



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**MONITORAÇÃO DO FEIXE EXTERNO DO CÍCLOTRON
CYCLONE 30 DO IPEN-CNEN/SP**

HYLTON MATSUDA

**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
2002**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MONITORAÇÃO DO FEIXE EXTERNO DO CÍCLOTRON
CYCLONE 30 DO IPEN-CNEN/SP**

HYLTON MATSUDA



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
2002

A Margareth, minha esposa.

Agradecimentos

Aos meus pais e irmãos pelo incentivo.

Ao Dr. Valdir Sciani pelo incentivo, discussão e orientação.

A Margareth por toda dedicação, paciência e amor.

Ao André Luiz Lapolli pela elaboração dos desenhos no “Autocad”.

Ao Luiz Carlos do Amaral Sumiya pelas sugestões e críticas.

Ao Wanderley de Lima pela confiança depositada.

Ao Osvaldo, Tarcísio, Mauro, Zanchetta e Sandra pela amizade e apoio.

À Comissão de Pós-Graduação do IPEN pela paciência.

Aos funcionários da biblioteca do IPEN na busca das referências.

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

À FAPESP pelo suporte financeiro.

A todas as pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

MONITORAÇÃO DO FEIXE EXTERNO DO CÍCLOTRON CYCLONE 30 DO IPEN-CNEN/SP

Hylton Matsuda

Resumo

Devido à crescente demanda por radioisótopos de cíclotron e ao alto custo dos equipamentos e materiais envolvidos no processo, torna-se evidente a importância da monitoração do feixe externo do cíclotron. Dessa forma, o feixe do cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP foi caracterizado através da avaliação da intensidade de corrente, perfil (posição, foco, geometria), alinhamento e homogeneidade, pela leitura das correntes de feixe, temperaturas e pressão nos sistemas de irradiação. Para tal, técnicas e dispositivos convencionais de detecção de feixe, termopares e sensores de pressão associados à eletrônica de instrumentação e a tecnologia e flexibilidade dos microcontroladores permitiram observar o comportamento do feixe durante as irradiações, em tempo real. Também foi calculada a energia do feixe de íons utilizando a técnica de análise por ativação, com reações monitoras em ^{nat}Cu . Os sistemas de monitoramento de feixe em muito têm contribuído na prevenção de danos materiais e já fazem parte das irradiações rotineiras, trazendo vantagens significativas no processo de otimização do feixe do Cyclone 30.

EXTERNAL BEAM MONITORING OF THE CYCLONE 30 CYCLOTRON OF IPEN-CNEN/SP

Hylton Matsuda

ABSTRACT

Due to the increasing demand for cyclotron radioisotopes and the high cost of equipment and materials involved in the process, it becomes evident the importance of external beam monitoring of the cyclotron. In this way, the beam of the Cyclone 30 cyclotron of IPEN-CNEN/SP was characterized throughout the evaluation of its current intensity, profile (position, focus and geometry), alignment and homogeneity, by measuring currents, temperatures and pressures of irradiation systems. For this purpose, techniques and conventional devices, thermocouples and pressure sensors associated to electronic of instrumentation, and technology and flexibility of microcontrollers allowed observing the beam behavior during irradiations in real time. The ion beam energy was also evaluated using activation analysis technique of monitor reactions in ^{nat}Cu . The beam monitoring systems have been contributing to prevent material damages and they have already been used in routine irradiations, bringing important advantages in the process of beam optimization of the Cyclone 30.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Importância da caracterização do feixe de íons do cíclotron	4
1.3 Objetivos e aspectos relevantes do trabalho	6
2. Fundamentos teóricos	8
2.1 Cíclotrons e cíclotrons isócronos	8
2.2 Sistemas de porta-alvo para cíclotrons	11
2.2.1 Sistema para irradiação de alvos sólidos	12
2.2.2 Sistema para irradiação de alvos líquidos	14
2.2.3 Sistema para irradiação de alvos gasosos	15
2.3 Técnicas de diagnóstico de feixe	16
2.4 Instrumentação	21
2.4.1 Amplificadores operacionais	21
2.4.2 Microcontroladores	24
2.4.3 Conversores analógicos-digitais	26
2.4.4 Comunicação serial	27
3. Revisão da literatura	30
4. Materiais e métodos	33
4.1 Cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP	33
4.2 Sistemas de irradiação	39
4.3 Monitoração do feixe – parte experimental	40
4.3.1 Perfil e alinhamento de feixe	41
4.3.2 Homogeneidade do feixe	47
4.3.3 Energia do feixe	52
4.3.4 Instrumentação	54
4.3.4.1 Condicionamento de sinais	55
4.3.4.2 Microcontroladores PIC	59
4.3.4.3 Conversão analógico-digital	61

4.3.4.4	Comunicação serial	62
4.3.4.5	Confecção dos circuitos impressos.....	65
4.3.4.6	<i>Software</i>	67
5.	Resultados e discussão	70
5.1	Sistemas de perfil e alinhamento do feixe.....	70
5.2	Avaliação da homogeneidade do feixe do cíclotron CV-28.....	76
5.3	Avaliação da homogeneidade do feixe do cíclotron Cyclone 30	77
5.4	Energia do feixe de prótons do cíclotron Cyclone 30.....	80
6.	Conclusões.....	83
	Apêndice 1	85
	Apêndice 2	93
	Referências Bibliográficas.....	105

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Considerações gerais

Fisicamente, um feixe é um fluxo de partículas. Assim sendo, todo feixe tem como origem uma fonte de partículas. Um exemplo simples é um fio aquecido, tal como o filamento de uma lâmpada incandescente. O mesmo acontece nos cinescópios de aparelhos de televisão, onde elétrons são emitidos por um filamento aquecido e acelerados no vácuo em direção e através de um eletrodo carregado positivamente. Os feixes de elétrons, ao incidirem numa tela fosforescente, formam pontos brilhantes e, por meio de campos eletromagnéticos variáveis (varreduras horizontal e vertical), reproduzem uma imagem. Este princípio também se aplica aos aceleradores de partículas, que consistem de uma fonte de partículas carregadas, bobinas magnéticas, eletrodos aceleradores e dispositivos de desvio e de condução de feixe, porém com energias de feixe maiores.

Em épocas remotas, os pioneiros na física nuclear e de partículas usavam fontes de ocorrências naturais para obter seus feixes de partículas. Rutherford descobriu o núcleo atômico e então desintegrou o núcleo de nitrogênio usando partículas α de isótopos radioativos naturais. Também, muitas das descobertas iniciais na física de partículas foram realizadas utilizando raios cósmicos. Entretanto, existem problemas com ambos os métodos. Nos isótopos radioativos naturais, há um limite superior de energia de ~ 10 MeV para partículas α , que é insuficiente para penetrar a forte barreira eletrostática ao redor de muitos núcleos atômicos. Por outro lado, alguns raios cósmicos têm energias maiores que qualquer feixe produzido por um acelerador atual (até 100 MeV), mas, além de serem de intensidades baixas, suas localizações e ocorrências nem sempre podem ser previstas, tornando inconveniente sua utilização para estudos

sistemáticos. Assim, o emprego de partículas aceleradas artificialmente seria uma solução ideal para tais pesquisas.

Os primeiros aceleradores de partículas, conhecidos como aceleradores lineares, foram construídos por volta de 1920. No caso, a energia das partículas aceleradas era proporcional ao comprimento do acelerador. Assim, na época, para alcançar as energias que os físicos precisavam, concluíram que seria necessária a construção de aceleradores extremamente longos.

Na tentativa de solucionar tal problema, começaram a surgir os aceleradores de partículas circulares. Em 1931, na Universidade da Califórnia, em Berkeley, o físico americano, Ernest O. Lawrence, e seu estudante, M. Stanley Livingston construíram o primeiro acelerador de partículas circular, o ciclotron. Era capaz de acelerar partículas, como prótons e dêuterons até altas energias, usadas em experiências de bombardeamento de núcleos atômicos.

Nos ciclotrons, bobinas eletromagnéticas potentes mantêm as partículas movendo em círculo, enquanto que os campos elétricos fornecem a energia de aceleração das partículas a cada volta. Neste grupo dos aceleradores circulares, incluem-se também o Bétatron, o Síncrotron, entre outros, onde a partícula não mais descreve uma trajetória linear, mas sim, uma trajetória circular.

Como o ciclotron é uma máquina que foi criada com a finalidade de acelerar diversas partículas com uma determinada energia, que são extraídas e conduzidas para as linhas de feixe até o alvo específico, muitas vezes é essencial conhecer as propriedades físicas e o comportamento desse feixe, seja para o perfeito funcionamento da própria máquina, seja para alguma aplicação específica.

Com o decorrer do tempo, além das pesquisas fundamentais no campo da física nuclear e de partículas, os ciclotrons passaram a ser utilizados em diversas áreas, tais como, estudo de materiais e de reações nucleares, aplicações industriais, terapia com feixes de nêutrons e prótons no tratamento contra câncer, produção de radioisótopos para uso em diagnósticos médicos, etc.

No Centro de Aceleradores Cíclotrons (CAC) do IPEN-CNEN/SP estão instalados dois cíclotrons. O primeiro, o cíclotron modelo CV-28, fabricado pela The Cyclotron Corporation – USA, é do tipo isócrona, de energia variável e pode acelerar prótons, dêuterons, $^3\text{He}^{++}$ e partículas α , com energias máximas de 24, 14, 36 e 28 MeV, respectivamente ⁽¹⁾. Durante alguns anos este cíclotron teve como prioridade a produção de radioisótopos, que eram incorporados aos fármacos para uso na medicina nuclear em diagnósticos. Irradiações com prótons de 24 MeV de energia em alvos de ^{68}Zn e $^{124}\text{TeO}_2$ e prótons de 14 MeV de energia em alvos de H_2^{18}O foram realizadas para a produção rotineira de ^{67}Ga , ^{123}I e ^{18}F , respectivamente. Paralelamente, em menor escala, irradiações para pesquisas também foram realizadas, a maioria no campo de radioisótopos para a área médica, a saber:

- Irradiação de $^{\text{nat}}\text{Cd}$ para a produção de ^{111}In ;
- Irradiação de $^{\text{nat}}\text{Sn}$ para a produção de $^{117\text{m}}\text{Sn}$;
- Irradiação de $^{\text{nat}}\text{Ni}$ para a produção de ^{57}Co ;
- Estudo de desgaste em aço inoxidável;
- Estudo de reações nucleares.

Visando a produção rotineira dos radioisótopos mais usados em diagnósticos médicos produzidos em cíclotrons ⁽²⁾, ^{67}Ga , ^{111}In , ^{201}Tl , ^{18}F , ^{123}I , um segundo cíclotron foi adquirido, o Cyclone 30, da Ion Beam Applications – Bélgica. Trata-se de um acelerador de íons negativos, específico para a produção de radioisótopos, capaz de gerar feixes de prótons com energias de até 30 MeV e com correntes de feixe de até 350 μA ⁽³⁾. Atualmente as produções de ^{123}I e ^{18}F estão sendo realizadas com este novo cíclotron. Dessa forma, o antigo modelo CV-28 está sendo utilizado apenas para pesquisas em geral. Na Figura 1 pode ser vista uma planta do prédio (CAC), onde estão instalados os dois cíclotrons.

Percebe-se, então, que a gama de aplicações dos cíclotrons atuais, em particular os do IPEN, se estende desde pesquisas fundamentais em física até a produção comercial de radioisótopos para uso médico e industrial.

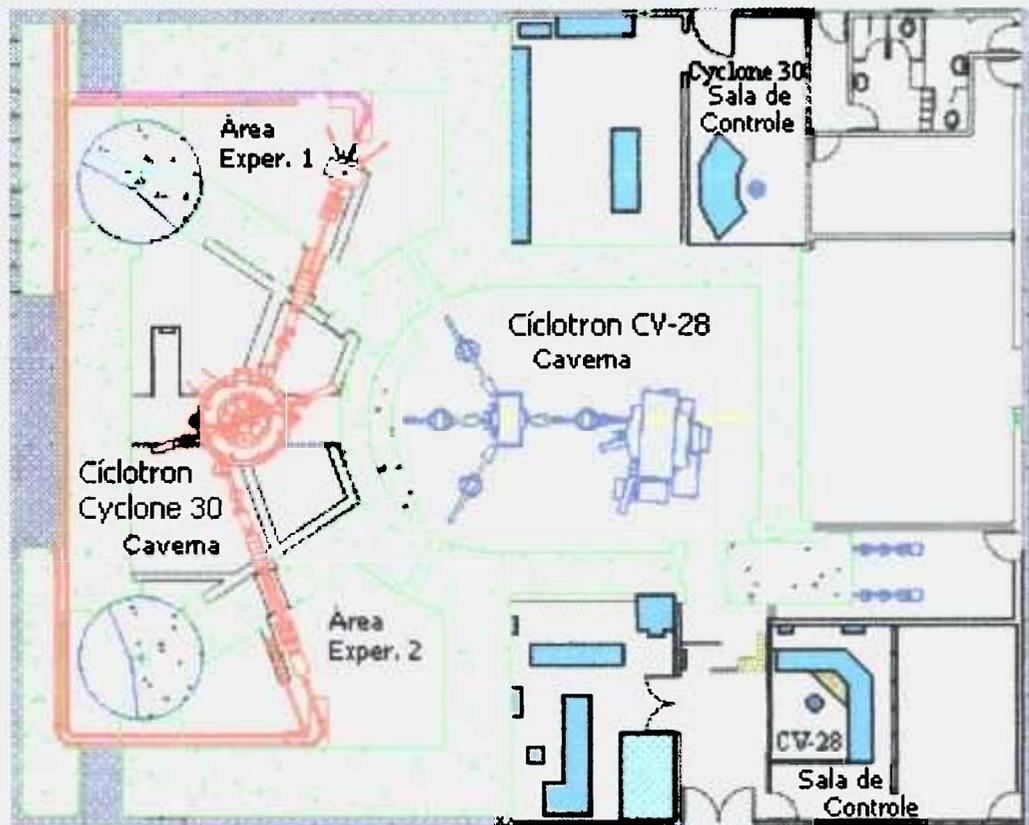


Figura 1 - Planta do prédio do Centro de Aceleradores Cíclotrons (CAC) e as localizações dos cíclotrons do IPEN-CNEN/SP

1.2 Importância da caracterização do feixe de íons do cíclotron

Em se tratando de suas aplicações, não somente para os cíclotrons, mas também para qualquer acelerador de partículas carregadas, torna-se evidente e de vital importância caracterizar o feixe extraído, ou seja, verificar suas propriedades físicas e analisar o seu comportamento no acelerador e principalmente, no alvo, visando obter um controle maior sobre os parâmetros de irradiação. Baseado nessas informações, também são projetados os dispositivos para irradiação de materiais (porta-alvos) para uma aplicação específica.

Nas irradiações com cíclotrons para a produção de radioisótopos são desejáveis correntes de feixe com intensidades máximas tecnicamente possíveis,

sejam elas a máxima disponível no ciclotron ou a máxima suportada pelo alvo. Portanto, a produção de radioisótopos em ciclotrons pode ser significativamente afetada pela homogeneidade do feixe durante as irradiações dos alvos, pois a densidade de potência efetiva gerada pelo mesmo é muito alta. Como exemplo, as irradiações realizadas com o ciclotron CV-28 do IPEN, com prótons de 24 MeV de energia e corrente de feixe de 30 μA geram uma potência de 720 W. Considerando o maior colimador de feixe (limitador de área irradiada) utilizado, com abertura de 10 mm de diâmetro, é gerada uma densidade de potência maior que 900 W/cm^2 , que deve ser dissipada com uma refrigeração adequada no alvo. No Cyclone 30 este fato é muito mais crítico: irradiações com prótons de 30 MeV de energia e 300 μA de corrente depositam no alvo uma potência de 9000 W.

Em feixes não homogêneos, a densidade de corrente média não corresponde à medida em diferentes pontos do alvo, resultando em regiões com correntes muito maiores que outras (pontos quentes). Assim, tal fato pode levar à volatilização do alvo e, conseqüentemente, à perda de massa do material-alvo, geralmente constituído de um material enriquecido, que possui um custo elevado. Além disso, existe a possibilidade de comprometer a integridade da máquina e, até mesmo, a segurança das pessoas.

O diagnóstico de feixe é um elemento essencial em qualquer acelerador de partículas (linear ou circular), tanto na monitoração do feixe durante a aceleração como também no seu transporte nas linhas de feixe primárias e secundárias até o alvo. Os sistemas de diagnóstico são nossos órgãos sensoriais que nos permitem perceber o comportamento do feixe. Sem um diagnóstico adequado do feixe, a tarefa de produzir e conduzir um feixe num acelerador de partículas seria como um "vão cego na escuridão", ou seja, simplesmente uma questão de pura sorte. Diante da situação, alguns aceleradores, no passado, têm omitido este fato, mas, como dizem, um acelerador é tão bom quanto é diagnosticado.

O diagnóstico de feixe é um campo bem vasto. Uma variedade de efeitos físicos é aproveitada, dando lugar à imaginação e às invenções. Dessa forma,

atualmente existem várias técnicas (diretas e indiretas) e uma vasta escolha de dispositivos de diagnósticos de feixe, cada tipo com muitas variantes.

Para descrever um grande número de dispositivos de diagnósticos existentes, a primeira tentativa seria estabelecer uma ordem sistemática. Primeiramente, poder-se-ia proceder de acordo com a propriedade física medida (intensidade, posição) ou classificar os dispositivos como eletromagnéticos, eletrostáticos, por emissão secundária, etc, ou como destrutivos e não destrutivos (interceptivos e não-interceptivos). Entretanto, nada disso tem muito sentido, pois muitos dispositivos podem medir mais que uma propriedade, aproveitando diferentes princípios físicos e, portanto, a distinção entre destrutivos e não destrutivos dependerá das circunstâncias ⁽⁴⁾.

