-$ possuem as seguintes características, de acordo com a Ion Beam Applications (2004):

5.1.2.1 Dimensões dos porta-alvos

Volume da cavidade	5 mL
Dimensões da cavidade	diâmetro 11,5 mm profundidade 49,5 mm
Volume da cavidade	2,4 mL
Dimensões da cavidade	diâmetro 11,5 mm profundidade 29,5 mm

5.1.2.2 Materiais dos porta-alvos

Material da cavidade do alvo	Nióbio (Nb) 99,9% de pureza
Material alvo	H_2^{18}O (enriquecimento = 95%)
Janela (do lado do alvo)	Liga de Havar (50 μm)

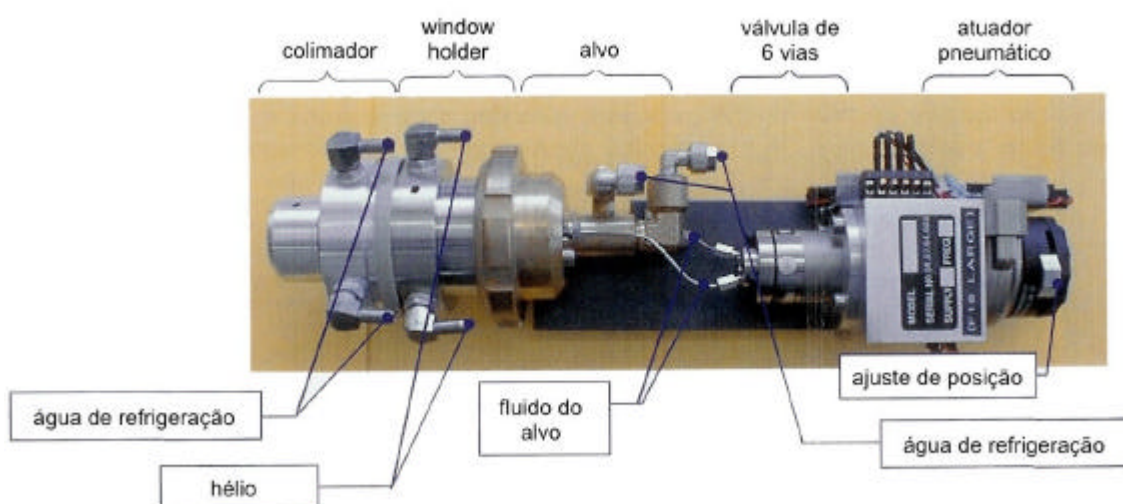
5.1.2.3 Propriedades dos porta-alvos

Reação nuclear	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$
Reações concorrentes	Uma quantidade desprezível de ^{13}N se o enriquecimento é = 95%
Fórmula química após a irradiação	$^{18}\text{F}^-$

5.1.2.4 Características do feixe

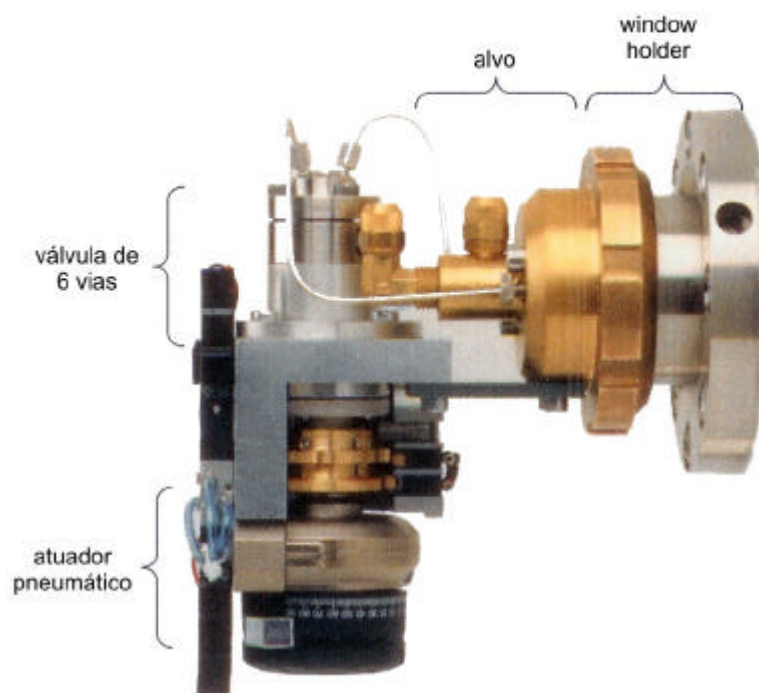
Partícula do feixe	Próton
Energia do feixe no alvo	Entre 17 e 18 MeV
Máxima corrente de feixe	60 μA
Rendimento na saturação	240 mCi/ μA

Os porta-alvos utilizados para a produção de $^{18}\text{F}^-$ no CAC podem ser vistos na FIG. 36 (montagem linear) e na FIG. 37 (montagem em 90°).



Fonte: IBA, 2004.

FIGURA 36 – Porta-alvo da produção de $^{18}\text{F}^-$ no IPEN com montagem linear



Fonte: IBA, 2004.

FIGURA 37 – Porta-alvo da produção de $^{18}\text{F}^-$ no IPEN com montagem em 90°

5.1.3 Sensores

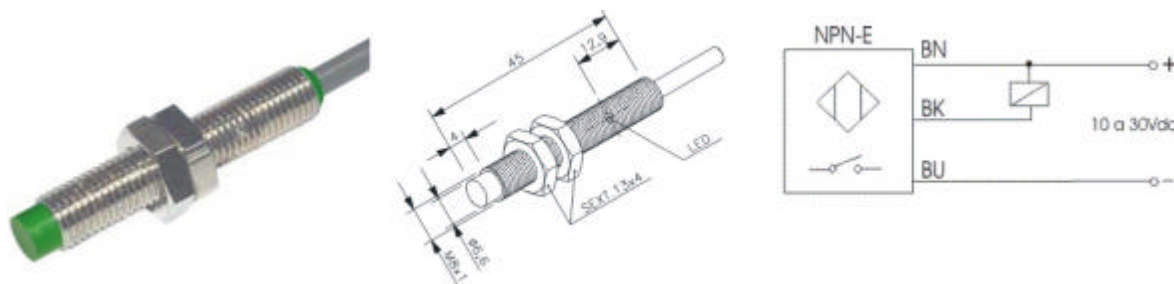
Três tipos de sensores foram testados na otimização do sistema de carga e descarga no porta-alvo de H_2^{18}O utilizado para a produção de $^{18}\text{F}^-$ no ciclotron Cyclone 30 do Centro de Aceleradores Ciclotron: sensor de proximidade indutivo, chave magnética de lâminas (*reedswitch*) e chave fim de curso subminiatura (*microswitch*).

5.1.3.1 Características do sensor de proximidade indutivo

O sensor de proximidade indutivo, modelo PS2-8GM45-E (FIG. 38), possui as seguintes características, de acordo com o manual de instruções fornecido pelo fabricante, Sense (2006):

Modelo	PS2-8GM45-E
Distância sensora nominal (Sn)	2 mm
Distância sensora assegurada (Sa)	1,62 mm
Diâmetro do tubo	8 mm
Comprimento do tubo	45mm
Tipo de rosca	M8 x 1 mm
Invólucro	tubo metálico roscado com <i>led</i> lateral (latão com banho de níquel químico)
Configuração elétrica	CC – NPN
Tipo de contato	NA
Número de fios	3
Conexão	cabo de PVC de 2 m
Tensão de alimentação	10 a 30 VCC
<i>Ripple</i>	10%
Corrente de consumo	<10 mA
Corrente máxima de comutação	100 mA
Proteção de saída	contra curto-circuito e sobrecarga
Queda de tensão no sensor	2 V
Histerese típica	5%
Repetibilidade	<0,01 mm
Freqüência de comutação máxima	600 Hz
EMC (compatibilidade eletromagnética)	dentro das normas IEC-61000-6-2/4-2,3,4,5

Temperatura de operação	-25°C a +70°C
Grau de proteção	IP-67
Peso	55 g



Fonte: Sense, 2006.

FIGURA 38 – Sensor indutivo com dimensões (em mm) e diagrama elétrico

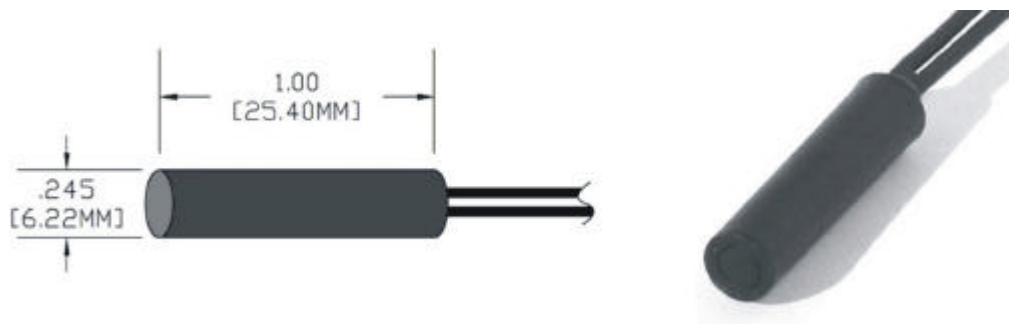
De acordo com o fabricante, Sense (2006), os sensores de proximidade indutiva são equipamentos eletrônicos capazes de detectar a aproximação de peças metálicas, elementos de máquinas ou componentes, em substituição as tradicionais chaves fim de curso. A detecção ocorre sem que haja contato físico entre o sensor e o acionador, aumentando a vida útil do sensor por não possuir peças móveis, sujeitas a desgastes mecânicos. O princípio de funcionamento baseia-se na geração de um campo eletromagnético de alta frequência, que é desenvolvido por uma bobina ressonante instalada na face sensora. A bobina faz parte de um circuito oscilador que, em condição normal (desacionada), gera um sinal senoidal. Quando um metal aproxima-se do campo, são geradas correntes de superfície no metal (Foucault), absorvendo a energia do campo e diminuindo a amplitude do sinal gerado no oscilador. A variação de energia deste sinal é convertida numa variação contínua que, comparada com um valor padrão, passa a atuar no estágio de saída (Sense, 2006).

5.1.3.2 Características da chave magnética (*reedswitch*)

A chave magnética (*reedswitch*), marca Reed Switch Development Corp., modelo 2230-1051-100 (FIG. 39), possui as seguintes características de acordo com o fabricante, Reed Switch Development Corp. (2008):

Potência máxima	10 W
Voltagem de chaveamento máxima	200 VCC
Voltagem de ruptura	275 VCC
Corrente de chaveamento máxima	1 A

Resistência inicial máxima dos contatos	0,115 Ohms
Resistência de isolamento máxima dos contatos	10^8 Ohms
Temperatura de operação	-55°C a 105°C



Fonte: Reed Switch Dev. Corp., 2008.