1.3 Objetivos e aspectos relevantes do trabalho

Dependendo do material irradiado (sólido, líquido ou gás) e do porta-alvo utilizado (área irradiada, troca de calor, etc), as irradiações requerem uma característica de feixe diferente, principalmente, com relação à produção de radioisótopos de cíclotrons, atividade na qual o cíclotron Cyclone 30 do IPEN está enquadrado.

Neste contexto, o trabalho tem como objetivo caracterizar o feixe externo da linha de feixe 1.2 do cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP, através do desenvolvimento de sistemas de monitoração de feixe. Nesta linha de feixe está instalado um ímã desviador de feixe (distribuidor magnético) com cinco saídas de feixe. Atualmente, duas delas são destinadas à produção de ^{18}F e ^{123}I e outra para o condicionamento do cíclotron e treinamento de pessoal. As demais saídas não estão sendo utilizadas. No trabalho, é dada ênfase no monitoramento de parâmetros em tempo real que visam a obtenção de um feixe adequado numa amostra (material irradiado), cuja finalidade é produzir radioisótopos para medicina, no entanto, sem restringir-se a esse tipo de aplicação.

Devido ao comprometimento do Cyclone 30 com a produção de radioisótopos e manutenção preventiva-corretiva, a caracterização do feixe foi realizada durante as irradiações para as produções rotineiras de radioisótopos. Esta caracterização foi feita através da avaliação da intensidade de corrente, perfil (posição, foco, geometria), alinhamento e homogeneidade do feixe, pela leitura das correntes de feixe, temperaturas e pressão nos sistemas de irradiação. Também foi determinada a energia do feixe utilizando a técnica de análise por ativação, com reações monitoras em ^{nat}Cu . Dessa forma, este trabalho tem proporcionado a otimização e o controle sobre o feixe do ciclotron Cyclone 30, com maior segurança, auxiliando o operador nas irradiações, bem como uma análise do comportamento do feixe. No caso dos radioisótopos, tem possibilitado uma irradiação mais uniforme e, conseqüentemente, uma melhora significativa na qualidade do produto irradiado.

CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos

2.1 Ciclotrons e ciclotrons isócronos

Quando uma partícula carregada (carga q e massa m) em movimento uniforme penetra em um campo magnético de intensidade B , também uniforme, perpendicular à direção de seu movimento, as forças que atuam fazem com que a nova trajetória da partícula seja circular de raio r , conforme a expressão:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Em tal situação, a velocidade angular, dada por $\omega = \frac{qB}{m}$ não depende da velocidade da partícula.

O ciclotron^(1,5), no processo de acelerar uma partícula carregada, utiliza o fato da frequência de revolução ser constante para, em ressonância, aplicar uma tensão alternada que acelera a partícula, de uma forma que é melhor visualizada na Figura 2.

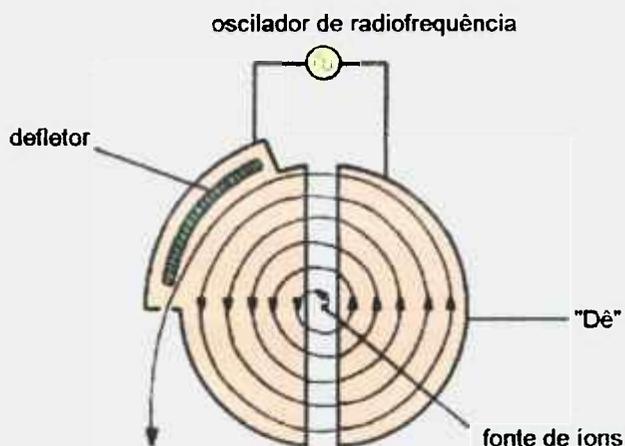


Figura 2 – Elementos principais de um ciclotron

O ciclotron é composto basicamente por dois eletrodos ocas e isolados, em forma de "D" ("dês"), situados em uma câmara de vácuo, no interior do campo magnético existente entre os pólos de um eletroímã. Uma tensão alternada de radiofrequência é aplicada a esses eletrodos. Se a frequência dessa tensão for igual a frequência de revolução da partícula (ressonância), essa é acelerada a cada travessia do espaço entre os "dês". A cada nova aceleração, a partícula torna-se mais energética e, em consequência, o raio da órbita circular que ela descreve no interior da câmara é maior, enquanto a frequência de revolução permanece constante. Dessa forma, os íons produzidos por uma fonte de íons no centro da câmara são acelerados, cuja trajetória não é um círculo, mas um certo número de semicírculos de raios cada vez maiores (espiral), conduzindo a partícula para fora do centro dos "dês", até o raio de extração. Vale lembrar que, no interior dos "dês" as partículas mantêm a trajetória circular devido o campo elétrico nulo.

Nos ciclos iniciais, o próprio campo elétrico existente entre os "dês" é suficiente para focalizar as partículas, ou seja, mantê-las no plano médio de aceleração no interior dos "dês". Com o aumento da energia, para que haja focalização axial, torna-se necessário diminuir o campo magnético à medida que se aumenta o raio da trajetória. Tal diminuição resulta em linhas de força levemente curvas (Figura 3). Mas, se por um lado a diminuição de B fornece focalização, por outro lado perde-se o isocronismo com o campo elétrico dos "dês", pois a diminuição de B faz com que ω também diminua.

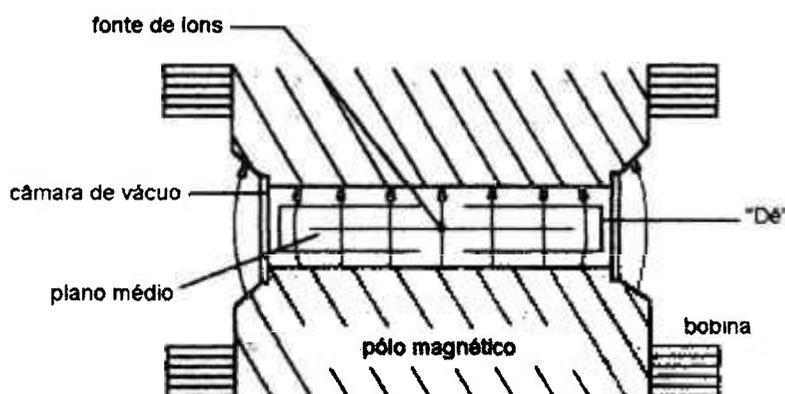


Figura 3 – Ciclotron convencional

O problema de isocronismo é ainda mais agravado pelo fato de ω depender inversamente da massa. Desde que se queira aumentar a energia da partícula além de certo limite, tem-se que considerar também o aumento relativístico da massa. Esse aumento diminui ainda mais a frequência de revolução e as partículas estarão completamente fora da ressonância necessária para aceleração. Por esse motivo, os ciclotrons convencionais eram limitados quanto a energia. O ciclotron clássico de maior energia construído foi o de Berkeley, de prótons de 22 MeV.

O problema da incompatibilidade entre isocronismo e focalização para altas energias foi resolvida por Thomas em 1938, que mostrou ser possível satisfazer a essas condições simultaneamente, com a introdução de setores polares entre os pólos principais do ciclotron, resultando em regiões de campo magnético forte e fraco, alternados, os chamados montes e vales (Figura 4a). Nesse caso, o campo magnético médio aumenta com o raio para compensar o aumento relativístico de massa, ao passo que a focalização axial é provida por um campo magnético variável azimuthalmente. Consequentemente, a órbita de equilíbrio das partículas não é mais um círculo, mas quadrangular, conforme a Figura 4b.

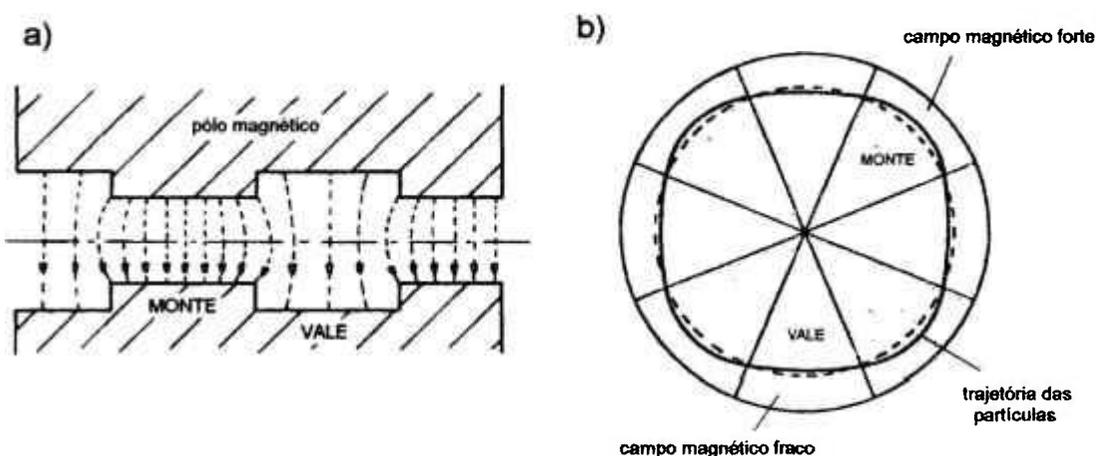


Figura 4 – a) Pólos de um ciclotron: campo magnético variável por setores
b) Trajetória das partículas em um ciclotron isócrono

Essa descoberta de Thomas originou os modernos cíclotrons de energia variável, também chamados de isócronos, de campo azimutalmente variável ou focalizado por setor.

Nos cíclotrons isócronos, a condição de isocronismo pode ser satisfeita para diferentes partículas e energias modificando o campo magnético médio por meio de bobinas circulares de ajuste, localizadas nas peças polares. Devido à essa flexibilidade, a maioria dos cíclotrons isócronos possui um sistema de radiofrequência - RF capaz de fornecer tensão alternada de frequência variável, ajustável às necessidades de acelerar diferentes partículas a diferentes energias.

2.2 Sistemas de porta-alvo para cíclotrons

Em termos gerais, um porta-alvo pode ser considerado como um dispositivo que, de alguma maneira, fixa fisicamente o material-alvo para ser irradiado.

O parâmetro principal que deve ser levado em consideração num projeto de porta-alvo é a capacidade para suportar altas correntes de feixe, e são construídos segundo as necessidades e o tipo de material que se deseja irradiar.

Basicamente, o porta-alvo é constituído por:

- Material-alvo (amostra: sólido, líquido ou gás);
- Folha separadora (janela) para isolar a câmara onde está o material alvo do vácuo do cíclotron;
- Sistema de refrigeração da janela e porta-alvo para assegurar a eficiência da dissipação do calor.

Os sistemas de porta-alvo para produção de radioisótopos de cíclotron podem ser divididos em três categorias, conforme o tipo de material-alvo a ser irradiado: alvos sólidos, líquidos e gasosos ⁽⁶⁾.

2.2.1 Sistema para irradiação de alvos sólidos

O alvo sólido pode ser irradiado com feixes internos e externos. Em cíclotrons de íons positivos, o sistema de alvo interno possibilita irradiações com correntes de feixe maiores que o feixe extraído nas linhas de feixe externo. Por outro lado, permite que o alvo somente seja bombardeado com energia fixa, uma vez que o alvo é posicionado tangencialmente às últimas órbitas de aceleração, antes que o feixe atinja o defletor eletrostático. O surgimento de novos cíclotrons de íons negativos permitiu a obtenção de correntes de feixe externo bem maiores (praticamente 100% de extração do feixe interno), com energia variável. Isto resultou no desuso de alvos internos, além do fato de que este pode comprometer internamente a integridade da máquina devido às presenças de altas tensões e vácuo no cíclotron.

O sistema de porta-alvo para irradiação com feixe externo é similar ao interno, sendo que este é posicionado no final das linhas de feixe externo. Além da segurança e praticidade na montagem e na monitoração dos parâmetros de feixe no alvo, permite que o feixe seja tanto trabalhado com lentes eletromagnéticas (bobinas de focalização e centralização de feixe) como degradado para energias menores quando não disponível no acelerador.

Os porta-alvos são construídos segundo as necessidades e tipo de material que se deseja irradiar. Porém, basicamente pode ser dividido em dois modelos principais: o sistema inclinado e o sistema frontal, sempre em relação à linha de incidência do feixe.

O sistema inclinado tem o material-alvo ou porta-alvo posicionado a um determinado ângulo, diferente de 90° , em relação ao feixe de partículas. Já o sistema frontal está posicionado a 90° em relação ao feixe. O sistema inclinado possui a vantagem de “aumentar” a área irradiada, resultando numa espessura do material menor e uma densidade de corrente menor, em função do aumento da área.

O material-alvo deve ter alta estabilidade, alto ponto de fusão e boa condutividade térmica na interface entre o mesmo e a placa-suporte. A avaliação da espessura do material-alvo a ser irradiado é feita utilizando-se tabelas que relacionam a penetração e o poder de frenamento em função da energia dos íons incidentes ⁽⁷⁾.

A Figura 5 é trata-se de um sistema de porta-alvo sólido frontal para linha de feixe externo.

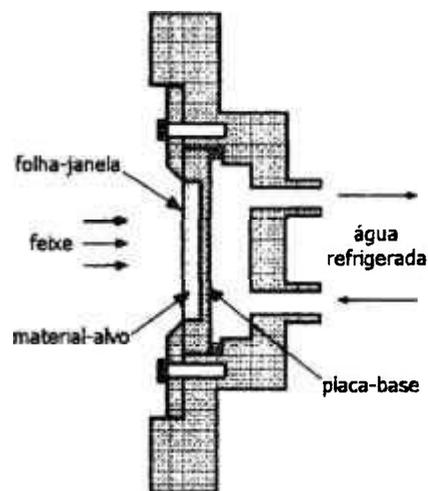


Figura 5 - Sistema de porta-alvo sólido

A placa-suporte, com o respectivo material-alvo, é inserida no porta-alvo, geralmente de alumínio e, quando necessário, é coberto com uma folha (tântalo, alumínio, cobre, etc). A espessura da folha dependerá da energia do feixe que será degradada. O alvo é refrigerado de modo a não haver nenhum contato direto da água de refrigeração com o material-alvo. Isso garante que a água não seja contaminada por qualquer tipo de radionuclídeo gerado durante a ativação. Como não há contato direto, a transferência de calor é feita por condução, como nos trocadores de calor convencionais. Os radioisótopos como ^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{111}In e ^{123}I são produzidos rotineiramente irradiando-se alvos sólidos isotopicamente enriquecidos ^{203}Tl , ^{68}Zn , ^{112}Cd e ^{124}Te , respectivamente.

2.2.2 Sistema para irradiação de alvos líquidos

Dois tipos de alvos líquidos podem ser utilizados para irradiação: estático (não circulante), no qual o material-alvo é confinado em uma cavidade, no corpo do porta-alvo, na posição de irradiação (câmara de irradiação). Na frente, para conter o líquido irradiado, existem duas folhas de Havar refrigeradas com gás He. No alvo circulante, o material-alvo (líquido) é bombeado durante a irradiação por um circuito fechado, que geralmente possui um trocador de calor. No sistema de alvo-líquido circulante, descrito por Sajjad *et al*⁽⁶⁾ (Figura 6), uma fina camada do material-alvo circula entre duas folhas (Ti) de ~50 µm. Na frente, a folha de Ti é refrigerada com gás He (-4°C), e a folha de trás, com água (7°C), através de uma cavidade presente no porta-alvo. Neste caso, as folhas de Ti são soldadas no próprio corpo do alvo, porém, normalmente é utilizado um *o-ring*.

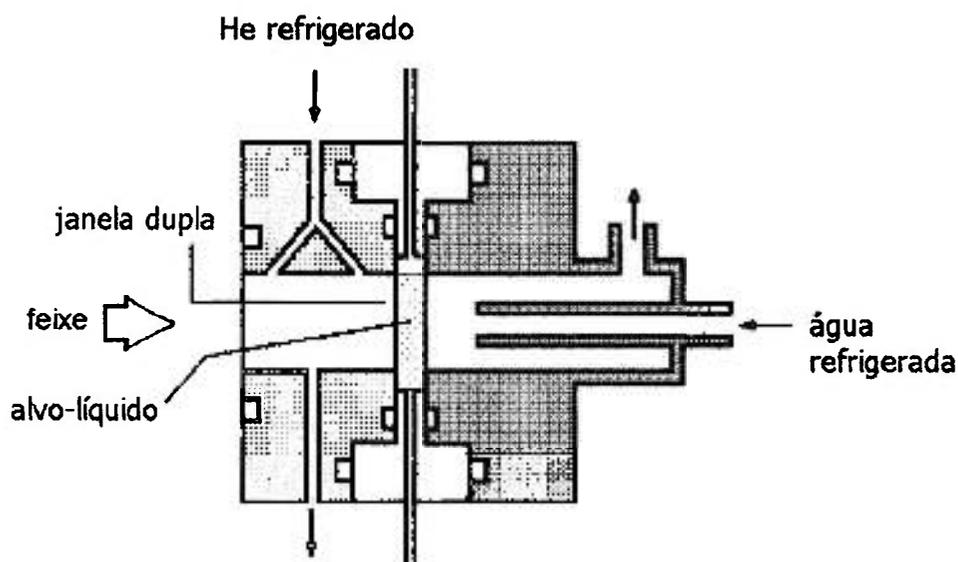


Figura 6 – Sistema de porta-alvo líquido

Um material líquido para ser utilizado como alvo deve apresentar as seguintes características: alto ponto de ebulição para suportar o calor gerado durante a irradiação, alta percentagem de átomos-alvo para aumentar o rendimento de produção, ser estável química e fisicamente. O ^{18}F e ^{13}N são dois

isótopos normalmente produzidos utilizando alvos líquidos a partir de reações $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ e $^{15}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$, respectivamente.