FIGURA 39 – Chave magnética com dimensões (em mm)

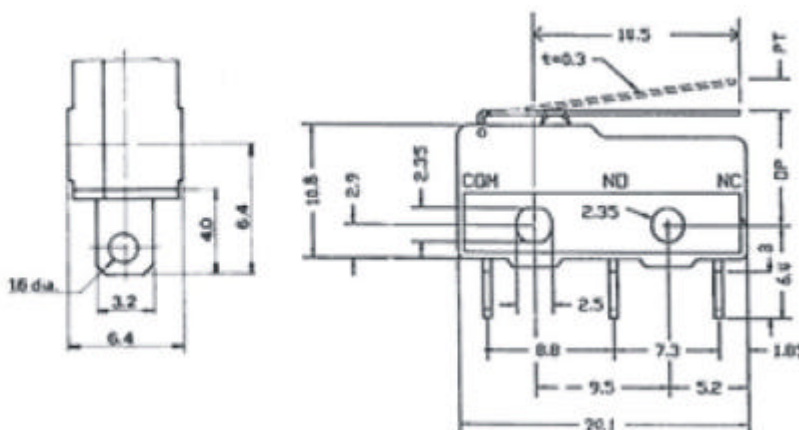
O *reedswitch* ou chave magnética de lâminas é um dispositivo que contém duas lâminas flexíveis de material ferromagnético (NiFe), seladas hermeticamente dentro de uma cápsula de vidro que é preenchida com um gás inerte. A atmosfera do gás inerte protege as regiões de contato das lâminas impedindo oxidações. As lâminas ficam sobrepostas, mas são separadas por um pequeno espaço. A aplicação de um campo magnético, através de um ímã permanente ou de uma bobina, induzem uma magnetização destas lâminas: quando a força magnética supera a elasticidade das lâminas, elas se unem, e quando a força magnética diminui com o afastamento do ímã ou o desligamento da bobina, as lâminas se separam. As regiões de contato são folheadas com um metal nobre, como ródio ou rutênio, para proporcionar características elétricas estáveis e maior vida útil.

5.1.3.3 Características da chave fim de curso (*microswitch*)

A chave fim de curso subminiatura ou *microswitch* (FIG. 40) possui as seguintes características, de acordo com o fabricante, OKW Eletronics (2008):

Corrente máxima	5 A 250 VAC
Resistência de contato inicial máxima	100 mO
Resistência de isolamento mínima	100 MO a 1,5 kVAC
Vida mecânica mínima	3×10^6 operações
Vida elétrica mínima	1×10^6 operações
Temperatura de operação	-20°C a +70°C
Material do corpo	PBT

Material do fundo	PA 66
Material do atuador	aço inox
Material do contato	prata
Material dos terminais	latão com banho de prata
Comprimento da alavanca	14,5 mm
Largura da alavanca	4mm
Força máxima de operação	42 g
Força máxima de liberação	12 g
Curso PT (<i>pre travel</i>) máximo	2,6 mm
Movimento diferencial	0,6 mm
Curso OT (<i>over travel</i>) mínimo	1,0 mm



Fonte: OKW Electronics, 2008.

FIGURA 40 – *Microswitch* com dimensões (em mm)

As chaves fim de curso subminiatura ou *microswitches* são interruptores acionados mecanicamente através de uma força num atuador tipo alavanca, rolete ou pino, que provoca a abertura ou fechamento de contatos metálicos.

5.2 Procedimento experimental

5.2.1 Posicionamento dos sensores na Sala de Irradiação

O *microswitch*, a chave magnética e o sensor indutivo foram acondicionados em sacos plásticos separadamente (para evitar possíveis contaminações), e posicionados o mais próximo possível da região de trabalho, atrás do atuador pneumático da válvula de carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$ (FIG. 41). Nesta posição, os componentes sofreriam a ação das radiações produzidas durante as irradiações de $^{18}\text{F}^-$ e ^{123}I que ocorrem nesta Sala de Irradiação similar

a que receberiam na posição de trabalho (FIG. 42). A irradiação rotineira de ^{123}I é realizada uma vez por semana, enquanto as irradiações rotineiras de ^{18}F são feitas cinco dias por semana. Nas irradiações de ^{18}F são utilizados prótons com energia de 19 MeV e corrente de feixe de 50 ou 30 μA (dependendo da capacidade do porta-alvo), as irradiações duram em torno de duas horas e são feitas de uma a três irradiações por dia. Na irradiação rotineira de ^{123}I são utilizados prótons de 30 MeV e corrente de feixe de 50 μA , por um período em torno de seis horas. No início de cada semana a ativação dos componentes era monitorada através do contador Geiger-Muller, e o funcionamento dos componentes era testado conforme procedimento descrito a seguir.

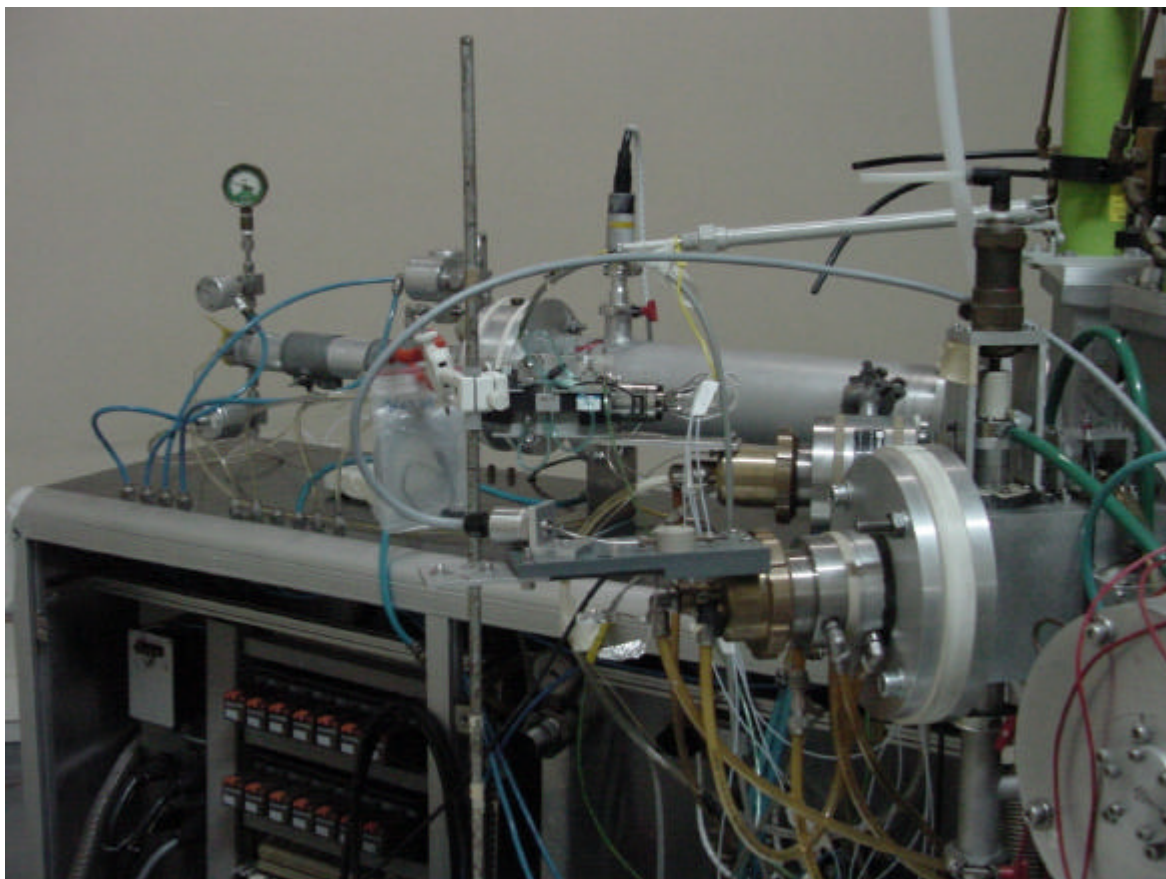


FIGURA 41 – Posicionamento do experimento

5.2.2 Teste dos sensores

O *microswitch* era conectado ao multímetro através de seus contatos comum (COM), normalmente aberto (NO) e normalmente fechado (NC) e sua alavanca empurrada até o acionamento dos contatos, sendo a condutividade monitorada pelo multímetro. O *reedswitch* era conectado ao multímetro através de

seus dois fios, o imã de acionamento era aproximado e o fechamento dos contatos era monitorado pelo multímetro através da condutividade. O sensor indutivo era alimentado com 24 VCC por uma fonte de tensão (voltagem utilizada pelos Controladores Lógicos Programáveis - CLPs do ciclotron), e a voltagem de saída era monitorada pelo multímetro, o acionamento era provocado pela aproximação de um material (alvo) metálico.

Os componentes utilizados no experimento sofreram a ação de radiação gama e de nêutrons, que são subprodutos das irradiações rotineiras de $^{18}\text{F}^-$ [$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$] e ^{123}I [$^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs}$? ^{123}Xe ? ^{123}I ; $^{124}\text{Xe}(p,pn)^{123}\text{Xe}$? ^{123}I] que são feitas na Sala de Irradiação 1.2 do Centro de Aceleradores Cíclotron (FIG. 42).

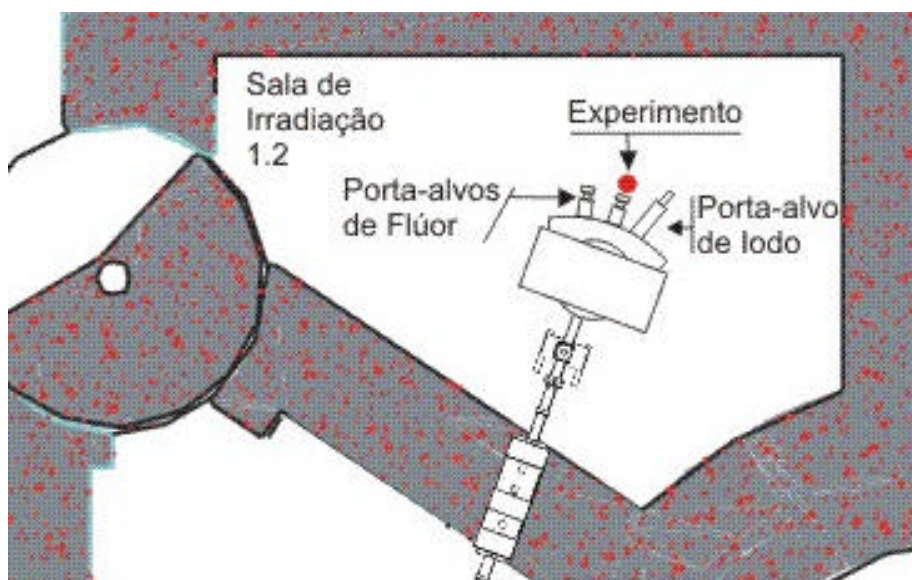
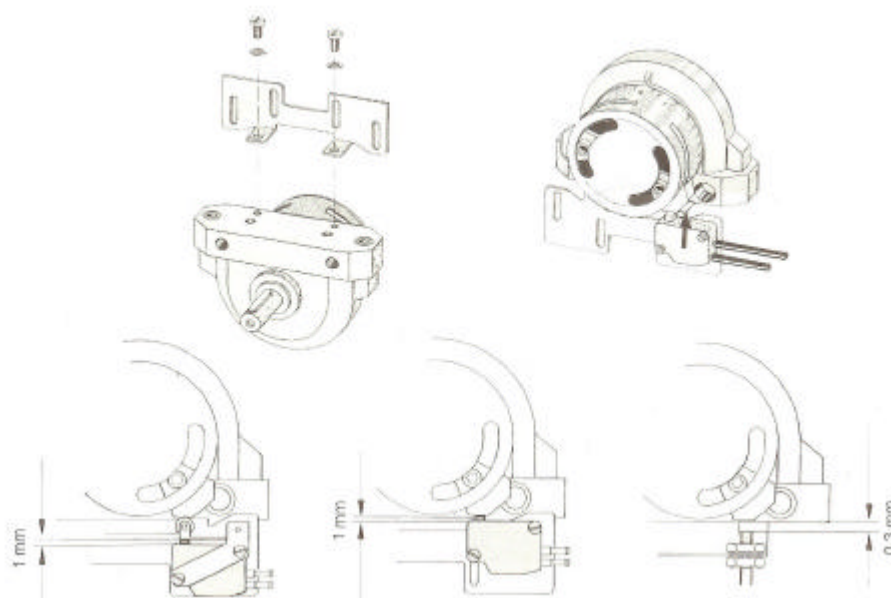


FIGURA 42 – Localização do experimento na Sala de Irradiação 1.2

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Ausência de solução dos fabricantes

O fabricante do atuador pneumático rotativo (Festo) possui em sua linha de produtos peças para a montagem de indicadores de posição no atuador utilizando dois *microswitches* ou dois sensores de proximidade indutivo (FIG. 43). Porém, esta montagem não atende a necessidade do procedimento de carga e descarga do alvo de Flúor, que precisa de três indicadores de posição (carga, descarga e fechado). A posição fechado, não contemplada nos produtos do fabricante, é de crucial importância para a confiabilidade do sistema de carga e descarga, pois o não fechamento da válvula resultará em perda da produção de $^{18}\text{F}^-$ durante a irradiação, além de aumento do risco de contaminação da Sala de Irradiação.

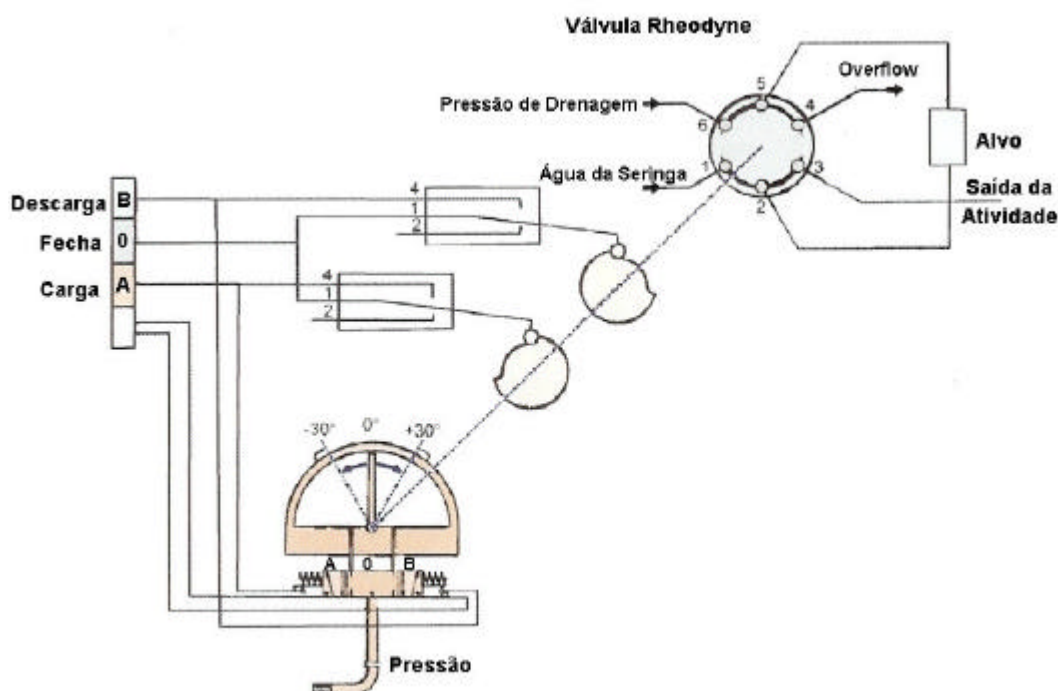


Fonte: Festo, 2008

FIGURA 43 – Montagens de indicadores de posição do fabricante

Na FIG. 44 é mostrado o esquema de ligação do atuador pneumático que comanda a válvula de 3 vias dupla Rheodyne. Este conjunto é fabricado pela Ion Beam Applications para o Sistema de Carga e Descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$.

Ao fornecer 24 VCC para a posição de carga a válvula eletropneumática injeta ar comprimido no atuador deslocando seu eixo para a posição de $+30^\circ$ e conectando as aberturas 5 com 4 e 1 com 2 na válvula Rheodyne, Ao fornecer 24 VCC para a posição de descarga a válvula eletropneumática injeta ar comprimido no atuador deslocando seu eixo para a posição -30° e conectando as aberturas 5 com 6 e 2 com 3 na válvula Rheodyne, fornecendo 24 VCC para a posição de fecha a válvula eletropneumática injeta ar comprimido até o atuador atingir a posição de 0° , fechando todas as aberturas da válvula Rheodyne.



Fonte: IBA, 2004

FIGURA 44 – Controle de posição da válvula Rheodyne

6.2 Corrente integrada das produções rotineiras

Na FIG. 45 está apresentada a corrente integrada, em μAh , das irradiações que ocorreram na Sala de Irradiação 1.2 durante o período do experimento.

As irradiações foram efetuadas em três alvos distintos, a saber:

- Alvo de água enriquecida, H_2^{18}O , (produção de $^{18}\text{F}^-$), de 5 mL, com feixe de prótons de 19 MeV e correntes de feixe de $50 \mu\text{A}$;
- Alvo de água enriquecida, H_2^{18}O , (produção de $^{18}\text{F}^-$), de 2,4 mL, com feixe de prótons de 19 MeV e correntes de feixe de $30 \mu\text{A}$; e

- c) Alvo de ^{124}Xe enriquecido (produção de ^{123}I), com feixe de prótons de 30 MeV e correntes de feixe de 50 μA .

As variações das quantidades integradas ocorreram em função da demanda dos radioisótopos e dos intervalos de manutenção no acelerador e nos sistemas de irradiação.

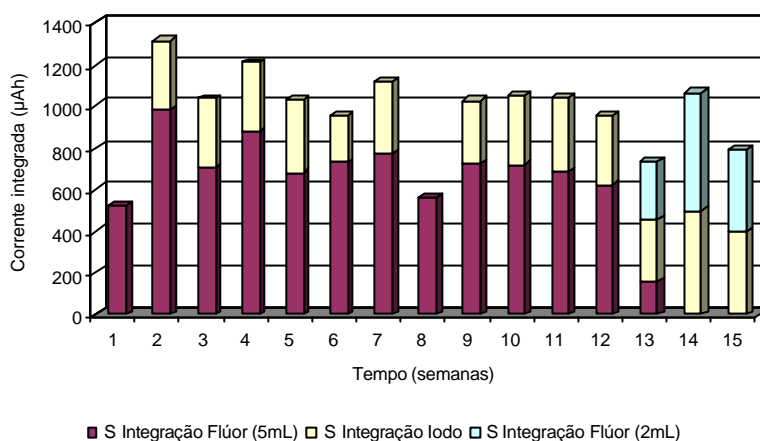


FIGURA 45 – Corrente integrada das irradiações na Sala de Irradiação 1.2

6.3 Ativação radioativa dos sensores

Na FIG. 46 é mostrada a variação da ativação radioativa dos três sensores em função do tempo em que sofreram a ação das irradiações rotineiras na Sala de Irradiação 1.2.

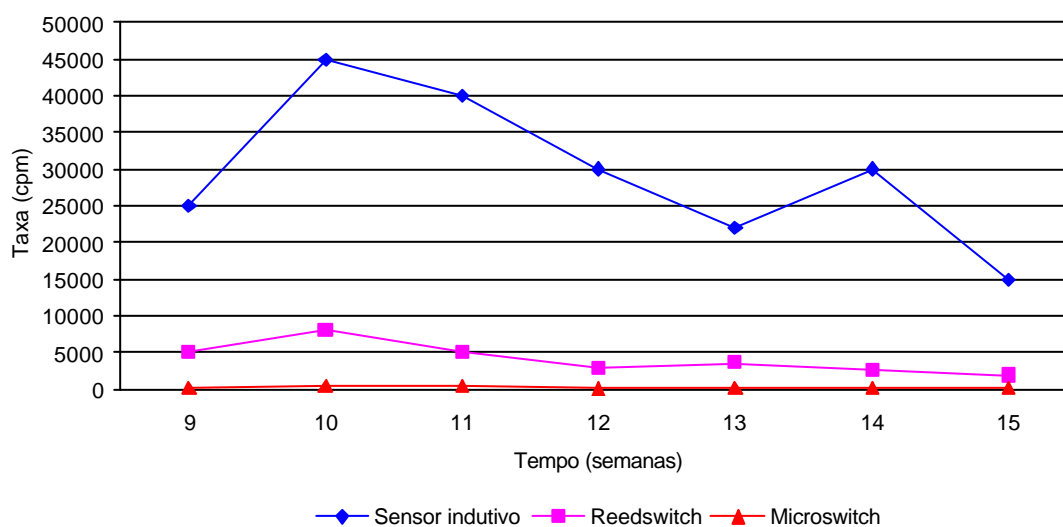


FIGURA 46 – Ativação radioativa dos três sensores

Ao longo das quinze semanas em que os sensores sofreram a ação dos subprodutos das irradiações rotineiras de $^{18}\text{F}^-$ e ^{123}I , eles apresentaram

ativações radioativas, registradas na FIG. 46, devido aos materiais característicos de cada um. Verificou-se que o sensor indutivo apresentou maior ativação do que o *reedswitch*, e este apresentou maior ativação do que o *microswitch*. O sensor indutivo, além do invólucro de latão com banho de níquel, possui internamente uma bobina com núcleo de ferrite e circuitos eletrônicos, enquanto o *reedswitch* e o *microswitch* são confeccionados em plástico com contatos metálicos internos e apresentam menor grau de ativação.

6.4 Comportamento dos sensores irradiados

Na FIG. 47 é apresentado o gráfico de controle do sensor indutivo. Quando o sensor indutivo funciona normalmente, sua tensão de saída é de menos de 1 VCC quando não está acionado, e aproximadamente igual a tensão de entrada quando está acionado (no caso do sensor ser do tipo normalmente aberto – NA – como o utilizado no experimento).