2.2.3 Sistema para irradiação de alvos gasosos

Os alvos gasosos são normalmente utilizados para a produção de ^{11}C , ^{15}O , ^{18}F , ^{81}Rb e ^{123}I . Um sistema de alvo gasoso típico pode ser visto na Figura 7.

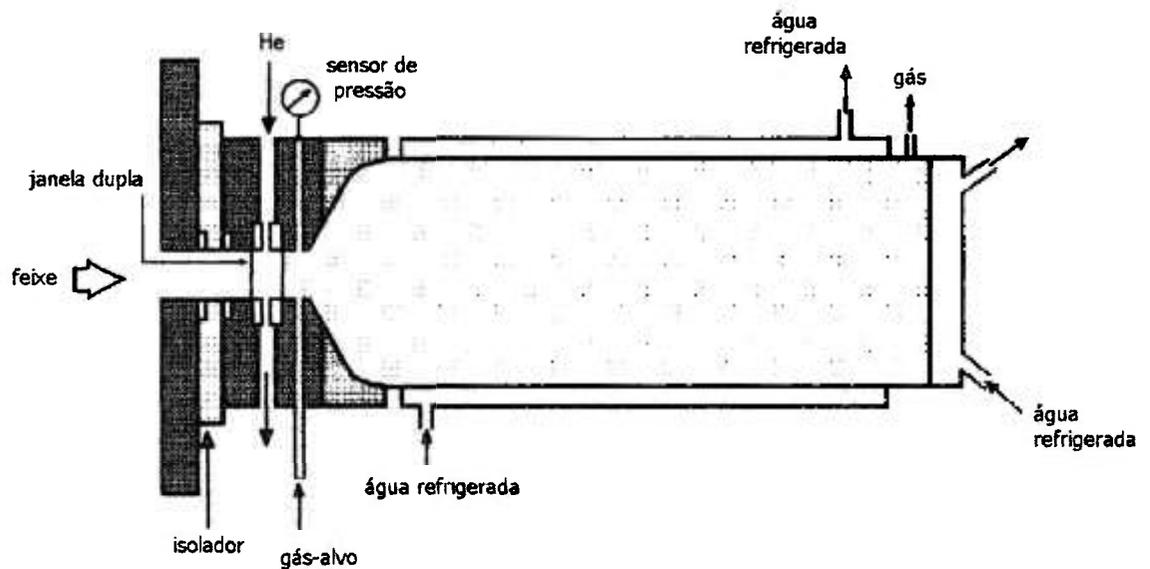


Figura 7 – Sistema de porta-alvo gasoso

Este porta-alvo consiste de um colimador, uma janela dupla e um recipiente para acomodar o gás a ser irradiado (normalmente na forma cilíndrica ou cônica). O recipiente de gás-alvo é refrigerado com água e, as janelas são refrigeradas circulando gás hélio refrigerado. Para as janelas são utilizadas folhas de Ti, Mo, Al ou Havar.

2.3 Técnicas de diagnóstico de feixe

Normalmente, os parâmetros típicos relacionados com a caracterização de um feixe de íons de um acelerador de partículas são a intensidade e a distribuição da densidade de corrente, o perfil (posição, geometria e foco), a emitância (divergência angular) e, algumas vezes, a estrutura temporal do feixe (energia)⁽⁸⁾. Dessa forma, a grande quantidade de materiais, detectores e técnicas existentes atualmente têm contribuído no aumento de aparatos experimentais diferentes, seja em termos de simplicidade utilizando técnicas convencionais, porém aprimoradas, ou mesmo com relação ao desempenho e confiabilidade, utilizando técnicas sofisticadas.

Entretanto, muitos dispositivos podem medir mais que uma propriedade do feixe, aproveitando princípios físicos diferentes e, portanto, a escolha muitas vezes dependerá das circunstâncias envolvidas.

As técnicas de monitoração de feixe podem ser classificadas de acordo com a forma de obtenção dessas propriedades. As técnicas convencionais ou indiretas normalmente utilizam um determinado material sensível à incidência do feixe de íons e em seguida é analisado num equipamento apropriado⁽⁹⁾. São técnicas relativamente simples, porém, rudimentares, pois necessitam de um tempo de processamento relativamente longo e testes repetitivos, pelo fato das condições do feixe variarem completamente durante as irradiações.

Na determinação do perfil de feixe através de técnicas convencionais, alguns exemplos podem ser citados:

- **Método 1:** São utilizadas folhas de ativação, por exemplo, cobre ou alumínio, onde as atividades referentes de um determinado radioisótopo decorrente da incidência do feixe de íons são analisados num espectrômetro.
- **Método 2:** São utilizados materiais de estado sólido (plásticos e vidros). Uma partícula carregada ao incidir num material isolante danifica-o, deixando um

rastró. Em seguida estas trilhas latentes são aumentadas por um processo químico (*etching*) e então observadas num microscópio ótico.

- **Método 3:** O perfil de feixe também pode ser obtido colocando-se uma folha de ouro sob um feixe de íons, tornando-a radioativa. A folha então é colocada em contato direto com um filme de raio-X. O filme é revelado e escaneado com um densitômetro ótico.

Além dos métodos citados acima, existem muitos outros, desde variações das técnicas anteriores até métodos diferentes utilizando outros materiais.

Nestas técnicas, embora simples e confiáveis, as avaliações dos resultados podem ser problemáticas. Nestes casos, além de envolverem uma pequena dose de radiação ao manipular o dispositivo irradiado, devido à ativação dos seus componentes, requerem a substituição dos mesmos após cada ensaio, necessitando testes repetitivos e dificultando a avaliação dos resultados. Além disso, esta avaliação pode ser feita somente após a irradiação, ou seja, tornando possível uma ação corretiva somente após a análise destes resultados. Também, parte-se do pressuposto que, fixando-se os parâmetros operacionais do cíclotron conforme a irradiação teste, o perfil do feixe se manterá constante, o que nem sempre é verdadeiro.

Técnicas mais aprimoradas e complexas utilizam dispositivos detectores e circuitos eletrônicos para a obtenção direta dos parâmetros do feixe. O número de dispositivos detectores existentes atualmente para o diagnóstico do feixe é muito amplo e satisfaz qualquer espécie de necessidade. São baseados na emissão secundária de elétrons (fios, grades), na emissão de luz (tela, fibra, etc), na ionização de gás (residual, câmara), na indução de carga (*pick-ups*, transformadores, etc) e muitos outros. Normalmente, a limitação principal desses dispositivos é a baixa relação sinal/ruído. Devido a este fato, a eletrônica envolvida (cabos, conectores, contatos, componentes) deve apresentar baixo ruído eletrônico, baixo ruído eletromagnético (blindagem, aterramento), alto ganho de tensão (amplificação) e alta resistência aos efeitos da radiação ⁽⁸⁾.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de dispositivos detectores utilizados no diagnóstico de feixe dos aceleradores nucleares ⁽⁴⁾:

Faraday Cup: O seu funcionamento baseia-se na captura do feixe com uma simples placa coletora, induzindo, assim, uma corrente elétrica. Porém, o mesmo também sofre uma perturbação provocada através da emissão descontrolada de elétrons secundários. Para minimizar esta ocorrência, o coletor é inserido numa "caixa" com uma abertura para a entrada do feixe, sendo então aplicado um potencial negativo de algumas centenas de volts para conduzir os elétrons secundários de volta a superfície da placa. Os *faraday cups* são muito empregados para medir correntes de feixe de baixa energia, onde a condição de que a espessura da placa coletora deve ser maior que o poder de alcance das partículas do feixe pode facilmente ser satisfeita.

Monitores de Emissão Secundária (SEM): Os SEMs provavelmente são um dos dispositivos mais difundidos para diagnóstico de feixe. Esses dispositivos aproveitam do fenômeno de que sob o impacto das partículas de feixe, alguns elétrons do material são liberados da sua superfície (emissão de elétrons secundários), produzindo um fluxo de corrente elétrica proporcional à energia liberada. A emissão secundária de elétrons não depende somente do tipo de material, mas também das condições elétricas superficiais. Assim, para evitar que elétrons não arrancados inicialmente saturem a superfície do material, impedindo a sua emissão completa, um eletrodo de potencial positivo de algumas centenas de volts é colocado próximo ao coletor, para que os elétrons liberados sejam arrancados rapidamente da superfície do material. Fios, grades e folhas finas são normalmente usados nos SEMs para medir várias propriedades do feixe, principalmente para medir a distribuição espacial do feixe. A limitação principal é com relação ao seu uso em diagnóstico de feixe de baixa intensidade, devido à péssima relação sinal-ruído. É possível melhorar seu desempenho tomando cuidado especial na seleção do material e reduzindo o ruído eletrônico. Mesmo assim, é muito difícil melhorar a sua sensibilidade além de 10^7 pps.

Câmaras de ionização: Amplamente utilizadas como detectores de radiação, também têm muitas aplicações em diagnósticos de feixe em aceleradores de

partículas. Consiste de uma câmara de paredes finas, repleta de gás, com um eletrodo coletor em seu interior. O sinal é produzido pela perda de energia das partículas carregadas dentro do gás (ionização), produzindo pares carregados (íons), que migram para os eletrodos, induzindo uma corrente elétrica que pode ser medida. A amplitude da corrente elétrica depende da pressão do gás e do campo elétrico de coleta dos íons. A energia média para produzir um par é de aproximadamente 30 eV, dependendo do gás. A única condição em relação à intensidade do campo elétrico é que este deve ser suficientemente alto para evitar perdas de recombinações dos portadores de carga e suficientemente baixo para suprimir efeitos da multiplicação de cargas, tais como a emissão de campos e a ionização por impacto. As câmaras de ionização são muito usadas para medir intensidades de feixe muito baixas e como detectores de radiação. As características principais desse tipo de detector são: apresentam boa sensibilidade, versatilidade para configurações diferentes (formas e tamanhos) e praticamente imunes aos efeitos das radiações. Porém, além do preço relativamente alto, apresentam grande influência na medida causada pelas condições atmosféricas (umidade e temperatura). As câmaras de ionização permitem o desenvolvimento de uma variedade de configurações adaptadas para aplicações de diagnóstico de feixes. As variações mais interessantes para propósitos de diagnóstico de feixe são as câmaras de fio e de micro-tiras (*micro-strips*). Ambas foram desenvolvidas para melhorar a sensibilidade das câmaras de ionização. Uma avalanche de elétrons, devido à alta intensidade do campo elétrico próximo ao anodo, favorece a amplificação do sinal produzido pela ionização primária. As vantagens principais dessas configurações são a sensibilidade e a resolução espacial. Os dois foram desenvolvidos para medir o perfil de feixe e identificação de partículas.

Telas Cintiladoras: Os materiais cintiladores também são bem conhecidos e usados para aplicações de diagnóstico de feixes. Durante a interação da radiação ionizante com o material cintilador, alguns átomos e moléculas são excitados para níveis altos de energia e conseqüentemente emitem luz durante a de-excitação. Esta emissão de luz é diferente para diversos tipos de materiais cintiladores e a quantidade de luz produzida por unidade de energia absorvida no cintilador depende geralmente do tipo e da energia da partícula incidente. Atualmente, com

o progresso contínuo da tecnologia para produzi-los, existe uma variedade de materiais utilizados como cintiladores seja na forma de gás, líquido ou sólido, orgânicos e inorgânicos, apenas variando com relação à sensibilidade e tempo de resposta devido à radiação incidente. Assim, uma questão importante é relativa à escolha do material. Alguns critérios para a sua seleção são: a energia média para produzir o fóton, a constante do tempo de decaimento, o comprimento de onda do fóton, o índice de refração do material, a eficiência de coleta do fóton, a imunidade aos efeitos da radiação, etc. Para que a luz produzida pelo material cintilador possa ser convertida num sinal elétrico é necessário acoplá-la a um detector de luz. Alguns detectores disponíveis dentro de uma longa lista, dependendo da aplicação, são tubos fotomultiplicadores, fotodiodos (comuns, híbridos, avalanche) e câmeras CCD (*Charge Coupled Device*). A perda de luz entre o cintilador e o dispositivo detector de luz é minimizada pelo uso de refletores adaptados e, além disso, deve-se tomar precauções para a obtenção de um contacto ótico efetivo entre o cintilador e a janela do dispositivo detector de luz. A ampla variedade de materiais cintiladores e detectores de luz existentes permitem desenvolver vários aparatos adaptados para diagnósticos de feixes de baixa intensidade. São muito utilizados para a monitoração do perfil e da estrutura temporal do feixe. As limitações destes detectores é que são frágeis, caros e apresentam problemas relacionados com a entrada de luz não gerada pela radiação.

Dessa forma, seria extremamente difícil e dispendioso tentar descrever nesse trabalho cada técnica e dispositivo detector existente atualmente para o diagnóstico de feixe. Na Tabela 1 estão descritos aspectos dos principais dispositivos utilizados em diagnóstico de feixe em aceleradores.

Tabela 1 – Dispositivos de diagnóstico de feixe e propriedades físicas medidas

Propriedade Medida	Intensidade I, Q	Transv.			Long.		Energia	Efeito no feixe			
		Posição	Tamanho/Forma	Emitância	Tamanho/Forma	Emitância		nenhum	insignificante	significante	destrutivo
Transformadores de feixe	●				●	●	●	●			
Monitores de corrente-parede	●	●			●	●	●	●			
<i>Pick-ups</i>	●	●	●		●	●	●	●			
<i>Faraday cup</i>	●						●				●
Monitores de emissão secundária	●	●	●	●			●		●	●	
<i>Scanners</i> de fio		●	●	●			●		●		
Câmaras de fio		●	●						●	●	
Câmaras de ionização	●								●	●	
Monitores de gás residual		●	●	●				●			
Telas cintiladoras		●	●						●	●	●

2.4 Instrumentação

2.4.1 Amplificadores operacionais

A necessidade da leitura de pequenos sinais analógicos (provenientes de sensores e transdutores) é muito comum no meio industrial. Temperatura, umidade e pressão são apenas alguns dos fatores que influenciam o funcionamento de uma máquina. Por outro lado, com apenas um pequeno amplificador operacional é possível monitorar essas grandezas, além de gerar sinais de controle de forma simples, eficiente e econômico. O amplificador operacional, inicialmente desenvolvido para executar operações matemáticas (daí

o seu nome "operacional"), atualmente, tornou-se um dos principais componentes para tratamento de sinais analógicos.

O constante desenvolvimento tecnológico no campo da microeletrônica permitiu o desenvolvimento de amplificadores operacionais contendo em um mesmo *chip* monolítico a tecnologia MOSFET (transistor de efeito de campo com semicondutor óxido-metálico) e a Bipolar. Com isto, obtém-se características como alta impedância de entrada e pequena corrente de polarização oferecida pelos transistores MOSFET na entrada diferencial do operacional, aliada à vantagem de alta tensão e corrente dos transistores bipolares na saída.

Dessa forma, o amplificador operacional pode ser utilizado em várias configurações ⁽¹⁰⁾, conforme sua aplicação, a saber:

Amplificador de tensão não-inversor: Trata-se de um amplificador cujo sinal de saída está em fase com a entrada e o ganho nunca pode ser menor que 1. Aplicando-se um sinal na entrada não inversora do operacional, a saída amplificada estará em fase com a entrada, cujo ganho A_v dessa configuração é dado por:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (1)$$

onde V_{in} , V_{out} , R_1 e R_2 são as tensões de entrada e saída e impedâncias de entrada e realimentação, respectivamente.

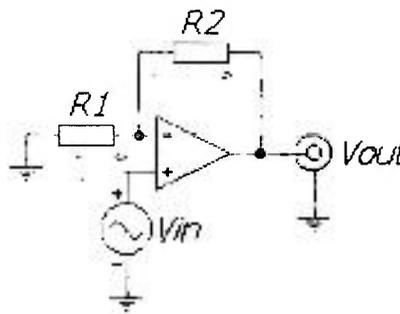


Figura 8 - Amplificador não-inversor

Amplificador de tensão inversor: Nessa configuração conforme a Figura 9, o ganho do amplificador é dado por:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

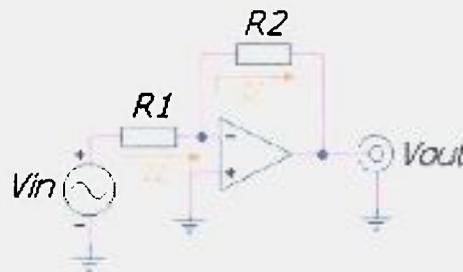


Figura 9 - Amplificador Inversor

O sinal negativo significa que há uma inversão de fase de 180° na saída em relação à entrada.

Amplificador de tensão diferencial: Também conhecido como amplificador de instrumentação, nesta configuração, o amplificador operacional amplifica apenas a diferença dos potenciais aplicados em cada entrada, eliminando qualquer sinal comum às duas entradas, por exemplo, um ruído (Figura 10).