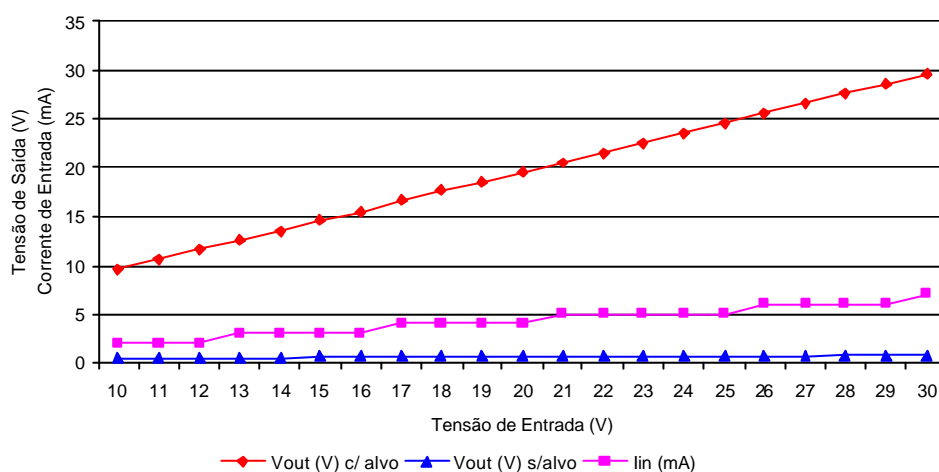


FIGURA 47 – Gráfico de controle do sensor indutivo

Os sensores não apresentaram qualquer alteração no seu funcionamento, em função dos níveis de radiação do local, até a 11ª semana. A partir da 12ª semana, o sensor indutivo apresentou mudanças de comportamento: forneceu 24 VCC na saída, mesmo sem o alvo metálico na posição de acionamento. Apesar deste defeito na voltagem de trabalho do CLP, o sensor indutivo ainda funcionava adequadamente entre 27 e 30 VCC. Para acompanhar a evolução dos danos de radiação no sensor indutivo, o monitoramento passou a ser feito em toda a faixa de voltagem de trabalho.

Na FIG. 48 é apresentado o gráfico do sensor indutivo obtido na 12ª semana, onde se pode verificar seu mau funcionamento em duas regiões distintas (10-17 VCC e 18-26 VCC), e o funcionamento correto entre 27 e 30 VCC.

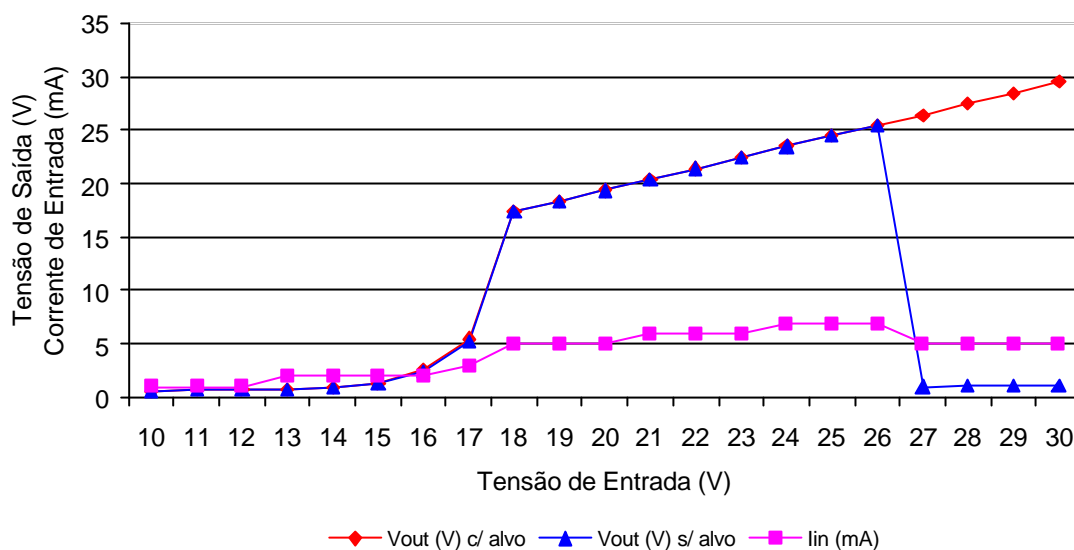


FIGURA 48– Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 12ª semana

Na FIG. 49 é mostrado o comportamento do sensor indutivo na 13ª semana, onde se pode notar que a faixa de mau funcionamento foi ampliada para 10-19 VCC e 20-28 VCC, com o funcionamento correto restrito a faixa entre 29 e 30 VCC.

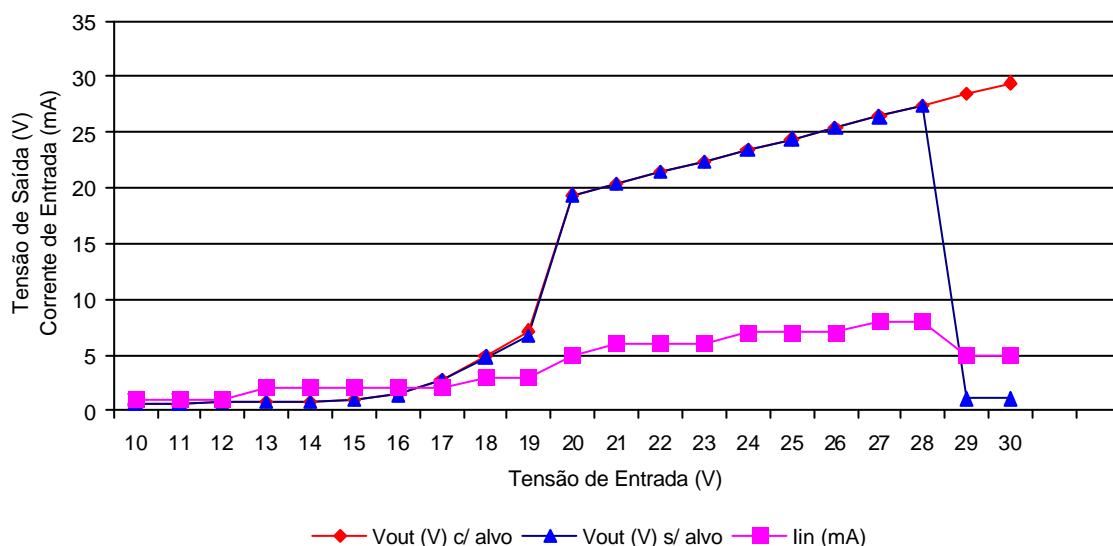


FIGURA 49 – Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 13ª semana

Na FIG. 50, onde é apresentado o funcionamento do sensor indutivo na 14ª semana, a faixa de mau funcionamento permaneceu a mesma da semana

anterior, porém ocorreu uma mudança na tensão de saída na região de fronteira entre as duas regiões de mau funcionamento (10-18 VCC e 19-28 VCC), e o funcionamento correto permaneceu na região entre 29 e 30 VCC.

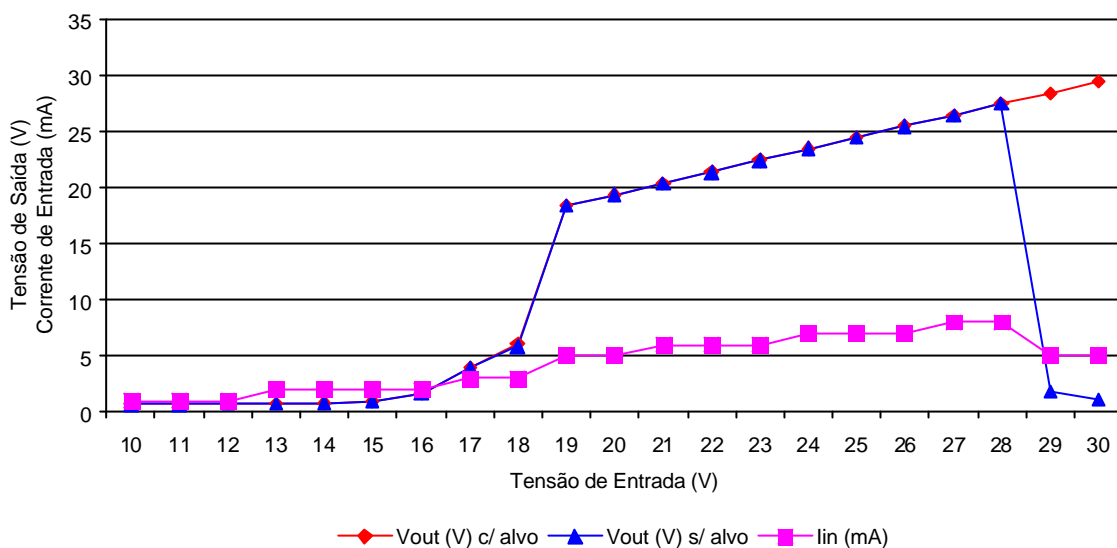


FIGURA 50 – Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 14ª semana

Na FIG. 51, que representa o funcionamento do sensor indutivo na 15ª semana, o mau funcionamento se estendeu por toda a faixa da tensão de trabalho do sensor, apresentando duas regiões distintas de mau funcionamento, entre 10 e 19 VCC e entre 20 e 30 VCC.

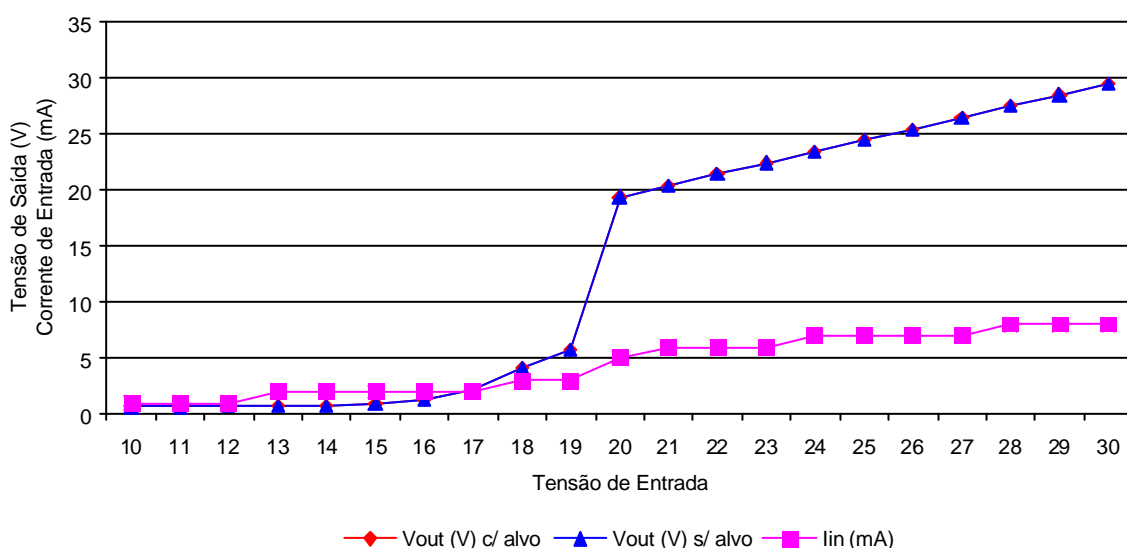


FIGURA 51 – Gráfico do funcionamento do sensor indutivo na 15ª semana

Os sensores indutivos tiveram sua utilização amplamente difundida na indústria mundial, suas características técnicas e confiabilidade os tornaram essenciais em vários tipos de processos. Algumas de suas qualidades são: não

necessitam de energia mecânica para operar, atuam por aproximação sem contato físico com a peça, são totalmente vedados, funcionam com altas velocidades de comutação e são imunes a vibração e choques mecânicos. Suas aplicações incluem processos automatizados como máquinas operatrizes, indústria automobilística, injetoras de plástico, máquinas de embalagens e indústria cerâmica, sendo capazes de operar em condições severas de trabalho, como na presença de lubrificantes, óleos e até imersos em água. Há também sensores indutivos desenvolvidos em função do ambiente de trabalho, como as máquinas ferramentas, onde pequenas lascas de metal podem interferir na superfície de detecção. Para a indústria alimentícia, foram desenvolvidos sensores inibidores de bactérias, e para ambientes potencialmente explosivos foram desenvolvidos sensores que evitam a ignição de circuitos expostos. Entretanto, todas estas qualidades não foram suficientes para adequar o sensor indutivo num local como a Sala de Irradiação de um acelerador cíclotron, onde os componentes dos dispositivos instalados neste ambiente devem suportar altas doses de radiação gama e nêutrons, que são subprodutos das irradiações rotineiras para a fabricação de radioisótopos. Caso fosse escolhido sem ser testado, ele funcionaria adequadamente até a 11ª semana. Todavia, analisando o comportamento do sensor nas semanas seguintes, há razões para se crer que o sensor indutivo foi sofrendo danos de radiação no seu circuito eletrônico logo nas primeiras irradiações. Porém, o funcionamento correto dependia da tensão de trabalho: caso a tensão de trabalho do sensor fosse inferior a 24 VCC (tensão de trabalho dos controladores lógicos programáveis utilizados no acelerador cíclotron), o mau funcionamento do sensor provavelmente seria detectado em semanas anteriores. Além disso, o sensor indutivo apresentou outro problema relevante no teste a que foi submetido, os danos de radiação levaram o sensor indutivo a apresentar faixas de trabalho com falso acionamento na saída (FIG. 48, 49, 50 e 51). Estes falsos acionamentos podem resultar em danos aos equipamentos do processo, incidentes na produção e até acidentes mais graves, casos sensores deste tipo sejam utilizados em sistemas de segurança em instalações nucleares e radioativas onde há a ocorrência de emissão de nêutrons que podem danificar o sensor.

O *reedswitch* e o *microswitch* apresentaram ativação menor do que o sensor indutivo, além de não apresentarem falhas ao longo do tempo a que foram

submetidos ao experimento, mostrando-se mais adequados ao trabalho num ambiente como a Sala de Irradiação de um acelerador cíclotron do que um sensor de proximidade indutivo. A escolha do *microswitch* em detrimento ao *reedswitch* deveu-se a maior simplicidade de sua instalação no atuador pneumático rotativo: enquanto com o *microswitch* foi preciso apenas confeccionar um suporte e instalar um parafuso indicador da posição 0° , para o *reedswitch* seria preciso confeccionar um suporte e instalar três imãs no atuador pneumático para a indicação das posições. Além disso, a proximidade do Magneto Comutador poderia causar alguma alteração no trabalho do *reedswitch*, que é mais susceptível a interferência de campos magnéticos do que o *microswitch*.

6.5 Montagem do sensor na válvula

Para a fixação dos *microswitches* no atuador pneumático foi fabricada uma peça em alumínio (FIG. 52), que permitiu o posicionamento de três *microswitches* no atuador. Deste modo, as posições carga, descarga e fechado podem ser monitoradas.

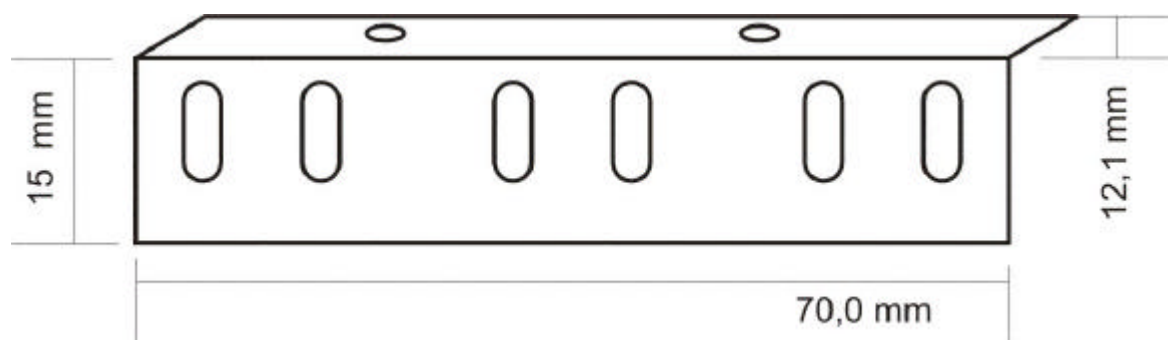


FIGURA 52 – Placa projetada para fixação dos *microswitches*

Os cames de fim de curso do atuador são utilizados para a indicação de $\pm 30^\circ$, porém não há no atuador um came para indicação de 0° . Por isso utilizou-se um parafuso na posição 180° do atuador que acionaria o *microswitch* marcador desta posição (FIG. 53).

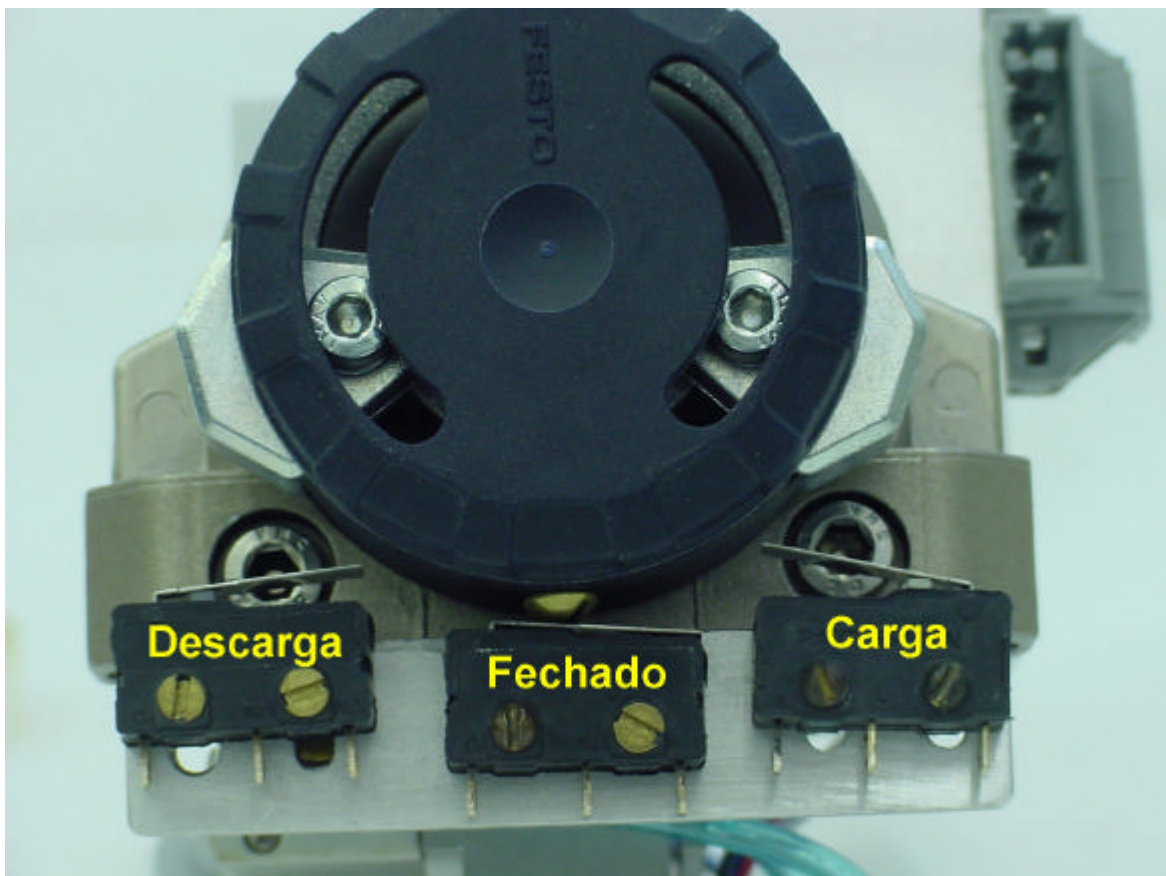
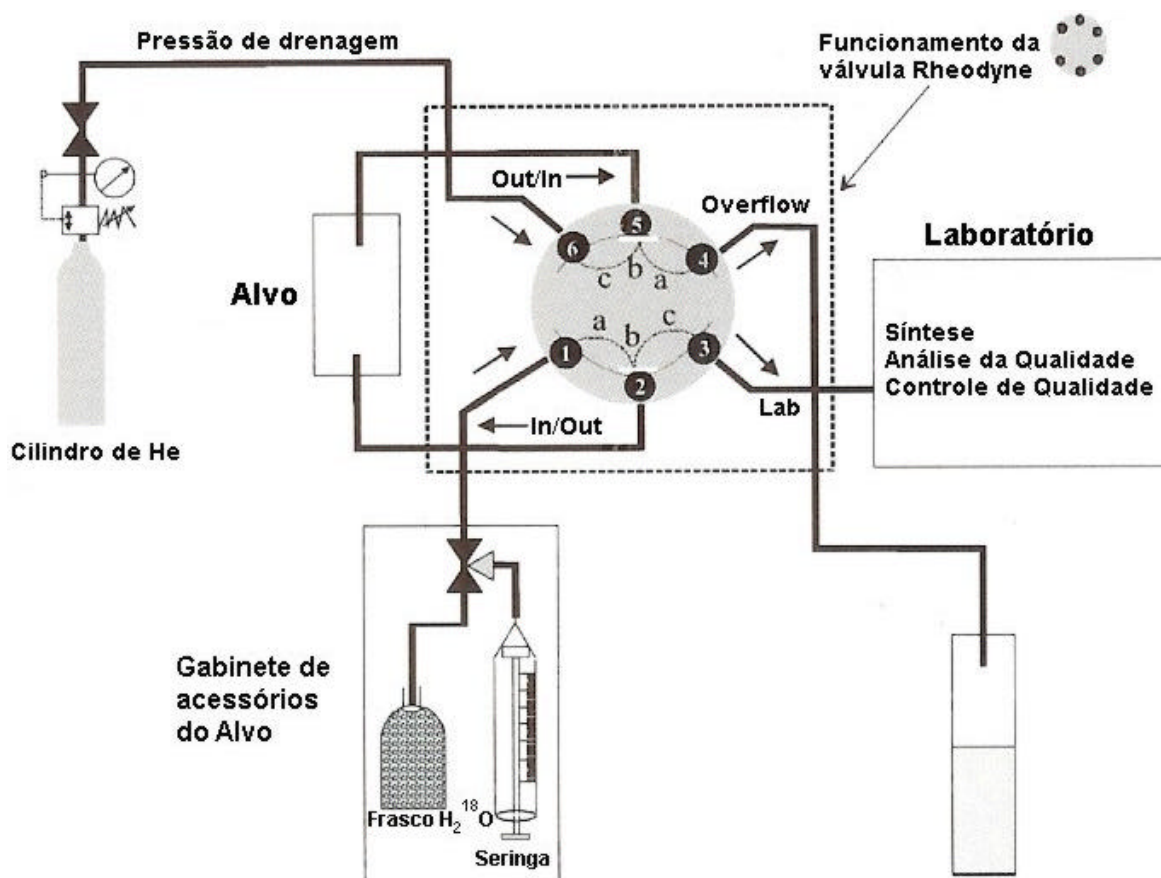