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_3} \quad (3)$$

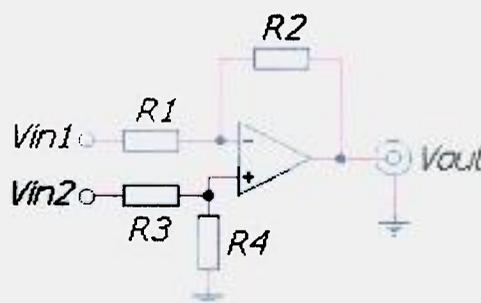


Figura 10 - Amplificador diferencial

O amplificador operacional para instrumentação com entrada diferencial é freqüentemente utilizado para amplificar pequenos sinais fornecidos por transdutores ("strain-gauges", termopares, etc), que convertem parâmetros físicos e suas variações em sinais elétricos. Um amplificador de instrumentação é otimizado para ter alta impedância de entrada e uma alta CMRR (Razão de Rejeição em Modo Comum).

Conversor de corrente-tensão: Trata-se de um amplificador com realimentação de tensão inversora, com impedâncias de entrada e saída iguais a zero e uma transresistência R constante (Figura 11). Neste caso uma corrente de entrada I_{IN} controla a tensão de saída V_{OUT} , dada pela expressão:

$$V_{OUT} = -I_{IN} \cdot R \quad (4)$$

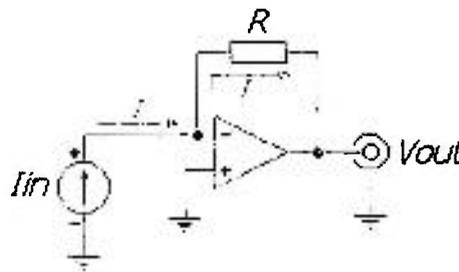


Figura 11 - Conversor de corrente-tensão

2.4.2 Microcontroladores

Basicamente, o microcontrolador^(11,12), anteriormente chamado de "microcomputador de um só chip", é um componente eletrônico com todos os recursos e periféricos dos microprocessadores comuns de computadores, embutidos em uma única pastilha de silício encapsulada (popularmente chamada de "CI" ou "CHIP").

Os microcontroladores possuem todos os componentes necessários ao controle do processo, ou seja, são providos internamente de memórias de

programa e de dados, portas de entrada e/ou saída paralela, temporizadores programáveis, contadores (oscilador interno), interfaces de comunicações serial e paralela, conversores analógico-digitais, etc. Assim, eles diferenciam-se dos microprocessadores por possuírem muitas das funções executadas por circuitos integrados auxiliares necessários nos projetos microprocessados, sendo esta uma das características fundamentais que diferencia os microcontroladores dos microprocessadores. Os últimos, apesar de possuírem uma ULA (Unidade Lógica e Aritmética) muito mais poderosa, ou seja, maior capacidade de processar informações, não possuem todos estes recursos em uma única pastilha.

Assim como nos microprocessadores de computadores, o desempenho dos microcontroladores está diretamente associado à ULA, pois é nessa unidade que todas as operações matemáticas e lógicas são executadas. A quantidade de funções desempenhadas pelos microcontroladores varia de modelo para modelo.

O microcontrolador é programável, pois toda a lógica de operação é estruturada na forma de um programa (seqüências de comandos básicos) e gravada dentro do componente. Dessa forma, toda vez que o microcontrolador for energizado, o programa interno será executado. Porém, para que isto aconteça é necessário um gerador de *clock*, o “coração” de qualquer dispositivo microprocessado, responsável pelo processamento interno dos dados digitais. Desde que suportado pelo microcontrolador, quanto maior a frequência de *clock*, mais rápido irá executar uma instrução.

Dessa forma, os microcontroladores têm sido utilizados em projetos de sistemas dedicados e facilitado o desenvolvimento de sistemas compactos e baratos, embora complexos e sofisticados. Praticamente, têm revolucionado o projeto de sistemas eletrônicos digitais, devido a sua enorme versatilidade de *hardware* e seu poderoso *software*.

É inegável a propagação comercial dos microcontroladores nos últimos anos. Atualmente, muitos equipamentos de nosso uso diário, tais como, eletrodomésticos, videocassetes, sistemas de alarmes, celulares, agendas eletrônicas, brinquedos, automóveis, entre outros, utilizam microcontroladores

para execução de suas funções básicas. Portanto, mesmo sem ter consciência, os microcontroladores já fazem parte da vida das pessoas há um bom tempo.

2.4.3 Conversores analógicos-digitais

A transformação de uma informação que se encontra na forma analógica como, por exemplo, a tensão ou corrente elétrica entregue por sensores, para a forma digital é fundamental em muitos projetos que envolvem instrumentação e controle. Placas de aquisição de dados utilizadas em instrumentação virtual, processadores digitais de sinais e microcontroladores são apenas alguns exemplos nos quais esta transformação é essencial.

A conversão de dados que se encontram na forma analógica para a forma digital, de modo que os circuitos processadores possam utilizá-los, é feita por um circuito denominado "conversor analógico-digital" ou, abreviadamente conversor A/D ou ainda ADC ⁽¹³⁾.

A maior parte dos dados obtidos de sensores comuns, tais como sensores de temperatura, intensidade luminosa, posição, pressão, etc, fornecem sinais analógicos, ou seja, uma tensão que é proporcional à grandeza medida e que varia de forma contínua numa faixa de valores. No entanto, a maioria dos equipamentos modernos que fazem a aquisição de dados destes sensores, que utilizam estes dados para controle de processos ou simplesmente para medição, trabalha com técnicas digitais. Isso significa que o sinal analógico, uma grandeza que varia de forma contínua numa faixa de valores, precisa ser convertido para a forma digital. Para fazer esta conversão os circuitos conversores A/D devem preencher certos requisitos importantes quanto ao seu desempenho:

Resolução: É a razão entre os valores extremos da escala de valores analógicos que devem ser convertidos para a forma digital e o número de degraus correspondentes ao número de *bits* utilizados na conversão. Assim, se na

conversão A/D forem utilizados 8 *bits* ($2^8 = 256$ “degraus”) para representar uma escala de valores analógicos, por exemplo, de 0 a 10 V, a resolução deste conversor será de pouco menos de 0,04 V/degrau. A resolução será melhor quanto mais *bits* forem utilizados pelo conversor. Tipos com 8 a 16 *bits* são comuns nas aplicações industriais e de medição.

Linearidade: Para um conversor ideal, a curva de conversão da grandeza analógica para a forma digital deve ser linear. Isso significa que, não existem desvios na correspondência entre o valor analógico e a saída digital ao longo da escala de valores que o conversor deve trabalhar. No entanto, na prática podem ocorrer pequenos desvios, isso quer dizer que, em determinadas faixas de valores, a conversão pode ser menos precisa.

Velocidade de amostragem: Está relacionada ao número de amostragens por segundo e o tempo necessário para converter um sinal analógico em digital. Se a frequência de um sinal analógico a ser convertido for alta, implicará na necessidade de se fazer várias amostragens num tempo extremamente curto.

No conversor A/D, a sequência de conversão de um sinal analógico em digital envolve os tempos de aquisição e conversão. O tempo de aquisição corresponde ao tempo necessário para a leitura do sinal analógico na entrada do conversor, enquanto que o tempo de conversão é o tempo necessário para transformar o sinal analógico após a aquisição em um sinal digital. A soma desses tempos resulta no tempo de amostragem de um conversor A/D.

2.4.4 Comunicação serial

A comunicação serial é a transmissão de bytes ou caracteres de *bit* em *bit*, um por vez na sequência^(12,14). Normalmente, este tipo de comunicação é recomendado para transmissões de dados a longa distância. Para facilitar a transmissão de dados entre equipamentos diferentes, é utilizado o código ASCII

(*American Standard Code for Interchange of Information*), que representa cada caracter como uma palavra binária de 8 *bits*.

Entre dispositivos eletrônicos num mesmo circuito, a comunicação serial usa níveis de tensão entre 0 e 5 V (TTL – lógica transistor-transistor). Para a transmissão de dados entre equipamentos distantes, a comunicação serial em níveis de tensão TTL pode apresentar problemas relacionados a ruídos. Em vista disso, o uso de outros padrões de tensões (por exemplo, o sistema RS-232, utiliza tensões de 30 V), veio a facilitar a transmissão de dados para grandes distâncias com poucas interferências.

A comunicação serial pode ser síncrona ou assíncrona: na primeira, os *bits* de dados são enviados a uma taxa fixa, onde o transmissor e o receptor trabalham em sincronismo. No caso, o sinal de sincronização é enviado separadamente, para que o *clock* interno do receptor tenha compatibilidade suficiente para receber os dados do transmissor. Também são enviados *bits* de confirmação de modo que o receptor confirme se recebeu ou não uma informação corretamente.

Na comunicação assíncrona não há necessidade de se gerar o sincronismo como no modo síncrono. No caso, além do fato de que cada caracter é transmitido individualmente, também são enviados sinais de temporização e controle. Os *bits* de dados são transmitidos entre *bits* de partida (*start-bit*) e *bits* de fim de transmissão (*stop-bit*). Esses *bits* são reconhecidos pela transição de níveis de tensão na linha de transmissão. O *start-bit* é reconhecido pela transição do nível alto presente na linha para o nível baixo, enquanto que o *stop-bit* é reconhecido pela transição do nível baixo para o nível alto. Se o último *bit*, referente ao dado, for para o nível alto, o sistema aguarda um novo *start-bit* para iniciar a recepção de um novo caracter.

Na comunicação serial opera-se com três sistemas de interligação digitais: *simplex*, *half-duplex* e *full-duplex*. No modo *simplex*, existe apenas um elemento que transmite e um outro que recebe os dados, ou seja, a comunicação é unidirecional. Este modo é muito utilizado em impressoras e terminais de dados

de bancos. Já no modo *half-duplex*, a comunicação é bidirecional, porém, não é possível transmitir e receber as informações ao mesmo tempo, de modo simultâneo, como nos *walk-talkies*. Por último, o modo *full-duplex* ou apenas *duplex*, é possível transmitir e receber dados simultaneamente.

Atualmente, existem vários padrões para comunicação serial (normas padronizadas para transmissão e recepção de dados), tais como o RS-232C, RS-485, etc, sendo o primeiro o mais utilizado atualmente, pois define todos os padrões (elétricos, mecânicos e de transmissão) a serem empregados numa comunicação de dados.

CAPÍTULO 3

Revisão da literatura

O diagnóstico de feixe de cíclotrons, em sistemas de irradiação para a produção de radioisótopos, é descrito em alguns trabalhos publicados em literatura. Alguns desses trabalhos são citados a seguir.

Hyman et al⁽¹⁵⁾, descreveram um método simples e seguro de medir o perfil de feixe de prótons. No caso, foi construída uma matriz (arranjo) constituída de 15 varetas de alumínio com diâmetro de 1 mm, espaçadas igualmente de 1 mm uma da outra e colocada na linha de feixe. Os prótons ao colidirem no alumínio produzem ^{24}Na ($T_{1/2} = 15,0$ h) emitindo um raio γ com energia de 1,37 MeV. A atividade de cada vareta então foi medida usando um espectrômetro com uma resolução de energia aproximada. Assim, no experimento, foi utilizado um detector de Ge(Li) para a contagem dos prótons induzidos, através da atividade de ^{24}Na resultante da incidência do feixe na matriz de varetas. A taxa de contagem foi aumentada de um fator 200 usando um cristal maior de NaI(Tl). Com este aumento na taxa de contagem, esta técnica pôde ser usada com intensidades de prótons $>10^{11}$ pps.

Aframian et al⁽⁹⁾, com o objetivo de obter irradiações uniformes de amostras, descreveram o uso de materiais monitores de vestígio de estado sólido (plásticos e vidros) e outros materiais para medir o perfil de feixe de partículas carregadas. A técnica se baseou no fato de que, quando uma partícula carregada passa através de um material isolante, deixa um rastro ao longo do trajeto. O rastro latente então foi aumentado por ataque químico (*etching*) com uma solução de NaOH e observado num microscópio ótico. Usando técnicas apropriadas, estas cavidades gravadas foram replicadas e observadas ao olho nu. Como cada cavidade representa um simples impacto de uma partícula carregada, uma distribuição exata da intensidade do feixe foi obtida. Para feixes com densidades de 10^5 partículas/cm² ou maiores, apenas com ataques químicos prolongados

foram suficientes para que os perfis de feixe pudessem ser observados ao olho nu. Com este método, a não uniformidade de um feixe colimado, e o efeito das partículas espalhadas foram evidentes. Uma seleção adequada de plásticos de diferentes sensibilidades permitiu a análise numa faixa ampla de intensidades de feixe de 10^2 até o limite de 10^4 partículas/cm²s.

Büttig ⁽¹⁶⁾, no ciclotron de Rossendorf, desenvolveu um método para monitorar o perfil de feixe baseado na aplicação de termografia por infravermelho. O princípio de operação do monitor de perfil de feixe baseou-se na obtenção de perfil da temperatura emitida da superfície de um alvo colocado na linha de feixe. Assim, uma imagem do calor irradiado da sua superfície foi projetada num fotocátodo sensível à luz infravermelha de uma câmara *vidicon*, distante 2 m do alvo. No caso, o calor irradiado de um ponto fixo de uma superfície depende da densidade e energia das partículas que colidem nesse ponto, da condutividade térmica do material alvo, e das características da superfície do material alvo. Em seguida, um analisador de vídeo foi utilizado para classificar os sinais designando cores diferentes para representar o perfil de temperatura na tela de um monitor de TV colorido. Dessa forma, o termograma obtido forneceu uma representação visual da distribuição da densidade de partículas da seção transversal do feixe, ou seja, o perfil real do feixe.

Wieland ⁽¹⁷⁾ concluiu que a produção de radioisótopos é afetada pela distribuição da intensidade de feixe no alvo. Para quantificar esta distribuição, foi construído um monitor de perfil, consistindo de uma flange de alumínio com 13 orifícios de diâmetro de 1 mm cada, um deles localizado no centro e os demais equidistantes, localizados num raio de 2 mm e 4 mm. Atrás de cada orifício colimado foi colocado um pino de cobre de 1,6 mm de diâmetro. Após a irradiação por feixe de prótons, os pinos de cobre foram removidos e as atividades de ⁶³Zn resultantes correspondentes foram quantificadas num espectrômetro. Medidas feitas no feixe do ciclotron de íons negativos CP-42, através de um colimador com 10 mm de abertura, apresentou um fator 3 entre o pino mais quente e o mais frio do alvo. A mesma medida indicou a ocorrência de uma simetria circular entre os valores obtidos. Em vista disso, vários testes foram realizados, mostrando a reprodutibilidade quanto a homogeneidade do feixe incidente no alvo.

Nortier et al⁽¹⁸⁾, em TRIUMF, investigaram o desempenho térmico de alvos sólidos para a produção de radioisótopos. Eles descreveram um alvo especial contendo uma série de junções térmicas de Ni-Ag na forma de tiras, que funcionaram como pontos de medida direta de temperaturas na superfície incidente do alvo durante o bombardeamento. Como medida de controle, um termopar (tipo K), com 0,8 mm de diâmetro, foi embutido na superfície do alvo, na região central entre as junções de Ni-Ag. Este foi testado com intensidade de correntes de feixe de até 450 μA e 29 MeV de energia usando o cíclotron TR30. Com um fluxo de água de refrigeração de aproximadamente 40 l/min através do alvo, foi monitorada a temperatura da superfície durante o bombardeamento. Tal trabalho teve como objetivo maximizar o limite de corrente de feixe nos alvos sólidos empregados em TRIUMF.

Deviney et al⁽¹⁹⁾, do Centro Biomédico de Imagens, da Universidade de Tennessee, Knoxville, desenvolveram um novo sistema de verificação da homogeneidade do feixe do cíclotron CTI RDS112 (12 MeV). Foi construído um copo de Faraday, refrigerado com água, alojando um conjunto de treze termopares de 0,25 mm de diâmetro, equidistantes do centro, para avaliar a homogeneidade do feixe através da medição de temperaturas. Um colimador, com 7,6 mm de abertura foi utilizado para limitar a área irradiada. Os sinais obtidos dos termopares foram conduzidos a um sistema de aquisição de dados para as respectivas leituras de temperaturas num computador, para análise e avaliação da homogeneidade do feixe incidente. Foram feitas irradiações com intensidades de corrente de feixe de $\sim 5 \mu\text{A}$, possibilitando realizar vários testes sem a necessidade de remover ou perturbar qualquer parte do sistema.

CAPÍTULO 4

Materiais e métodos

4.1 Cíclotron Cyclone 30 do IPEN-CNEN/SP

O cíclotron, modelo Cyclone 30, da Ion Beam Applications (IBA) - Bélgica, recentemente instalado no IPEN-CNEN/SP, é do tipo isócrono, compacto, campo e frequência fixas, capaz de gerar dois feixes de prótons simultaneamente com energias entre 15 e 30 MeV e correntes de feixe de até 350 μA ⁽³⁾. Trata-se de um acelerador de íons negativos, especialmente projetado para a produção de radioisótopos (Figura 12).