FIGURA 53 – Atuador com os três *microswitches* em posição

6.6 Funcionamento do Sistema de Carga e Descarga

Na FIG. 54 está representado o esquema de funcionamento da carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$. Para o procedimento de carga do alvo a seringa primeiramente é preenchida com água enriquecida em ^{18}O , que será posteriormente injetada na cavidade do alvo através das aberturas 1 e 2 da válvula Rheodyne e irradiada. Após a irradiação é injetado hélio pelas aberturas 6 e 5 que drena a água e o $^{18}\text{F}^-$ pelas aberturas 2 e 3 para o módulo de síntese.



Fonte: IBA, 2004

FIGURA 54 – Esquema do funcionamento da carga e descarga do alvo de ^{18}F

6.7 Modificação na programação do CLP

Para controlar os procedimentos de carga e descarga do alvo de ^{18}F , o operador utiliza um controlador lógico programável com tela sensível ao toque, onde está esquematizado os dispositivos do Sistema de Carga e Descarga do Alvo de ^{18}F (FIG. 55).

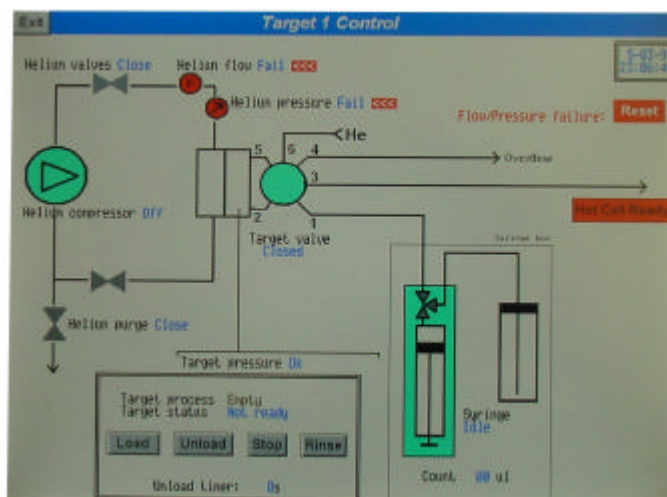


FIGURA 55– Tela do Sistema de Controle do Alvo de Flúor (neutra)

As telas que fazem a interface com o operador utilizam códigos de cores e textos para indicar o estado dos dispositivos do sistema (FIG. 56, 57 e 58).

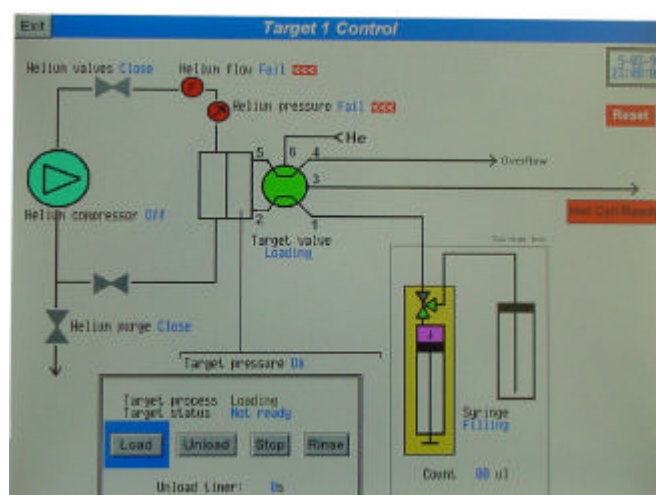


FIGURA 56– Tela do Sistema do Flúor (carga/enchimento da seringa)

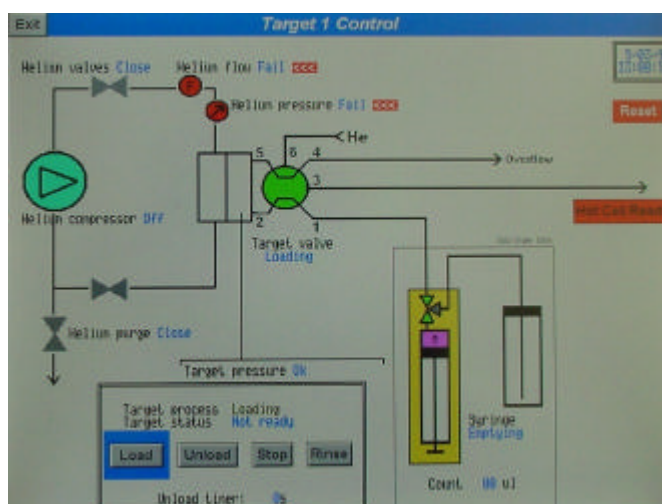


FIGURA 57 – Tela do Sistema do Flúor (carga/esvaziamento da seringa)

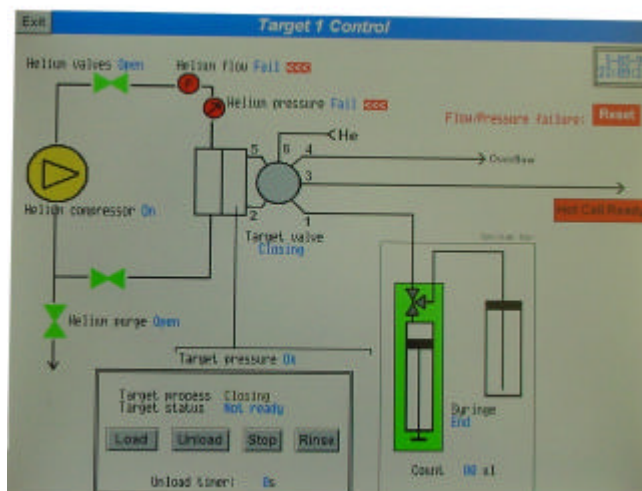
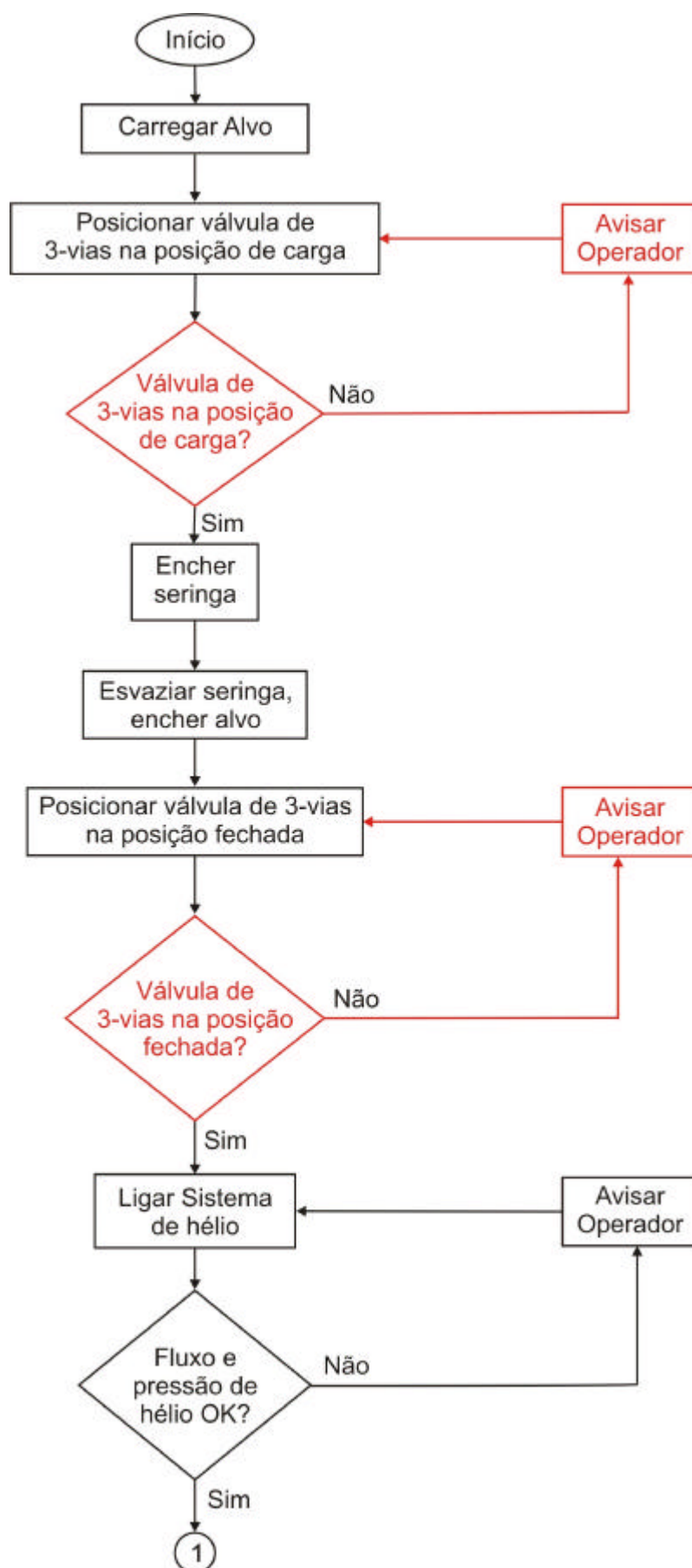


FIGURA 58 – Tela do Sistema do Flúor (fim da carga)

Como foram instalados os três sensores fim de curso para monitorar o posicionamento da válvula Rheodyne, o programa do CLP foi modificado para a inclusão destas informações e controle. Para as mudanças na programação do CLP, foi utilizado o programa S5/S7 for Windows da IBH softec, 2000.

Nas FIG. 59 e 60 são apresentados os fluxogramas dos procedimentos de carga e descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$, os símbolos em vermelho referem-se a decisões e atividades que não eram executados pelo programa original do fabricante.

FIGURA 59 – Fluxograma de carga e descarga do alvo de ^{18}F

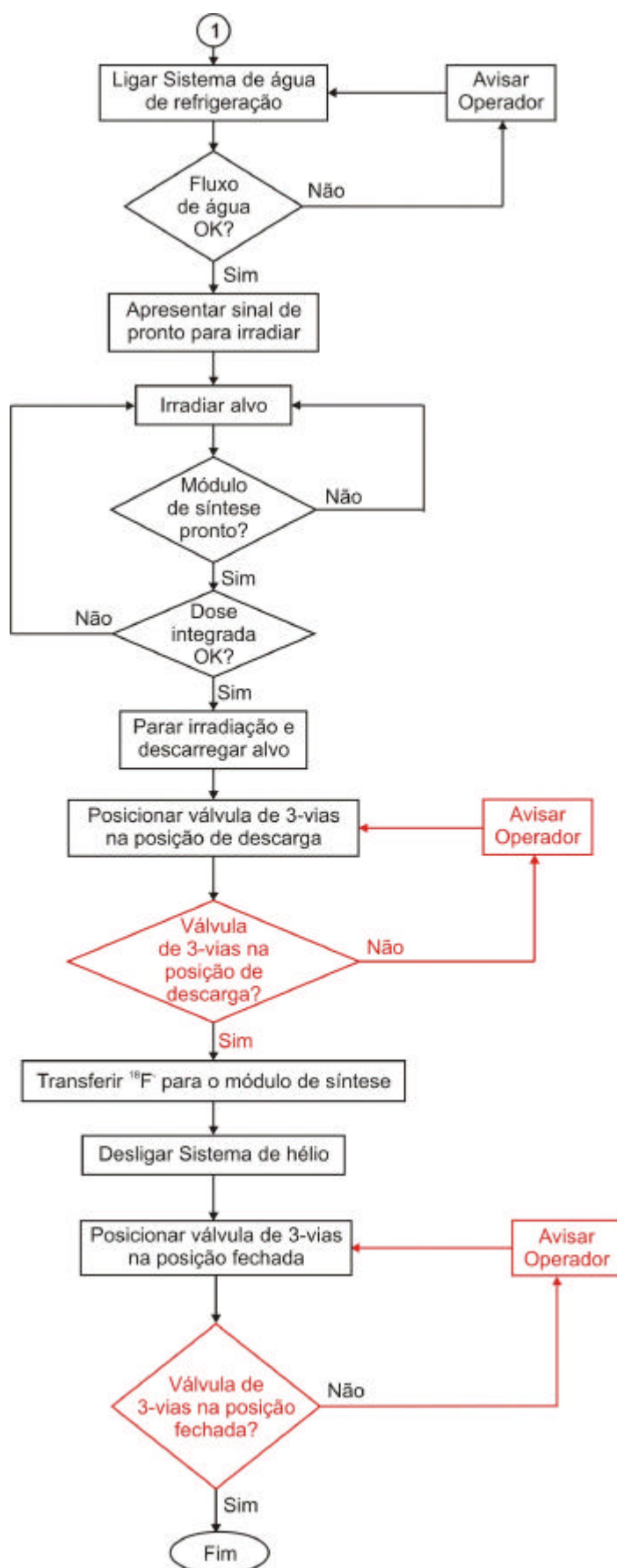


FIGURA 60 – Fluxograma de carga e descarga do alvo de $^{18}\text{F}^-$ (continuação)

Com a instalação dos *microswitches* indicadores de posição do atuador da válvula de carga e descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$ e a mudança na programação do controlador lógico programável do fabricante do equipamento (Ion Beam Applications), foi possível aumentar a confiabilidade do sistema de carga e descarga e com isso aumentar a confiabilidade na cadeia produtiva do [^{18}F]FDG como um todo, pois como o ciclo de produção e consumo do [^{18}F]FDG acontece ao longo de seis horas (ver FIG. 2), qualquer falha não detectada nesta fase do processo produtivo levará a uma espera não programada pelo consumidor final ou até um cancelamento do exame. O fabricante do porta-alvo (Ion Beam Applications) não disponibiliza em sua linha de produtos, até a conclusão deste trabalho, um sistema de indicação de posicionamento da válvula de carga e descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$, pois não há mudança nesse sentido nos novos porta-alvos de $^{18}\text{F}^-$ adquiridos em conjunto com o novo acelerador ciclotron Cyclone 18+ pelo IPEN. Em produções rotineiras de $^{18}\text{F}^-$, com o início da irradiação, é feito o acompanhamento da pressão interna da câmara de irradiação, que é um indicativo se o alvo realmente foi carregado corretamente e se a válvula Rheodyne está fechada. A irradiação é interrompida no caso de qualquer anormalidade, e a água enriquecida é retirada do porta-alvo tornando-se imprópria para uso numa produção em que se espera alto rendimento.

A decisão sobre a indicação da posição de um dispositivo em um projeto passa pela análise do custo/benefício que esta indicação trará ao projeto, e para reduzir o custo dos equipamentos a maioria dos projetistas são convencidos a restringir este tipo de indicação. Porém, na indústria nuclear ou na produção de materiais radioativos, como acontece no Centro de Aceleradores Cíclotron, as normas do setor nos obrigam a sermos conservadores quanto à possibilidade de incidentes e acidentes, o caso do acidente nuclear de Three Mile Island, por exemplo, teve como destaque a falta de indicação de posição correta de uma válvula de alívio de pressão do circuito primário do reator.

Com a indicação do posicionamento da válvula de carga e descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$, o operador do sistema de irradiação não necessitará mais verificar a posição da válvula na Sala de Irradiação, diminuindo sua exposição à radiação em uma atividade rotineira, o que acarretará uma considerável diminuição em sua dose anual. Esta otimização da exposição do trabalhador está

de acordo com a Norma CNEN-NN-3.01 de janeiro de 2005 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.

Não é possível imaginar aceleradores modernos sem equipamentos eletrônicos fazendo parte de seus sistemas de controle. Os projetistas desses aceleradores, sempre que possível, evitam posicionar componentes sensíveis à radiações em ambientes onde estas ocorrem. Porém, algumas vezes isto pode ocorrer, por motivos técnicos, falta de conhecimento dos projetistas ou falta de informação sobre danos de radiação em componentes da indústria moderna. No acelerador cíclotron Cyclone 30 do IPEN, por exemplo, as fontes de potência e o controlador lógico programável da fonte de íons do acelerador foram colocados dentro da caverna do acelerador, e como não há irradiações de alvos localizados na caverna do cíclotron e o acelerador apresenta pouca perda de feixe durante a aceleração dos íons, o nível de radiação gama e de nêutrons na caverna do acelerador é menor do que nas Salas de Irradiação, o que contribui para a maior vida útil dos componentes eletrônicos acondicionados na caverna. Porém, problemas já foram registrados, como o caso de rolamentos com partes internas de plástico que faziam parte do Sistema de Irradiação de Alvos Sólidos, original do fabricante (Ion Beam Applications): estes rolamentos apresentaram deterioração de sua parte plástica após alguns anos, de uso tendo que ser substituídos por rolamentos com todas as partes metálicas. A influência da radiação torna-se crítica, pois estes rolamentos também estão sujeitos a tensões mecânicas. Casos de danos em sensores com eletrônica embutida são comuns em salas de irradiações do acelerador cíclotron como, por exemplo, em alguns tipos de sensores de vácuo. No entanto, não há a devida atenção dos fabricantes de sistemas de irradiação quanto a orientação aos operadores do sistema ao posicionamento mais adequado de determinados componentes mais sensíveis à radiação. Mais experimentos sobre danos de radiação em componentes utilizados em instalações radiativas e nucleares são necessários para aumentar a confiabilidade e a segurança destas instalações. Deste modo, os projetistas destas áreas terão mais fundamentos para balizar a escolha de componentes mais resistentes ao ambiente das instalações radiativas e nucleares.

A evolução dos sistemas de irradiação de alvos líquidos começou pela busca de projetos confiáveis, pois, diferentemente dos sistemas de irradiação de alvos sólidos, eles necessitam de uma janela de separação entre o material alvo e

a linha de feixe, que deve permanecer em alto vácuo, os materiais utilizados nas janelas necessitam de alta resistência elástica e alto ponto de fusão, para que, mesmo com a mínima espessura necessária, para minimizar a perda de feixe na janela, sejam capazes de resistir ao aumento da pressão interna da cavidade. Com o aumento da confiabilidade dos sistemas, buscou-se projetar porta-alvos capazes de dissipar cada vez mais potência de feixe, e para tanto, foram projetados alvos com troca de calor mais eficiente na parte anterior (janelas) e posterior das cavidades. Como a grande maioria dos cíclotrons utilizados para a produção de radioisótopos de meia-vida curta não apresentam uma potência de feixe maior do que 1500 W (TAB. 4), a maioria dos projetos dos sistemas de irradiação de alvos líquidos deve se limitar a essa potência. Porém, com o aumento da intensidade de corrente máxima dos aceleradores, novos projetos de porta-alvos com troca de calor mais eficiente encontram-se em fase de desenvolvimento. Com o aumento da potência dissipada pelos porta-alvos, a melhoria dos sistemas de irradiação para a produção de $^{18}\text{F}^-$ está voltada para o aumento da pureza da água com $^{18}\text{F}^-$, com a finalidade de se obter uma diminuição da quantidade de íons metálicos que competem quimicamente com o $^{18}\text{F}^-$, visando melhorar o rendimento da produção de $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ no módulo de síntese. Para isso busca-se filtros mais seletivos e materiais da cavidade e das janelas mais resistentes aos danos da irradiação e com maior inércia química. As melhorias nos sistemas de irradiação visam trazer aumento na confiabilidade e na produtividade dos radioisótopos, impactando diretamente nas cadeias produtivas dos radiofármacos.

7 CONCLUSÕES

O estudo mostrou que os sensores de proximidade indutiva, que são amplamente utilizados na indústria por sua confiabilidade e robustez, somente devem ser utilizados depois de criteriosa análise do ambiente em que permanecerão. Devem ser evitados ambientes sujeitos à radiação gama e nêutrons, assim como sistemas de segurança destas instalações, devido a danos que a radiação gama e nêutrons podem causar na eletrônica embutida neste tipo de sensor.

Os sensores de posição do tipo *microswitch* e *reedswitch* comprovaram sua eficácia em ambientes sujeitos a altas taxas de radiação gama e de nêutrons. A simplicidade de construção destes componentes garantem-lhes vida útil similar àquela fora do ambiente de radiação gama e de nêutrons, o que os tornam mais adequados para o trabalho neste tipo de instalação.

A instalação dos indicadores de posição na válvula de carga e descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$, e a alteração no programa do controlador lógico programável questionando o posicionamento da válvula de carga e descarga do porta-alvo, tornou o procedimento mais confiável, resultando em maior confiabilidade na cadeia produtiva do $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$.

Os trabalhadores que operam o Sistema de Carga e Descarga do porta-alvo de $^{18}\text{F}^-$ tiveram sua exposição rotineira à radiação reduzida devido não necessitarem mais de confirmação visual do posicionamento da válvula.