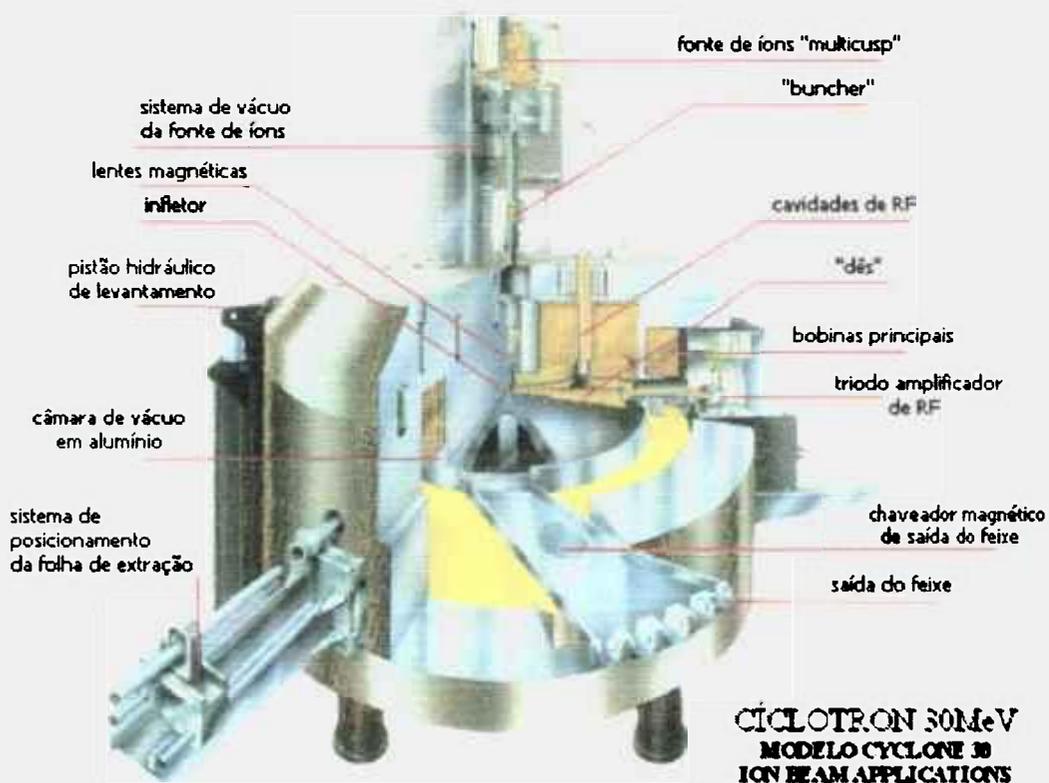


Figura 12 - Cíclotron Cyclone 30.

O Cyclone 30, por se tratar de uma máquina complexa, é dividido em vários blocos funcionais (sistema modular), dessa forma auxiliando na sua manutenção e operação.

Sistema Magnético: A estrutura magnética principal no Cyclone 30 é composta por uma bobina de campo única com corrente constante. O campo fixo, aliado a uma adequada conformação das peças polares, ou seja, a existência de regiões polares com *gaps* largos (vales profundos) e regiões com *gaps* estreitos (montes altos), proporcionam a focalização de aceleração e maior energia final da partícula, respectivamente, satisfazendo a condição de isocronismo. Consequentemente, a baixa corrente nas bobinas de campo contribuem para uma estrutura magnética muito compacta.

A existência de chaveadores magnéticos (ímãs de desvio de feixe) instalados nas saídas do ciclotron faz com que o feixe possa ser direcionado para diferentes porta-alvos ou linhas de transporte de feixe. Pelo fato do Cyclone 30 possuir duas linhas de feixe principais, torna-se possível enviar o feixe para até dez alvos ou linhas de feixe anexadas diretamente no ciclotron.

Fonte de Íons: Trata-se de uma fonte de íons externa do tipo *multicusp*, onde a injeção desses íons na câmara de aceleração é feita axialmente. No caso, os íons negativos são produzidos pela agitação térmica das moléculas de hidrogênio em contato com os elétrons energéticos gerados pelo filamento de tungstênio aquecido (catodo) que são acelerados em direção ao corpo da fonte polarizada positivamente (anodo), formando um arco de corrente no gás. A passagem do fluxo de elétrons através do gás faz com que as moléculas se dividam formando uma mistura de íons positivos e negativos de hidrogênio (produção de H_2^*) e elétrons, chamada de plasma.



Por meio de um conjunto de ímãs permanentes acoplados ao redor do corpo da fonte de íons, as moléculas excitadas (H_2^*) deslocam-se para a região de extração juntamente com os elétrons de baixa energia, enquanto que os

elétrons de alta energia são mantidos por um filtro magnético. Também, a dissociação por colisão com as moléculas de gás é intensificada na região de extração aumentando assim, a densidade de íons H^- .

Dessa forma, os íons e elétrons extraídos são atraídos por eletrodos polarizados positivamente (*puller*). Como as massas dos elétrons são menores que a dos íons H^- , um pequeno ímã permanente sobre o *puller* faz com que esses elétrons sejam atraídos (*electron trap*), enquanto que os íons H^- são acelerados em direção ao eletrodo final.

A linha de injeção também inclui um *buncher* cuja função é "empacotar" os íons provenientes da fonte de íons, transformando-os num feixe pulsado, melhorando dessa forma, a eficiência de injeção.

Sistema de Radiofrequência: O sistema de radiofrequência consiste de um amplificador de alta potência que amplifica o sinal proveniente de um oscilador até a potência de 25 kW. Em seguida, o sinal amplificado alimenta os eletrodos de aceleração ("dês") localizados dentro do ciclotron, que estão acoplados capacitivamente ao oscilador. Para gerar o sinal de radiofrequência, é utilizado um oscilador a quartzo para assegurar uma perfeita estabilidade de frequência (frequência fixa).

Os "dês" estão localizados em dois vales opostos da estrutura magnética. São sustentados por hastes, cujo comprimento equivale a um quarto de comprimento de onda e operam no modo de segunda harmônica com relação a frequência de revolução da partícula. A voltagem dos "dês" em relação ao terra (GND) é de ~50 kV. Devido à alta potência, o sistema é refrigerado com água à temperatura de 19 °C.

Sistema de Extração: Nos aceleradores circulares convencionais, um dos problemas mais difíceis é a extração de íons após a aceleração, pois as sucessivas órbitas com diferentes energias são muito próximas umas das outras. Nesse caso, canais de desvio excitados por campos elétricos e magnéticos auxiliares são necessários para conduzem os íons para fora do campo

magnético principal. Dificilmente se obtém extração com eficiência acima de 75 %, havendo redução desta eficiência quando se aumenta a corrente de feixe.

A aceleração de íons negativos de hidrogênio, H^- , oferece uma solução perfeita para tais problemas. O ciclotron Cyclone 30 acelera íons H^- , que são subseqüentemente arrancados dois elétrons para produzir o feixe de prótons. A extração do feixe é desempenhada por uma folha fina de carbono que arranca estes dois elétrons dos íons H^- , invertendo a carga das partículas, transformando-os em H^+ . Os íons positivamente carregados resultantes são então naturalmente desviados para fora do campo magnético. A extração do feixe por este método garante facilmente uma extração de praticamente 100 % do feixe acelerado. O Cyclone 30 permite extrair dois feixes de mesma partícula simultaneamente apenas ajustando a posição das folhas de carbono do sistema de extração do feixe (*stripper*).

Sistema de Controle: O sistema de controle do Cyclone 30 é totalmente computadorizado e automatizado, baseado em CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) e *softwares* de controle e supervisão. Trata-se de um controlador lógico programável Siemens SIMATC S5-155U, muito utilizado em processos de automação de grande porte. A comunicação do CLP com o microcomputador é realizada via interface de comunicação serial RS-232C. Um *software* de supervisão, executado em ambiente WindowsTM num microcomputador PC compatível IBM, faz o monitoramento e controle do Cyclone 30. Por se tratar de um programa totalmente gráfico, permite que pessoas sem longa experiência em ciclotrons comecem a operar o Cyclone 30 rapidamente. As falhas na máquina são comunicadas ao usuário por mudanças de cores dos objetos e através de mensagens de erro.

No microcomputador, além do armazenamento dos *presets* de feixes, está disponível um gerador de registros dos parâmetros de operação da máquina. Todas as rotinas de operação são monitoradas, controladas e registradas pelo *software*. A intensidade de corrente de feixe pode ser monitorada na linha de injeção, no ponto de extração, na entrada e saída da linha de transporte de feixe,

etc. Estas medidas são mostradas na tela do computador e utilizadas pelo sistema de controle para o ajuste em tempo-real dos parâmetros do feixe (*feedback*). Também são utilizadas como sinais de intertravamento de segurança pessoal e do equipamento.

Sistema de Vácuo: No ciclotron de íons negativos, átomos de hidrogênio resultantes da dissociação por colisão dos elétrons arrancados do H^- (0,755 eV) com moléculas do gás residual da câmara de vácuo, chocam-se com as paredes do tanque, causando aquecimento e ativação das peças internas do ciclotron. Para minimizar tal efeito, o Cyclone 30 trabalha com um sistema de alto vácuo consistindo de duas bombas criogênicas localizadas sob o ciclotron. A condição operacional de vácuo na câmara principal é da ordem de 5×10^{-7} mbar.

Sistema de Transporte de Feixe: As linhas de transporte de feixe são necessárias para conduzir as partículas de feixe até os dispositivos que contêm os materiais a serem irradiados. No Cyclone 30, basicamente existem duas linhas de transporte de feixe principais, localizadas simetricamente ao acelerador conforme a Figura 13.

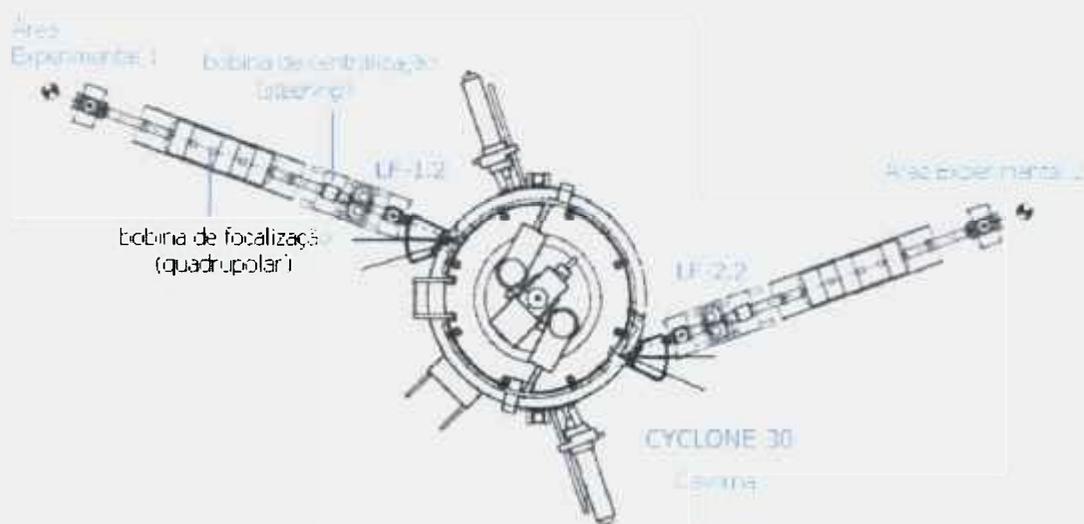


Figura 13 – Localização das linhas de transporte de feixe do Cyclone 30

A linha de feixe LF-2.2 é destinada à irradiação de alvos sólidos e a LF-1.2, se subdivide em até cinco linhas de feixe secundárias. Nessa linha encontra-se instalado um distribuidor magnético de feixe com 5 posições, cuja função é direcionar o feixe principal para uma das 5 saídas possíveis (Figura 14). Atualmente, duas saídas do distribuidor são destinadas à produção de ^{18}F e ^{123}I , respectivamente, e outra para o condicionamento do ciclotron e treinamento de pessoal. As demais saídas não estão em uso atualmente. No caso, válvulas de gaveta (*beam-gate*) separam cada uma das saídas do distribuidor magnético dos sistemas de porta-alvo, que são diferenciados em função das peculiaridades do experimento realizado.

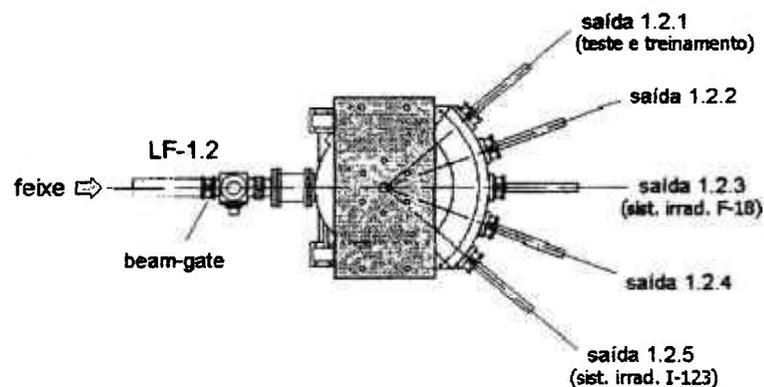


Figura 14 - Distribuidor magnético

Ao longo das linhas de transporte de feixe principais, além de um sistema de vácuo próprio, encontram-se instaladas bobinas eletromagnéticas de centralização e focalização, de modo a permitir que o feixe seja conduzido convenientemente até o material a ser irradiado.

Atualmente, no IPEN-CNEN/SP, os radioisótopos para a Medicina nuclear estão sendo produzidos com o Cyclone 30, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Principais radioisótopos produzidos no ciclotron Cyclone 30 do IPEN/CNEN/SP.

material	radioisótopo	Feixe de prótons	
		energia (MeV)	corrente (μA)
H_2^{18}O	^{18}F	24	25
^{124}Xe	^{123}I	30	17
^{68}Zn	^{67}Ga	30	200

4.2 Sistemas de irradiação

Atualmente, nas respectivas saídas do distribuidor estão instalados dois sistemas de irradiação para a produção de radioisótopos, a saber:

- **Sistema de irradiação para a produção do ^{18}F :** Instalado na posição central do distribuidor magnético (LF-1.2.3), trata-se de um sistema de irradiação de alvos líquidos. No caso, o porta-alvo consiste de um colimador cônico com diâmetro final de 10 mm, uma flange suporte para duas janelas de Havar de 50 e 25 μm , respectivamente, refrigerados com gás Hélio, e um corpo de prata, refrigerado com água deionizada, contendo uma cavidade semi-hemisférica de 2 ml, que é a cavidade onde a água enriquecida (H_2^{18}O) é irradiada (câmara de irradiação). O Havar, material utilizado nas janelas, consiste de uma liga de Co, Cr, Ni, Fe, W, Mo e Mn, cujas características são: não magnético, suporta altas temperaturas, resistente às corrosões, tensões mecânicas e fadigas.

Na linha de feixe LF-1.2.3, junto ao sistema de irradiação do ^{18}F , encontra-se instalado um *beam-stopper* com acionamento pneumático, o qual destina-se a medir a intensidade de corrente de feixe que será colocada no alvo. Além disso, serve para a otimização dos parâmetros operacionais do ciclotron antes do feixe atingir o alvo.

- **Sistema de irradiação para a produção do ^{123}I :** Instalado na posição 5 do distribuidor magnético (LF-1.2.5), trata-se de um sistema de irradiação de alvos gasosos, onde o porta-alvo é composto por uma flange suporte para duas janelas de Havar com 50 μm de espessura, refrigeradas com gás Hélio, e uma câmara cilíndrica de 40 cm^3 , refrigerada com água deionizada, onde o gás ^{124}Xe é irradiado.

Além dos dois sistemas de irradiação para a produção de radioisótopos mencionados acima, na posição 1 do distribuidor magnético, uma terceira saída de feixe (LF-1.2.1) está adaptada para condicionamento do ciclotron, testes de novos dispositivos de irradiação e treinamento de pessoal.

O colimador, geralmente utilizado em sistemas de irradiação, tem a função de delimitar a área que será irradiada ou ativada. Esse dispositivo é montado em conjunto com o porta-alvo, de forma a permitir um alinhamento entre alvo e colimador. Normalmente, em sistema de porta-alvos, subentende-se que já esteja incluído também o colimador, que sempre é útil, independente do propósito do trabalho a ser realizado.

Para evitar que o calor gerado pela incidência direta do feixe venha a danificar os dispositivos de irradiação e até mesmo provocar a perda do material-alvo, tanto o *beam-stopper*, o colimador, como o porta-alvo são refrigerados com água à temperatura de aproximadamente 19 °C.

4.3 Monitoração do feixe – parte experimental

O monitoramento de feixe do Cyclone 30 está sendo realizado na linha de feixe 1.2, mais precisamente nas linhas de feixe secundárias das respectivas saídas do distribuidor magnético, onde estão instalados os sistemas de irradiação para a produção do ^{18}F e ^{123}I .

4.3.1 Perfil e alinhamento de feixe

Conceitualmente, um modo simples de se medir a corrente de um feixe de íons é capturar o feixe propriamente dito e deixar a corrente induzida fluir através de alguma espécie de medidor. Historicamente, este foi o primeiro método usado para monitorar um feixe. Esta técnica simples é ainda muito utilizada atualmente para feixes de partículas até uma certa energia, onde a condição principal é que a espessura do coletor (cobre ou alumínio) seja suficiente para frear completamente as partículas do feixe. Dessa forma, os elétrons secundários induzidos pelo feixe não conseguem atingir a superfície do material e fluem para um ponto de menor potencial, no caso, através do medidor. Portanto, em função do feixe incidente no material coletor é gerada uma corrente elétrica induzida proporcional.

Sendo assim, o monitor de corrente de absorção total, pela sua simplicidade, robustez, e confiabilidade nos resultados, é o mais adequado, atualmente, para monitorar o comportamento do feixe no cíclotron Cyclone 30 do IPEN. Para um feixe pulsado de prótons com energia de 30 MeV, a espessura do coletor (alumínio) deverá ser, no mínimo, de 4,32 mm⁽⁷⁾.

Baseado nesta técnica de monitoração da corrente de feixe mencionada acima e na experiência adquirida durante anos com feixes de cíclotron foi construído um colimador multi-setor, denominado de "diafragma de quatro setores", ou simplesmente, "quatro-setores". Ele é composto por quatro blocos de alumínio isolados eletricamente entre si, o que permite medir simultaneamente e independentemente os quatro quadrantes ao redor da área irradiada, fornecendo informações para que se possa fazer os ajustes necessários no feixe de partículas, tornando-o mais adequado e eficiente. No centro dos quatro-setores existe uma abertura com diâmetro pré-determinado de modo a não obstruir totalmente a passagem do feixe. Os setores foram construídos de forma a possuírem exatamente a mesma área exposta ao feixe e não permitirem passagem livre do feixe, a não ser pelo colimador central. Um desenho do colimador multi-setor pode ser visto na Figura 15.

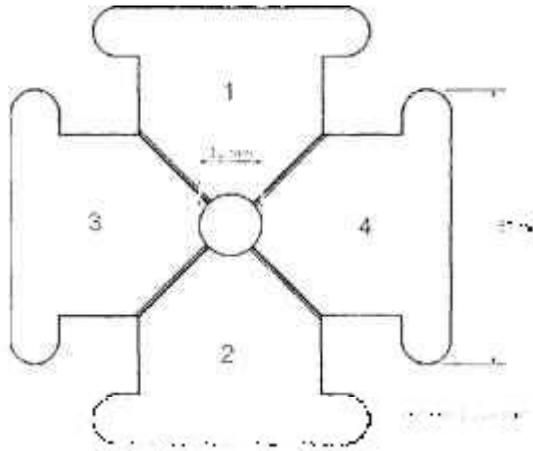


Figura 15 - Desenho do diafragma de quatro-setores

Na sua construção foi utilizado o alumínio, pois além de ser um material leve, com boa condutividade térmica e elétrica, apresenta boa resistência mecânica, e quando exposto à irradiação, produz radionuclídeos de meia vida ($T_{1/2}$) curta. Cabe salientar que, o alumínio deve ter alto grau de pureza, evitando a formação de radionuclídeos indesejáveis devido às impurezas que possuem meia vida mais longa. Em função dessa característica, a não formação de radioisótopos de meia vida longa, o alumínio torna-se um material adequado a esse tipo de uso, permitindo o seu manuseio após um curto período de tempo de decaimento, o que não ocorre com a maioria dos outros materiais.

Para evitar que o calor gerado pela incidência direta do feixe de prótons danifique os setores do colimador, eles são refrigerados com água deionizada, à temperatura de $\sim 19^\circ\text{C}$ e com uma vazão de 4 l/min. Com a água a essa temperatura e, sendo o alumínio um bom condutor térmico, a dissipação de calor é bastante eficiente, preservando a integridade do dispositivo. A deionização da água, bem como a presença de flanges isoladoras são essenciais para isolar eletricamente os coletores de feixe. Do contrário, a presença de fugas de corrente pode interferir no sinal elétrico a ser monitorado. Uma imagem do colimador de quatro-setores pode ser vista na Figura 16.



Figura 16 - Foto do Colimador multi-setor (“quatro-setores”)

a) Sistema de irradiação para a produção do ^{18}F

Na linha de feixe 1.2.3 do Cyclone 30, no sistema de irradiação para a produção do ^{18}F foi instalado um sistema de monitoração do perfil de feixe, conforme a Figura 17.

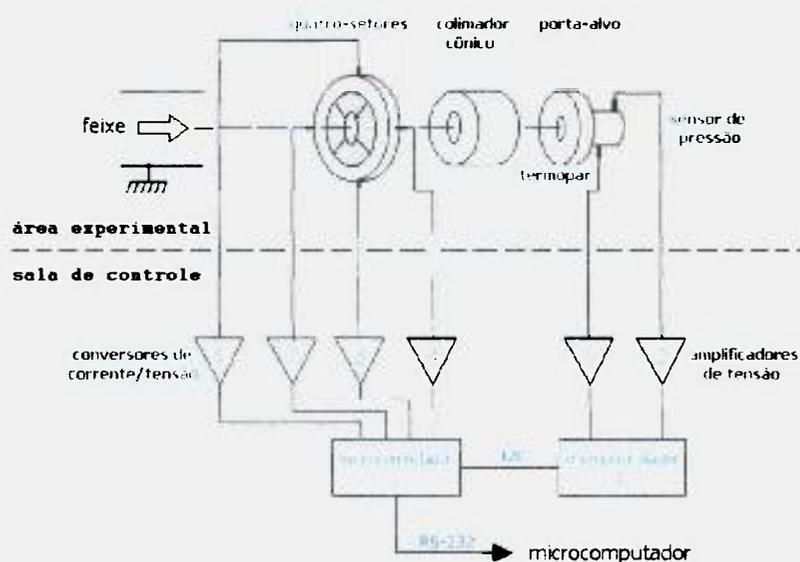


Figura 17 - Desenho do sistema de perfil do feixe em conjunto com porta-alvo para a produção do ^{18}F

Basicamente é constituído de três formas de monitoração e controle de parâmetros sensíveis ao perfil e corrente de feixe: um colimador de quatro-setores para o monitoramento do perfil de feixe, um sensor de pressão interna da câmara de irradiação e um termopar para a medição da temperatura do gás Hélio de refrigeração.

Colimador multi-setor (quatro-setores): São quatro monitores independentes de corrente de feixe de absorção total, posicionados transversalmente à linha de feixe. Os setores possuem uma espessura de 20 mm cada, sem caminho livre ao feixe entre os setores e são isolados eletricamente. Devido o calor provocado pela incidência do feixe, cada setor é refrigerado a água (~19 °C). Para não obstruir totalmente a passagem do feixe, este dispositivo possui uma abertura ao centro, atuando também como um colimador com abertura de 11 mm de diâmetro.

Sensor de pressão: A medição da pressão interna da câmara de irradiação foi feita com um sensor de pressão miniatura, modelo XTM-190, fabricado pela firma Kulite Semiconductor Ltd. Este sensor possui área ativa bastante reduzida, resultando em um volume morto praticamente desprezível. O sensor utilizado nesse sistema possui uma sensibilidade de ~2,18 mV/bar.

Termopar: A medição da temperatura do gás Hélio de refrigeração entre janelas de Havar foi feita com um termopar tipo K, instalado na saída do gás na flange de fixação das janelas.

A utilização dos quatro-setores, aliado ao *beam-stopper*, instalados na frente do porta-alvo, foi de fundamental importância na otimização do feixe a ser utilizado. Desta maneira, o feixe somente incide no alvo após estar efetivamente otimizado.

Na Figura 18 pode ser vista uma imagem do sistema de irradiação para a produção do ^{18}F , onde está instalado o colimador de quatro-setores.

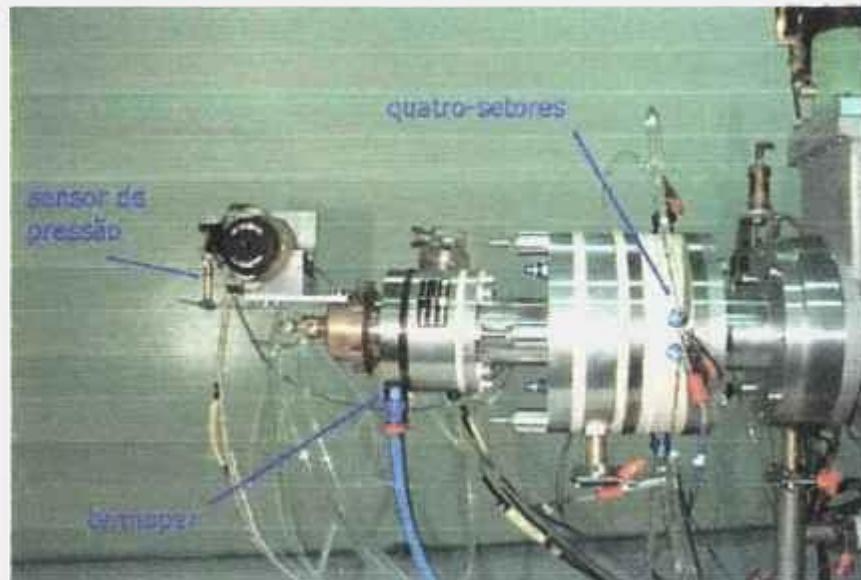


Figura 18 – Sistema de irradiação para a produção do ^{18}F

b) Sistema de Irradiação para a produção do ^{123}I

Na linha de feixe LF-1.2.5 do Cyclone 30, no sistema de irradiação para produção do ^{123}I , instalou-se um sistema de alinhamento e monitoração do perfil de feixe, conforme a Figura 19.

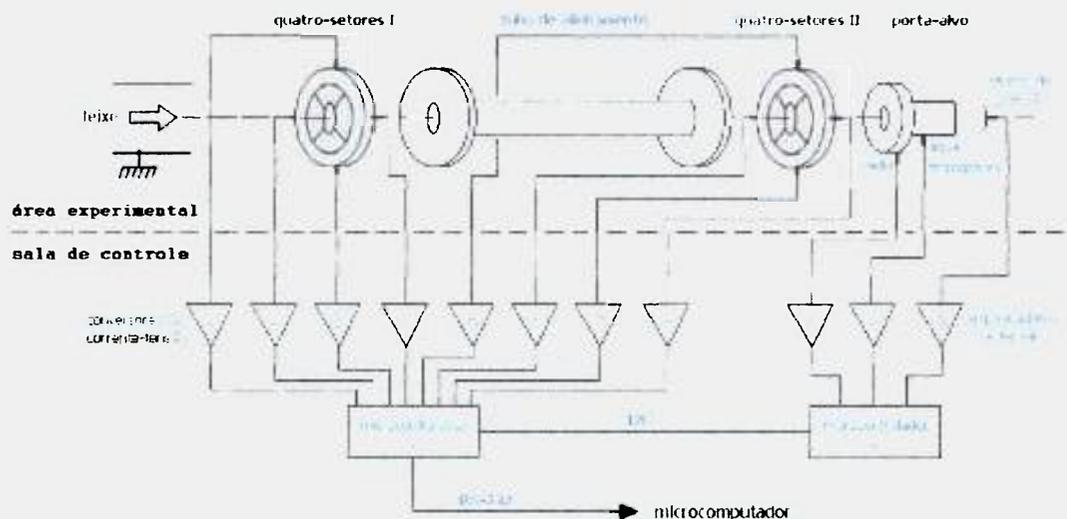


Figura 19 - Desenho do sistema de alinhamento do feixe

O sistema de alinhamento de feixe é constituído de um tubo de aço inoxidável com 3 polegadas (7,62 cm) de diâmetro e 65 cm de comprimento. Nas suas extremidades existem flanges adaptadoras onde são fixados os monitores de perfil de feixe (colimador de quatro-setores), um em cada extremidade, similar ao já instalado e testado na linha adjacente (Flúor-18). Portanto, ao longo da linha de feixe, tem-se a montante, um diafragma de quatro-setores com abertura de 12 mm, e a jusante, um segundo diafragma com abertura de 11 mm. Dessa forma, o alinhamento do feixe é obtido quando o feixe de íons incidir, proporcionalmente, nos setores dos respectivos diafragmas, através de suas aberturas. Com o mesmo mecanismo, foi possível, além do ajuste do alinhamento, observar a forma, e o posicionamento do feixe (perfil de feixe). Através de termopares tipo K e um sensor de pressão também são monitorados as temperaturas da água e do gás He de refrigeração do porta-alvo e das janelas, respectivamente, e a pressão interna da câmara onde está confinado o gás ^{124}Xe . Nesse sistema, a medição da pressão interna da câmara de irradiação foi feita com um sensor de pressão modelo ETM-375M, fabricado pela firma Kulite Semiconductor Ltd. O sensor utilizado possui uma sensibilidade de $\sim 143,14 \text{ mV/bar}$. Na Figura 20 uma imagem do sistema de irradiação para a produção do ^{123}I pode ser vista. Também pode-se observar o sistema de alinhamento de feixe instalado.



Figura 20 – Sistema de irradiação para a produção do ^{123}I

4.3.2 Homogeneidade do feixe

Duas formas de verificação da homogeneidade do feixe foram usadas no presente trabalho: a primeira foi feita através de reações monitoras em cobre natural no ciclotron CV-28 e a segunda, utilizando termopares, no ciclotron Cyclone 30.

a) Ciclotron CV-28

Os primeiros experimentos de homogeneidade de feixe feitos no ciclotron CV-28, utilizando a técnica desenvolvida por Wieland ⁽¹⁷⁾, envolveram a confecção de uma flange em alumínio, com forma circular, de diâmetro igual a 56 mm e espessura de 4,0 mm, contendo 7 orifícios com diâmetro igual a 1,5 mm cada um. Um deles está localizado no centro da peça e os demais distribuídos uniformemente ao redor do mesmo, formando um ângulo de 60° entre si. A distância entre o centro do orifício central e o centro dos outros orifícios foi de 4,25 mm. Como o alcance para prótons com energia de 24 MeV no alumínio é de 2,94 mm, somente as sete áreas correspondentes aos sete orifícios permitiram a passagem do feixe, funcionando como um colimador múltiplo dentro da área irradiada (gabarito), delimitada pelo colimador de 10 mm de diâmetro. Na Figura 21 encontra-se um desenho com as dimensões da flange utilizada nos experimentos.

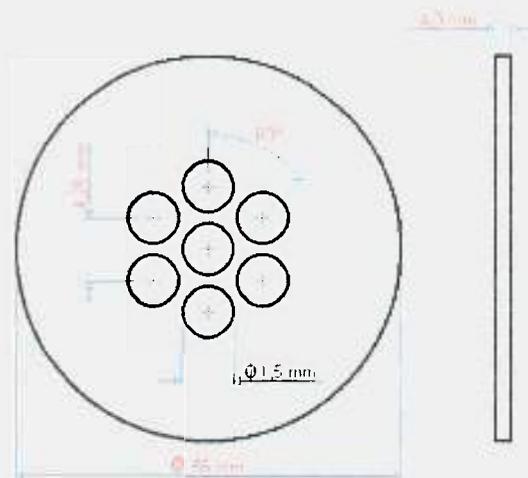


Figura 21 – Flange de alumínio utilizada na avaliação da homogeneidade de feixe do ciclotron CV-28

Em seguida, a flange de alumínio com os orifícios foi colocada sobre uma folha de cobre com espessura de 20 μm , pureza química de 99,99 %, da empresa Goodfellow Metals Ltd. Esse tipo de arranjo, montado no porta-alvo, permitiu identificar distintamente os sete pontos onde o feixe atingiu a folha de cobre. Na Figura 22 pode-se visualizar as respectivas dimensões da folha de Cu e o posicionamento das sete áreas expostas ao feixe de prótons.

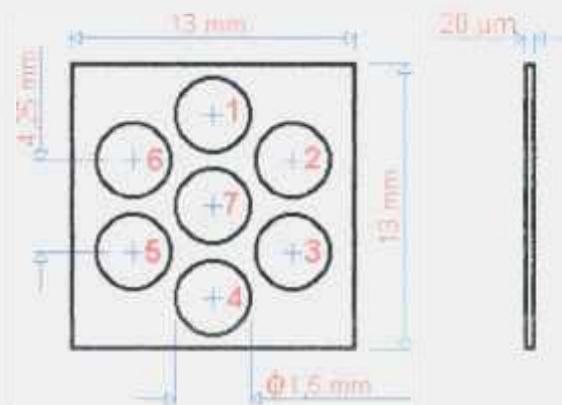


Figura 22 – Folha de Cu utilizada na avaliação da homogeneidade de feixe no ciclotron CV-28

Depois de irradiado, o conjunto porta-alvo/folha ficou armazenado por algumas horas, para que os radionuclídeos de meia-vida curta fossem eliminados por decaimento radioativo, diminuindo-se a exposição, permitindo a manipulação e conseqüentemente a retirada da folha de cobre.

A última etapa consistiu em secionar e identificar a folha de cobre irradiada, separando as sete áreas ativadas. Essas sete partes foram medidas separadamente, utilizando-se um detector de Ge-hiperpuro. Além de identificar os radionuclídeos presentes foi possível medir suas respectivas atividades em cada uma das partes.

Para avaliar o grau de homogeneidade do feixe produzido pelo ciclotron CV-28 foi escolhido o cobre por ser um dos materiais mais utilizados na caracterização de feixe de prótons. Ele possui seções de choque bastante conhecidas e estudadas. Inclusive, é possível relacionar os valores de atividade dos radioisótopos formados com a energia dos prótons incidentes.

Na irradiação de cobre natural com prótons de 24 MeV são produzidos os radionuclídeos ^{62}Zn , ^{63}Zn e ^{65}Zn , sendo que na avaliação da homogeneidade foram analisados apenas os fotopicos referentes ao ^{62}Zn e ^{65}Zn , que possuem meia-vida mais longa, uma vez que o ^{63}Zn foi eliminado por decaimento radioativo durante o período de armazenamento. Na Tabela 3 são mostradas as reações nucleares que dão origem a esses radionuclídeos, suas respectivas meias-vidas e seus fotopicos correspondentes.

Tabela 3 – Reações de prótons de 24 MeV em cobre natural.

reação nuclear	radionuclídeo formado	meia-vida ($T_{1/2}$)	Energia dos fotopicos (keV)
$^{63}\text{Cu} (p, 2n) ^{62}\text{Zn}$	^{62}Zn	9,257 horas	548.32 596.60
$^{63}\text{Cu} (p, n) ^{63}\text{Zn}$	^{63}Zn	38 minutos	670 962
$^{65}\text{Cu} (p, n) ^{65}\text{Zn}$	^{65}Zn	5856 horas	1115,55

O ponto de número 7, mostrado na Figura 22, por estar posicionado no centro da amostra e equidistante dos demais pontos (1, 2, 3, 4, 5, 6), foi tomado como referência para a normalização e a distribuição dos dados. As atividades de ^{62}Zn e ^{65}Zn determinadas neste ponto foram consideradas padrões, atribuindo-lhes o valor de 100 %. A partir daí, os demais pontos foram calculados em sua função, fornecendo os valores percentuais nas sete áreas ativadas para as folhas de cobre.

b) Ciclotron Cyclone 30

Uma vez que a interação das partículas energéticas de um feixe num material-alvo gera calor, a distribuição da densidade de potência depositada pelo feixe na superfície do alvo, ou seja, a sua homogeneidade, pode ser obtida mapeando-se a distribuição de temperaturas na superfície desse alvo ⁽¹⁶⁾.