Mais estudos podem ser feitos para determinar os danos de radiação em componentes eletrônicos. Tais estudos poderiam utilizar somente a irradiação dos componentes por radiação gama ou por nêutrons separadamente e com o controle da dose através de dosimetria, o que não foi o escopo deste trabalho. O desenvolvimento de porta-alvos para a produção de $^{18}\text{F}^-$ passa pelo estudo de materiais que depositem um número menor de contaminantes na água irradiada, e de sistemas de troca de calor mais eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AEA TECHNOLOGY *Series 4/3N Injector – Operating Manual*. United Kingdom, Oct. 1994.
2. ALVORD, C. W.; WILLIAMSON, A. C.; GRAVES, T. L.; ZIGLER, S. S. Design, test and widespread implementation of a compact kilo-Watt fluoride ion target. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 241, p. 708-712, 2005.
3. ANGERT, N. Ion sources. In: CERN ACCELERATOR SCHOOL - CAS - GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE, FIFTH (VOL I AND II), Sept. 7-18, 1992, University of Jyväskylä, Finland. *Proceedings...* Geneva: Turner, S. (Ed.), 1994.
4. AVILA-RODRIGUES, M. A.; WILSON, J. S.; MCQUERRIE, S. A. A quantitative and comparative study of radionuclidic and chemical impurities in water samples irradiated in a niobium target with Havar vs. Niobium-sputtered Havar entrance foils. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008. Disponível em: <doi:10.1016/j.apradiso.2008.04.016>. Acesso em: 4 Ago. 2008.
5. BEECKMAN, W.; JONGEN, Y.; LAISNÉ, A.; LANNOYE, G. Preliminary design of a reduced cost proton therapy facility using a compact, high field isochronous cyclotron. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 56/57 p. 1201-1204, 1991.
6. BERRIDGE, M. S.; KJELLSTROM, R. Designs and use of silver [^{18}O]water targets for [^{18}F]fluoride production. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 50, p. 699-705, 1999.
7. BERRIDGE, M. S.; VOELKER, K. W.; BENNINGTON, B. High-yield, low-pressure [^{18}O] water targets of titanium and niobium for F-18 production on MC-17 cyclotrons. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 57, p. 303-308, 2002.
8. BOL, J.L.; CHEVALEIR, A.; CONARD, E.; JONGEN, Y.; LADEUZE, M.; LANNOYE, G.; LEDOCTE, T.; LACROIX, M.; NINAME, A.; RIJCKEWAERT, G.; ZAREMBA, S. High Intensity H Cyclotrons For Radioisotope Production. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYCLOTRONS AND THEIR APPLICATIONS, 12th, May 8-12, 1989, Berlin-Germany. *Proceedings...* Germany: B. Matin, K. Ziegler, p.149-151, 1991.

9. BRASIL. [CONSTITUIÇÃO (1988)] **Constituição da República Federativa do Brasil: texto consolidado até a Emenda Constitucional nº 56 de dezembro de 2007**. Brasília: Senado Federal, Secretaria Especial de Editoração e Publicação, 2007. Disponível em:
<<http://www.senado.gov.br/sf/legislacao/const/>>. Acesso em: 16 Jun. 2008.
10. BRYANT, P. J. A brief history and review of accelerators. In: CERN ACCELERATOR SCHOOL - CAS - GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE, FIFTH (VOL I AND II), Sept. 7-18, 1992, University of Jyväskylä, Finland. **Proceedings...** Geneva: Turner, S. (Ed.), 1994.
11. CONARD, E.; ABS, M.; DOM, C.; HARDY, L.; JONGEN, Y.; LADEUZE, M.; LAYCOCK, S.; VANDERLINDEN, T. Current status and future of cyclotron development at IBA. EPAC. Nice, 1990. Disponível em:
<http://cern.ch/AccelConf/e90/PDF/EPAC1990_0419.PDF>. Acesso em: 12 Ago. 2008.
12. FESTO PNEUMATIC **Operating Instructions Pneumatic rotary drive type DSR-...-P**. 2008. Disponível em:
<http://catalog.festo.com/data/CAT_PDF/055/DSR_PT.pdf>. Acesso em: 8 Set. 2008.
13. GARDINI, G.; LIMA, N. P. **Dicionário de Eletrônica Inglês Português**. Brasil: Hemus Editora Ltda., 1982.
14. GULLEY, M. S.; KEATING, P. B.; BRYANT, H. C.; MACKERROW, E. P.; MILLER, W. A.; RISLOVE, D. C.; COHEN, S.; DONAHUE, J. B.; FITZGERALD, D. H.; FRANKLE, S. C.; FUNK, D. J.; HUTSON, R. L.; MACEK, R. J.; PLUM, M. A.; STANCIU, N. G.; VAN DYCK, O. B.; WILKINSON, C. A. Measurement of H⁻, H⁰ and H⁺ yields produced by foil stripping of 800-MeV H⁻ ions. **Physical Review A**, v. 53, n. 5, p. 3201-3210, May 1996.
15. HEIKKINEN, P. Cyclotrons. In: CERN ACCELERATOR SCHOOL - CAS - GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE, FIFTH (VOL I AND II), Sept. 7-18, 1992, University of Jyväskylä, Finland. **Proceedings...** Geneva: Turner, S. (Ed.), 1994.
16. HESS, E.; TAKÁCS, S.; SCHOLTEN, B.; TÁRKÁNYI, F.; COENEN, H. H.; QAIM, S. M. Excitation function of the ¹⁸O(p,n)¹⁸F nuclear reaction from threshold up to 30 MeV. **Radiochimica Acta**, v. 89, p. 357-362, 2001.
17. HUR, M.; JUNG, I.; CHANG, H.; YANG, S.; CHAI, J.; OH, H. Study of proton beam irradiated H₂¹⁸O water target. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, v. 241, p. 735-737, 2005.

18. ION BEAM APPLICATIONS ***Cyclone 30 Operations Manual***. Belgium, May, 1995.
19. ION BEAM APPLICATIONS ***Cyclone 30 Technical Information***. Belgium, Sept. 21, 1994.
20. ION BEAM APPLICATIONS ***Low Level RF Rack Manual***. Belgium, Oct. 7, 2005.
21. ION BEAM APPLICATIONS ***StandAlone Fluid Target System – User Guide***. Belgium, Mar., 2004.
22. INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES ***Informe Anual 2006***. São Paulo, Brasil, Dez., 2007.
23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY ***Directory of Cyclotrons used for Radionuclide Production in Member States IAEA***. Vienna, 2006. Disponível em: < <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/dcrp2006-cd/PDF/DCRP.pdf>>. Acesso em: 27 Jun. 2008.
24. ITO, S.; SAKANE, H.; DEJI, S.; SAZE, T.; NISHIZAWA, K. Radioactive byproducts in [¹⁸O]H₂O used to produce ¹⁸F for [¹⁸F]FDG synthesis. ***Applied Radiation and Isotopes***, v. 64, p. 298-305, 2006.
25. JOHNSON, R. R.; WATT, R.; KOVAC, B.; ZYUZIN, A.; VAN LIER, E.; ERDMAN, K. L.; GYLES, W.; SABAUDUC, V.; MACQUERRIE, S. A.; WILSON, J.; BLACKHOUSE, C.; GELBART, W.; KUO, T. Advances in intense beams, beam delivery, targetry, and radiochemistry at advanced cyclotrons systems. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B***, v. 261, p. 803-808, 2007.
26. KILBOURN, M. R.; HOOD, J. T.; WELCH, M. J. A simple ¹⁸O water target for ¹⁸F production. ***Int. J. Appl. Radiat. Isot.***, v. 35, n. 7, p. 599-602, 1984.
27. KILBOURN, M. R.; JERABEK, P. A.; WELCH, M. J. An improved [¹⁸O]water target for [¹⁸F]fluoride production. ***Int. J. Appl. Radiat. Isot.*** v. 36, n. 4, p. 327-328, 1985.
28. KLEEVEN, W.; LUCAS, S.; DELVAUX, J.; SWOBODA, F.; ZAREMBA, S.; BEECKMAN, W.; VANDEPLASSCHE, D.; ABS, M.; JONGEN, Y. The IBA self-extracting cyclotron project. ***Nukleonika***, n. 48, p. S59-S67, 2003. Supplement 2.
29. LIVINGOOD, J. J. ***Principles of cyclic particle accelerators***. Princeton, N.J.: D. Van Nostrand Company, Inc., 1961.

30. LIU, Y.; SHEU, R.; CHANG, J.; YIN, K.; JIANG, S. A study on the [^{18}F]FDG production of the MINTraceTM cyclotron in Shin Kong Memorial Hospital. ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A***, v. 562, p. 1064-1067, 2006.
31. MARENGO, M.; LODI, F.; MAGI, S.; CICORIA, G.; PANCALDI, D.; BOSCHI, S. Assessment of radionuclidic impurities in 2- [^{18}F]fluoro-2-deoxy-D-glucose ([^{18}F]FDG) routine production. ***Applied Radiation and Isotopes***, v. 66, p. 295-302, 2008.
32. NYE, J. A.; AVILA-RODRIGUEZ, M. A.; NICKLES, R. J. A grid mounted niobium body target for the production of reactive [^{18}F]fluoride. ***Applied Radiation and Isotopes***, v. 64, p. 536-539, 2006.
33. OKW ELETRONICS. Disponível em:
<http://www.okwelectronics.com/products/camden/switches/V4_switches.htm>. Acesso em: 10 Jun. 2008.
34. PUGLISI, M. Conventional RF System Design. In: CERN ACCELERATOR SCHOOL - CAS - GENERAL ACCELERATOR PHYSICS COURSE, FIFTH (VOL I AND II), Sept. 7-18, 1992, University of Jyväskylä, Finland. ***Proceedings...*** Geneva: Turner, S. (Ed.), 1994.
35. REED SWITCH DEVELOPMENT CORP. Disponível em:
<<http://www.reedswitchdevelopments.com/2230series.html>>. Acesso em: 10 Jun. 2008.
36. S5/S7 for Windows, version 4.x for Windows 95/98 or NT 4.0. IBH softec, 2000.
37. SENSE SENSORES E INSTRUMENTOS ***Manual de Instruções Linha Compacta – C. Contínua***. 2006. Disponível em:
<http://www.sense.com.br/idiomas/pt_BR//arquivos/produtos/arq2/31702006F.pdf>. Acesso em: 9 Jun. 2008.
38. WILSON, J. S.; AVILA-RODRIGUEZ, M. A.; JOHNSON, R. R.; ZYUZIN, A.; MCQUARRIE, S. A. Niobium sputtered Havar foils for the high-power production of reactive [^{18}F]fluoride by proton irradiation of [^{18}O]H₂O targets. ***Applied Radiation and Isotopes***, v. 66, p. 565-570, 2008.

39. ZAREMBA, S.; ABS, M.; CONARD, E.; HARDY, L.; JONGEN, Y.; LADEUZE, M. Beam dynamics in newly designed cyclotrons at Ion Beam Applications. EPAC. Nice, 1990. Disponível em:
<http://cern.ch/AccelConf/e90/PDF/EPAC1990_1774.PDF>. Acesso em: 12 Ago. 2008.