Dessa forma, para medir diretamente as temperaturas em pontos definidos na superfície do alvo foi construído um dispositivo que consistiu de um alvo de alumínio com sete termopares embutidos, um localizado no centro e outros seis equidistantes entre si, formando um ângulo de 60° situados a uma distância, centro a centro, de 3 mm, conforme pode ser visto na Figura 23, similar ao desenvolvido por DeVinney et al ⁽¹⁷⁾. Com o objetivo de limitar o feixe na área monitorada, foi colocado um colimador com abertura de 10 mm. Para evitar danos devido o superaquecimento provocado pela incidência direta do feixe, o dispositivo foi refrigerado com água a temperatura de ~19 °C.

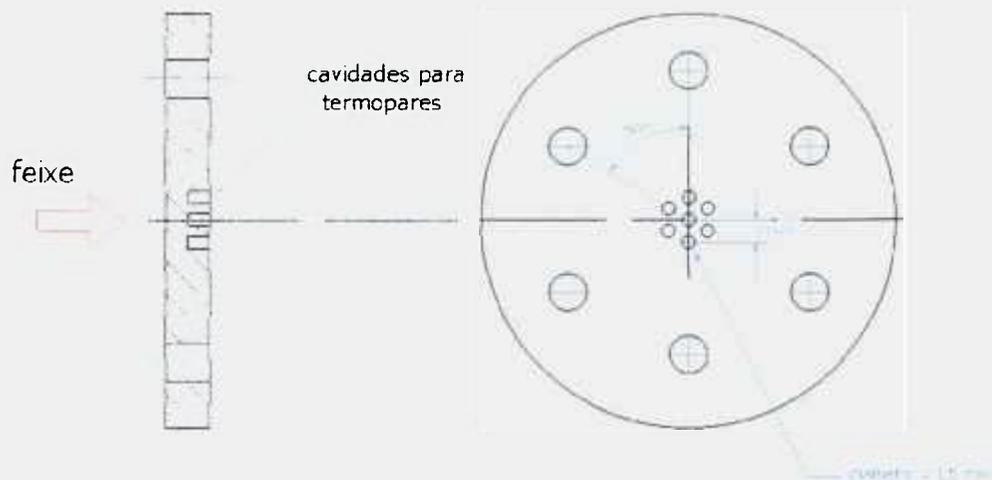


Figura 23 - Alvo para avaliação da homogeneidade do feixe do ciclotron Cyclone 30.

Os termopares utilizados no sistema de homogeneidade de feixe são do tipo K, com diâmetro de 1,5 mm. Estes possuem uma junção isolada (isolação mineral) para proporcionar uma isolação elétrica total entre os fios do termopar e a bainha metálica de medição, protegendo-o de qualquer tipo de interferência elétrica e do ambiente onde está sendo utilizado.

A princípio, pretendia-se utilizar um número maior de termopares, com diâmetros menores, assim obtendo mais pontos de leitura de temperatura na superfície do alvo, porém, na época, termopares com junção isolada de menor diâmetro encontrado no mercado nacional foi de 1,5 mm.

O termopar tipo K, cuja composição química é formada pelo níquel-cromo(+)/ níquel-alumínio(-), é utilizado muito na indústria em geral, possui uma ampla faixa de atuação ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$), excelente resistência a oxidação em altas temperaturas e a corrosão, podendo também ser utilizado em temperaturas negativas.

O sistema de avaliação da homogeneidade do feixe foi instalado na linha de feixe 1.2.1, referente à posição 1 do distribuidor magnético, destinado ao condicionamento do Cyclone 30 e treinamento de pessoal (Figura 24).

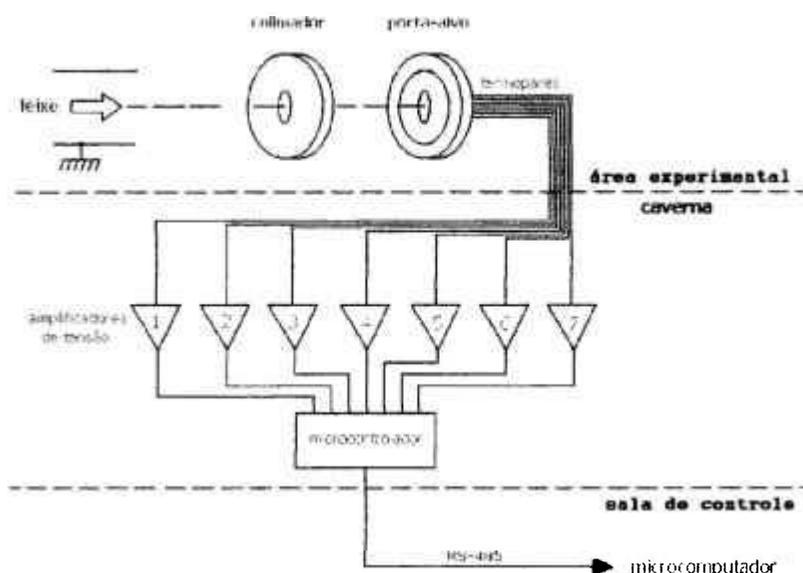
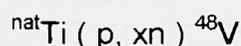
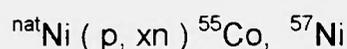
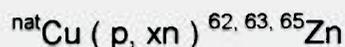


Figura 24 – Desenho do sistema de avaliação da homogeneidade do feixe do cíclotron Cyclone 30.

4.3.3 Energia do feixe

Para a estimativa da energia de um feixe de partículas carregadas produzidas por um cíclotron três técnicas independentes podem ser utilizadas: medidas do poder de frenamento, da ativação através de reações monitoras e do tempo de vôo⁽²⁰⁾. As análises do poder de frenamento e do tempo de vôo necessitam de arranjos experimentais sofisticados, de custos elevados. Com relação à análise pela ativação através de reações monitoras, a mais simples, é freqüentemente usada nos experimentos que determinam funções de excitação de reações nucleares. Para prótons na faixa de energia do cíclotron Cyclone 30 do IPEN, até 30 MeV, as reações mais empregadas são:



Dessa forma, a energia do feixe de íons do Cyclone 30 foi obtida utilizando-se a técnica de análise por ativação desenvolvida por Kopecký, com reações monitoras em ${}^{\text{nat}}\text{Cu}$ ⁽²¹⁾. Para tal, foi utilizado o sistema padrão de porta-alvos, composto de um colimador com abertura de 10 mm e o porta-alvo propriamente dito. Irradiações de folhas de cobre com 50 μm de espessura e 99,99 % de pureza intercaladas entre folhas de Ni/Zr e Al foram efetuadas, cuja preparação e montagem pode ser vista na Figura 25. As folhas de Ni/Zr e Al serviram como degradadores de energia e foram utilizadas para estudo de reações nucleares. As degradações de energia foram calculadas a partir dos alcances dos prótons tabelados por Williamson *et al* ⁽⁷⁾.

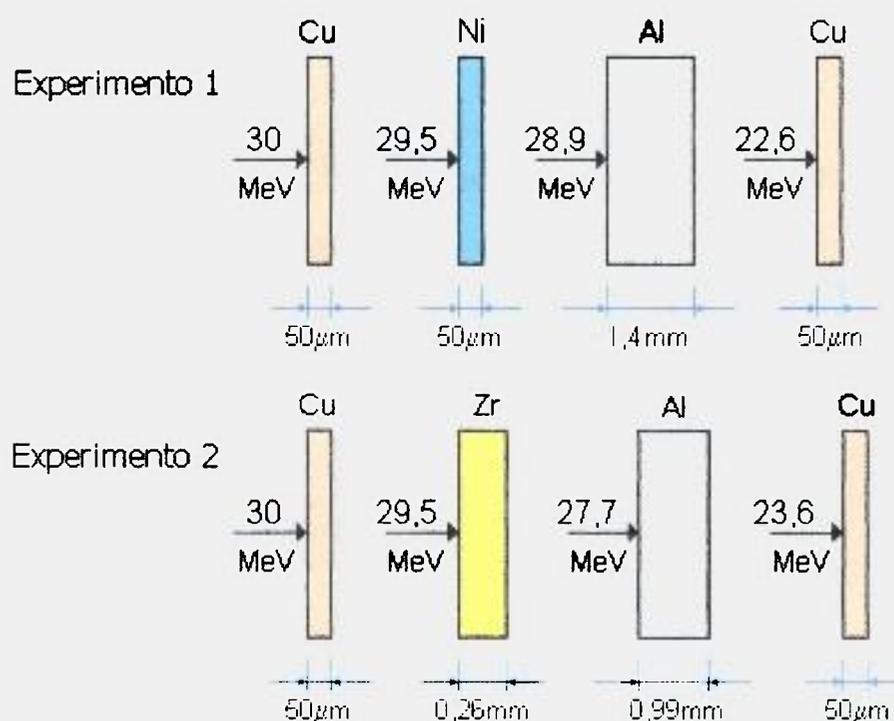


Figura 25 - Montagem das folhas com as respectivas degradações da energia do feixe - Técnica do Empilhamento.

Os picos referentes as atividades de ^{62}Zn , ^{65}Zn foram analisados com um detetor de Ge(HP) e então foi calculada a energia do feixe. Os valores obtidos foram comparados com os valores nominais fornecidos pelo controle do cíclotron. A mesma técnica já foi utilizada na determinação da energia do cíclotron CV-28.

4.3.4 Instrumentação

Os sinais provenientes dos sistemas de perfil e alinhamento de feixe foram conduzidos por cabos coaxiais de $50\ \Omega$ (colimadores de quatro-setores e sensores de pressão) e por cabos de compensação (termopares) até o módulo eletrônico de aquisição de sinais, localizado na sala de operação do Cyclone 30, distante ~50 m.

No módulo, o condicionamento dos sinais analógicos, realizados por amplificadores operacionais, conversores de corrente-tensão encarregam de converter as correntes de feixe provenientes dos setores do colimador (quatro-setores) em tensões, enquanto que, um amplificador de tensão amplifica o sinal do sensor de pressão. Da mesma forma, amplificadores de tensão, amplificam o sinal do termopar e do sensor eletrônico de temperatura utilizado na compensação de junta fria.

Os sinais de tensão, após o condicionamento específico, são enviados às entradas analógicas multiplexadas dos microcontroladores, que em seguida, convertem os sinais em dados digitais. Estes, por sua vez, são enviados finalmente, via comunicação serial RS-232C até um microcomputador PC, onde são observados, registrados e analisados.

De maneira similar, no sistema de avaliação da homogeneidade do feixe, os sinais provenientes dos respectivos termopares (sete) são enviados por cabos de compensação até um segundo módulo eletrônico de aquisição de sinais. Este é responsável pelo condicionamento dos sinais e tratamento de dados e está localizado sob o cíclotron, na caverna do Cyclone 30, distante 10 m do local de

medição (área experimental 1). Os dados são enviados através de um cabo de par trançado (três fios comuns trançados) via comunicação serial RS-485 até o microcomputador PC localizado na sala de operação do Cyclone 30, distante ~40 m. Tal arquitetura foi adotada com a finalidade de diminuir a quantidade de cabos longos e conseqüentemente minimizar a interferência a ruídos.

4.3.4.1 Condicionamento de sinais

Nesse projeto, como componente base no condicionamento dos sinais analógicos, foi utilizado o amplificador operacional CA3140A, da Intersil⁽²²⁾, um amplificador operacional com tecnologia MOSFET, sendo as características principais a alta impedância de entrada (~1,5 TΩ), baixo consumo de corrente (10 pA/15 V), baixo ruído e facilmente encontrado no mercado nacional.

Todos os dispositivos analógicos foram projetados de modo a apresentarem uma tensão de saída correspondente a uma variação de 0-5 V, compatível com as entradas analógicas dos microcontroladores.

Para monitorar as grandezas desejadas nesse trabalho, foi utilizado o amplificador operacional nas seguintes configurações e funções:

a) Medição da temperatura

Pelo fato do sinal elétrico proveniente dos termopares ser pequeno (~40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ - termopar tipo K), é necessário amplificar esse sinal para que se possa observar as variações de temperatura ou mesmo, excitar as entradas dos conversores A/D dos microcontroladores. Para esta finalidade, foram utilizados amplificadores operacionais como amplificador diferencial de tensão, conforme a Figura 26.

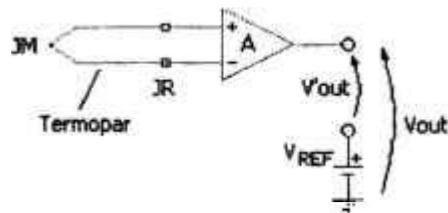


Figura 26 - Amplificação do sinal do termopar

No projeto, para que os limites de temperatura fossem compatíveis com os valores limites de tensão de saída do amplificador operacional, além da condição de ser positiva ($V_{OUT} \geq 0$), necessária às entradas dos conversores AD dos microcontroladores, algumas situações foram consideradas:

$$V_{OUT} = V'_{OUT} + V_{REF}, \quad (0 \geq V_{OUT} \geq 5 \text{ V})$$

Se $V_{REF} = V_{OUT}/2$ (cte), tem-se:

$$0 \leq V'_{OUT} \leq V_{OUT}/2 \quad (T_M \geq T_R)$$

$$-V_{OUT}/2 \leq V'_{OUT} < 0 \quad (T_M < T_R)$$

onde, T_M é a temperatura na junta de medida (J_M), e
 T_R é a temperatura na junta de referencia (J_R)

Dessa forma, os valores de tensão serão sempre positivos e flutuarão sobre $V_{OUT}/2$, independentemente da situação, ou seja, das temperaturas (T_M e T_R). A temperatura na junta de medida ou junta quente é dada pela expressão:

$$T_M = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{k \cdot A_V} + T_R \quad (5)$$

onde k é a sensibilidade termoelétrica do termopar com a junção de referência, mantida a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O ganho do amplificador A_V é calculado em função da tensão de saída V_{OUT} , da impedância de entrada R_{IN} e da temperatura máxima de medição desejada T_L , conforme a expressão:

$$A_V = \frac{V'_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{V_{OUT}}{2 \cdot k \cdot T_L} = \frac{R_M}{R_{IN}} \quad (6)$$

onde R_M é a impedância de realimentação do amplificador operacional.

Assim, para o primeiro circuito de medição de temperatura (perfil e alinhamento), considerando-se $k = 40\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ para o termopar tipo K, uma variação de tensão de saída de 0 a 5 V ($V_{OUT} = 5\text{ V}$) e uma temperatura máxima a ser medida de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, pelas expressões (3 e 6) obtém-se um ganho de tensão necessário $A_V = 1250$ vezes. Assumindo uma impedância de entrada tão alta quanto possível $R_{IN} = 8,2\text{ K}\Omega$, e obedecendo os limites de ganho do componente, obtém-se $R_M = 10,3\text{ M}\Omega$, para manter o ganho A_V . Da mesma forma, para o segundo circuito de medição de temperatura (homogeneidade), considerando-se uma temperatura máxima a ser medida pelos termopares de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma impedância de entrada $R_{IN} = 10\text{ k}\Omega$, resulta no ganho de tensão $A_V = 208$ vezes e conseqüentemente um resistor de ganho $R_M = 2,1\text{ M}\Omega$.

A correção da junta de referência T_R foi feita automaticamente via *software*, adicionando-se a temperatura ambiente à temperatura obtida pelo termopar. A medição da temperatura ambiente ou de referência foi feita próximo aos terminais do amplificador através de um sensor de temperatura eletrônico LM35, da National Semiconductor⁽²³⁾ que, após a amplificação adequada do seu sinal ($10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$) foi acoplado a uma das entradas do conversor A/D. Para tal, foi utilizado um amplificador de tensão diferencial com a entrada inversora aterrada, dessa forma atuando como um amplificador de tensão não-inversor. O ganho de tensão, dada pela expressão (1), foi estabelecido em 10 vezes e a impedância de

entrada em $R_{IN}=100\text{ k}\Omega$, obtendo-se assim na saída do amplificador, um sinal correspondente de $100\text{ mV}/^\circ\text{C}$.

b) Medição da pressão

Para amplificar os sinais provenientes do sensor de pressão foi utilizado um amplificador de tensão diferencial com a entrada inversora aterrada, atuando como um amplificador de tensão não-inversor, similar ao que é utilizado para amplificar o sinal do sensor de temperatura da junta de referência nos termopares. Nesse caso, o ganho de tensão depende do tipo de sensor de pressão utilizado. O primeiro sensor de pressão, usado no sistema de irradiação - ^{18}F , tem uma sensibilidade de $2,14\text{ mV}/\text{bar}$. Considerando 20 bar o limite de pressão a ser medido e uma tensão de saída máxima de 5 V , pela expressão (1), obtém-se um ganho de tensão de aproximadamente 117 vezes, resultando na saída do amplificador, um sinal correspondente de $250\text{ mV}/\text{bar}$. A impedância de entrada foi estabelecida em função do ganho, no caso $R_{IN}=47\text{ k}\Omega$. Da mesma forma, para o segundo sensor de pressão (sistema de irradiação - ^{123}I), com sensibilidade de $143,14\text{ mV}/\text{bar}$, para o mesmo limite de pressão, o ganho de tensão deverá ser de aproximadamente 1,8 vezes, resultando na saída do amplificador um sinal correspondente de $250\text{ mV}/\text{bar}$ com uma impedância de entrada de $100\text{ K}\Omega$.

No sensor, por se tratar de um valor absoluto de pressão, deve ser considerada também a tensão correspondente à pressão atmosférica V_{ATM} no cálculo da pressão final P a ser medida, assim, resultando:

$$P = \frac{V_{OUT}}{A_V \cdot k_P} - \frac{V_{ATM}}{k_P}$$

onde, k_P é a sensibilidade do sensor de pressão.

c) Medição da corrente de feixe

Um amplificador operacional como conversor de corrente para tensão foi utilizado para converter a corrente proveniente dos setores do colimador multi-setor em tensão, que então é entregue as entradas analógicas dos microcontroladores. Conforme a expressão (4), assumindo uma corrente de feixe máxima em cada setor de $50 \mu\text{A}$ e uma tensão de saída de até 5 V , obtém-se uma transresistência $R = 100 \text{ k}\Omega$, onde as impedâncias de entrada e de saída são aproximadamente iguais a zero.

Como a tensão de saída do conversor de corrente-tensão é negativa para uma corrente de entrada positiva (v. item 2.4.1), é acrescentado uma etapa inversora de ganho unitário utilizando um outro amplificador operacional. Assim, uma variação de corrente de entrada de 0 a $50 \mu\text{A}$ apresentará na saída uma variação de tensão de 0 a 5 V , necessária às entradas dos conversores A/D dos microcontroladores.

4.3.4.2 Microcontroladores PIC

Entre os microcontroladores existentes atualmente, foram escolhidos os microcontroladores da família PIC, da Microchip^(24, 25), especificamente o PIC16F877 e o PIC16F84A, por serem microcontroladores versáteis, compactos, de baixo custo e disponíveis no mercado nacional.

Os microcontroladores PIC, devido à sua arquitetura diferente conhecida como *Harvard*, são providos de várias vias de comunicação entre CPU e periféricos, permitindo assim, a realização de várias operações simultaneamente, o que implica no aumento considerável na velocidade de execução.

Devido à tecnologia FLASH de memórias, este *chip* pode ser, eletricamente, apagado e regravado diversas vezes, sem a necessidade de apagá-lo por meio de luz ultravioleta, como acontece nos microcontroladores do tipo janela.

Os PICs também utilizam uma tecnologia chamada RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) que faz com que existam poucas instruções de programação (aproximadamente 35 instruções, dependendo do modelo) enquanto que alguns microprocessadores tradicionais chegam a ter mais de 100 instruções.

As principais características técnicas desses componentes são:

PIC16F84

- microcontrolador de 18 pinos;
- 13 portas configuráveis como entrada ou saída;
- 4 interrupções disponíveis;
- 1024 palavras (14 *bits*) de memória FLASH para programação;
- 64 bytes de memória EEPROM (não volátil) interna para dados;
- 68 bytes de memória RAM para uso geral;
- via de programação com 14 *bits* e 35 instruções.

PIC16F877

- microcontrolador de 40 pinos;
- 33 portas configuráveis como entrada ou saída;
- 4 interrupções disponíveis;
- 8192 palavras (14 *bits*) de memória FLASH para programação;
- 256 bytes de memória EEPROM (não volátil) interna para dados;
- 368 bytes de memória RAM para uso geral;
- via de programação com 14 *bits* e 35 instruções;
- Periféricos internos: conversor A/D (10-*bits*), comunicação serial e paralela.

No projeto, os microcontroladores tiveram papel vital, pois fazem todo o interfaceamento entre as grandezas físicas medidas e o microcomputador, ou seja, são responsáveis pela conversão analógico-digital dos níveis de tensão provenientes dos condicionadores de sinais e também pelo envio, via comunicação serial, até um microcomputador.

4.3.4.3 Conversão analógico-digital

O conversor analógico-digital, um periférico interno do microcontrolador PIC16F877, possui 8 entradas analógicas multiplexadas. Trata-se de um conversor de 10-*bits*, ou seja, o nível analógico, através de aproximações sucessivas, resulta num número digital de 10-*bits* correspondente (v. 2.4.3).

O tempo de aquisição mínimo T_{AQ} pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$T_{AQ} = T_{AMP} + T_C + T_{CT}$$

onde,

T_{AMP} é o tempo de resposta da etapa amplificadora do conversor (2 μ s)

T_C é o tempo de carga do capacitor de entrada C_{HOLD} (120 pF)

T_{CT} é o tempo correspondente a temperatura de trabalho $(T-25\text{ }^\circ\text{C}) \cdot 0,05\text{ }\mu\text{s}/^\circ\text{C}$

O tempo de conversão por *bit*, T_{AD} , está diretamente relacionado com a frequência de *clock* do microcontrolador T_{OSC} , dado por: $T_{AD} = 8 \cdot T_{OSC}$

Assim, para o circuito, com uma variação do nível de tensão de entrada de 0 a 5 V, uma impedância de entrada $R_{IN} = 10\text{ K}\Omega$, trabalhando a uma temperatura de 25 $^\circ\text{C}$ e uma frequência de *clock* de 4 MHz⁽²⁴⁾, obtém-se:

resolução: 0,05 V/bit

tempo de aquisição $T_{AQ} = 19,7 \mu\text{s}$

tempo de conversão $T_{AD} = 2 \mu\text{s/bit}$

Como o microcontrolador precisa de $2T_{AD}$ para iniciar a próxima aquisição, são necessários $12T_{AD}$ para converter um dado de 10-bits, ou seja, 24 μs .

Os tempos de aquisição e conversão são considerados na programação dos conversores A/D dos microcontroladores.

Os seguintes passos devem ser seguidos para realizar uma conversão A/D:

- 1) Configurar do módulo A/D (número de entradas analógicas, seleção da entrada analógica e do clock de conversão);
- 2) Esperar o tempo de aquisição necessário;
- 3) Iniciar a conversão;
- 4) Esperar a conversão A/D terminar;
- 5) Ler os registradores;
- 6) Esperar no mínimo 2 T_{AD} para iniciar uma nova aquisição.

Toda seqüência de conversão analógico-digital é implementada via *software* residente nas memórias internas de programação dos microcontroladores.

4.3.4.4 Comunicação serial

São utilizados três padrões de comunicação, a saber: RS-232C, RS-485 e I2C (14, 26, 27).

RS-232C: A comunicação RS-232C, um padrão de comunicação serial assíncrona, é utilizada para transferir dados digitais entre o microcontrolador PIC16F877 do módulo do sistema de perfil e alinhamento do feixe (^{18}F e ^{123}I) e o microcomputador PC.

Para realizar esta função é utilizado um periférico interno do microcontrolador PIC16F877, chamado USART (Receptor/Transmissor Síncrono e Assíncrono Universal).

A taxa de transmissão é definida por um gerador denominado *Baud Rate*, que depende do valor carregado num registrador (SPBRG) do microcontrolador, conforme a expressão:

$$\text{BaudRate} = f_{osc} / [16 \cdot (\text{SPBRG} + 1)] \quad (7)$$

Assim, para uma frequência de *clock* de 4 MHz e o valor para SPBRG = 25⁽²⁴⁾, resulta numa taxa de transmissão entre o microcontrolador PIC16F877 e o microcomputador PC de 9600 bps, realizada em modo *full-duplex*.

Entretanto, existe uma incompatibilidade de níveis de tensão entre o periférico de comunicação do microcontrolador (0 a 5 V - TTL) e o padrão RS-232C (± 3 a ± 12 V) necessário para se comunicar com o microcomputador PC. Para isso é utilizado um *driver* serial bastante conhecido, MAX232A, da Maxim⁽²⁸⁾, que encarrega de converter os níveis lógicos para o padrão RS-232C e vice-versa.

Por se tratar de uma comunicação não-balanceada, a presença de ruídos na linha obriga que a ligação seja feita com um cabo blindado, cujo comprimento não pode ultrapassar 20 m.

RS-485: Este padrão foi utilizado na comunicação entre o microcontrolador do sistema de verificação da homogeneidade do feixe e o microcomputador PC. Trata-se de um sistema de transmissão de dados assíncrono, que usa sinais

diferenciais balanceados, o que torna imune à ruídos, permitindo, com um simples cabo de par trançado, comunicar a longas distâncias (até 1200 m), a altas velocidades.

Para tal, junto ao periférico interno USART do microcontrolador do sistema de homogeneidade do feixe, é utilizado um *driver* serial bidirecional SN75176B, da Texas Instruments⁽²⁹⁾, que encarrega de converter os níveis lógicos TTL para o padrão RS-485 (+12 a -7 V). E assim se comunicando, através de um simples cabo de par trançado, ao microcomputador, onde é utilizado um adaptador RS-232C/RS-485 que faz a conversão do sinal serial RS-485 para o padrão RS-232C. O adaptador ou conversor RS-232C/RS-485 é constituído pelos *drivers* seriais MAX232A e SN75176B (RS-232C/TTL – TTL/RS-485), já mencionados anteriormente. Um terceiro componente, um microcontrolador simples PIC16F84A⁽²⁵⁾, também da Microchip, é utilizado para gerenciar todo o fluxo de dados entre os dois *drivers* para uma perfeita conversão RS-232C/RS-485 e vice-versa.

Assim, da mesma forma, utilizando a expressão (7), para uma frequência de *clock* de 4 MHz e o valor para SPBRG = 12⁽²⁴⁾, resulta numa taxa de transmissão entre o microcontrolador PIC16F877 e o microcomputador PC de 19200 bps, realizada em modo *half-duplex*.

I2C: Abreviação de *Inter-Integrated Circuit*, conhecido como barramento I2C, é atualmente muito difundido nos equipamentos eletro-eletrônicos pela sua versatilidade, rapidez (alta taxa de transferência) e como uma forma de ampliar os recursos de um equipamento. Ao contrário do RS-232C e RS-485, é um sistema de comunicação síncrona, onde é utilizada simultaneamente uma linha de dados e outra para sincronismo dos dados. É indicado para comunicação entre componentes em um mesmo equipamento.

Como o microcontrolador PIC16F877 possui somente 8 entradas analógicas, são utilizados dois microcontroladores com a finalidade de aumentar o número de entradas analógicas de 8 para 16, para adequar a necessidade do projeto de mais entradas analógicas. Assim sendo, a troca de dados entre os

microcontroladores foi realizada via barramento I2C, principalmente pela alta taxa de transmissão entre os microcontroladores de 100.000 bps, estabelecida via *software*.

4.3.4.5 Confecção dos circuitos impressos

Para a confecção das placas de circuito impresso, usadas para acomodar os circuitos eletrônicos desenvolvidos, foi utilizado o método fotográfico⁽³⁰⁾. Similar ao que é utilizado nas indústrias de circuitos impressos, tal método permite fabricar placas com alta densidade de componentes, trilhas de ligação finas e tolerância à deformação do desenho original (*layout*) muito pequena.

Com os materiais utilizados nesse método foi possível produzir placas com acabamento profissional com rapidez e economia, impossíveis de serem obtidas com técnicas convencionais. O processo se baseia no uso de uma resina do tipo foto-positiva. Isso significa que, quando a resina é exposta a uma fonte de luz (ultravioleta de preferência), ela sofre uma transformação química que a torna dificilmente solúvel em seu solvente, no caso álcool etílico.

O *layout* ou o negativo do desenho da placa foi produzido através de um *software* específico para desenho de circuitos impressos. O *layout* foi então impresso numa impressora jato de tinta (ou laser), em transparência, no modo de melhor definição e contraste. De posse do *layout*, o método se resumiu em aplicar a resina foto-positiva sobre toda a superfície da placa virgem e expô-la a uma fonte de luz através do negativo do desenho a ser reproduzido. Em seguida foi feita a revelação em álcool, a decapagem do cobre com cloreto férrico e finalmente a furação para a inserção e soldagem dos componentes eletrônicos.

Nas Figuras 27 e 28 podem ser vistos os diagramas de blocos da instrumentação eletrônica dos sistemas de perfil-alinhamento e homogeneidade, respectivamente.

área exper. 1 - caixa de control. de I/O (Cyclone)

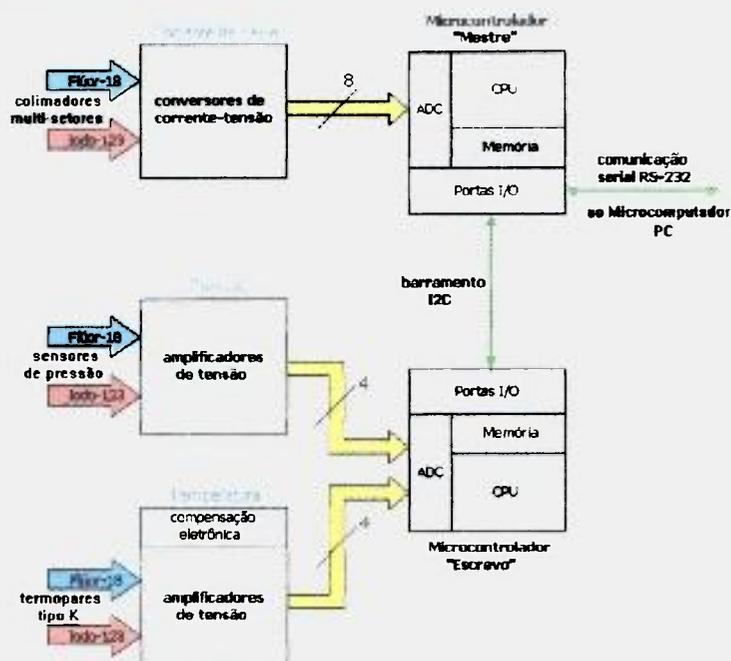


Figura 27 – Diagrama de blocos: Instrumentação eletrônica do sistema de perfil-alinhamento

área exper. 1 - caixa de control. de I/O (Cyclone 301)

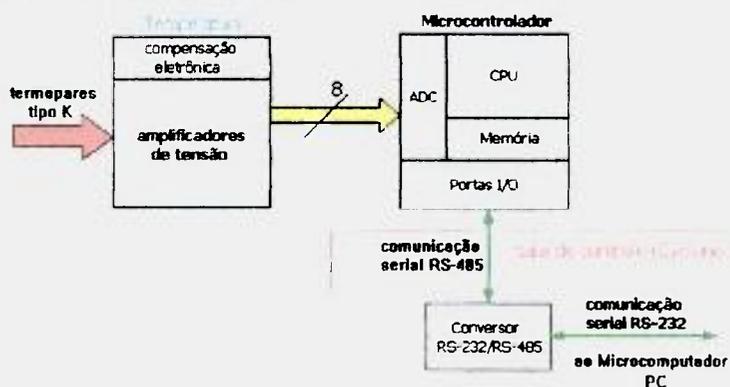


Figura 28 – Diagrama de blocos: instrumentação eletrônica do sistema de homogeneidade do feixe

Os esquemas dos respectivos circuitos eletrônicos se encontram no Apêndice 1 deste trabalho.

4.3.4.6 Software

Todas as operações realizadas pelos microcontroladores (aquisição, conversão analógico-digital, comunicação, etc) foram estabelecidas via programação em linguagem *assembler*, gravado na memória de dados não volátil (EEPROM). Para isso, foi utilizado um aplicativo da Microchip, o MPLAB, que é um *software* com ambiente integrado de estudo e desenvolvimento de programas, juntamente com um gravador, PICLAB, para a família PIC de microcontroladores.

No sistema de perfil-alinhamento do feixe, um programa aplicativo, instalado no microcomputador PC, encarrega de mostrar num monitor, o comportamento do feixe em tempo real pela incidência do feixe nos monitores de perfil, sensores de pressão e termopares, durante a irradiação.

Desenvolvido em Visual Basic 6.0 - Microsoft, o programa possibilita um monitoramento dos parâmetros dos sistemas de perfil e alinhamento, na forma de janelas e objetos (botões, desenhos, etc), ou seja, em ambiente integrado gráfico Windows 32-bit (Figura 29).

O programa, propriamente dito, consiste de três rotinas principais:

- **rotina de comunicação:** É responsável pelo envio de comandos e a transferência de dados entre o módulo eletrônico e o microcomputador, que são armazenados em *buffers*. O padrão de comunicação adotado é o RS-232C, com uma velocidade de transferência de 9600 bps e 8 *bits* de dado.
- **rotina de aquisição:** Faz a leitura dos dados nos respectivos *buffers* dos microcontroladores e o tratamento específico para cada dado recebido (ganho, conversões, etc). O intervalo de aquisição é de 0,5 s.
- **rotina de armazenamento:** Armazena os valores obtidos num arquivo no disco rígido, para análise futura. Trata-se de um arquivo de banco de dados no formato Microsoft Access (*.mdb). Os dados são gravados a cada 2 s.

- **rotina de registro:** Encarrega de registrar os dados na forma de um gráfico (registrador) na tela do monitor. A atualização ocorre a cada 2 s.

Com relação ao programa do sistema de avaliação da homogeneidade do feixe, apesar de ser similar, trabalha independentemente ao programa anterior e foi desenvolvido em Delphi 4 - Borland (Figura 30). A razão de se adotar esta nova ferramenta está na linguagem de programação Pascal, que é compilada, diferente do Basic (que é interpretada), resultando num programa mais rápido e estável. A comunicação deste programa com o microcontrolador é realizada via comunicação RS-485, com uma velocidade de transferência de 19200 bps e 8 bits de dados.

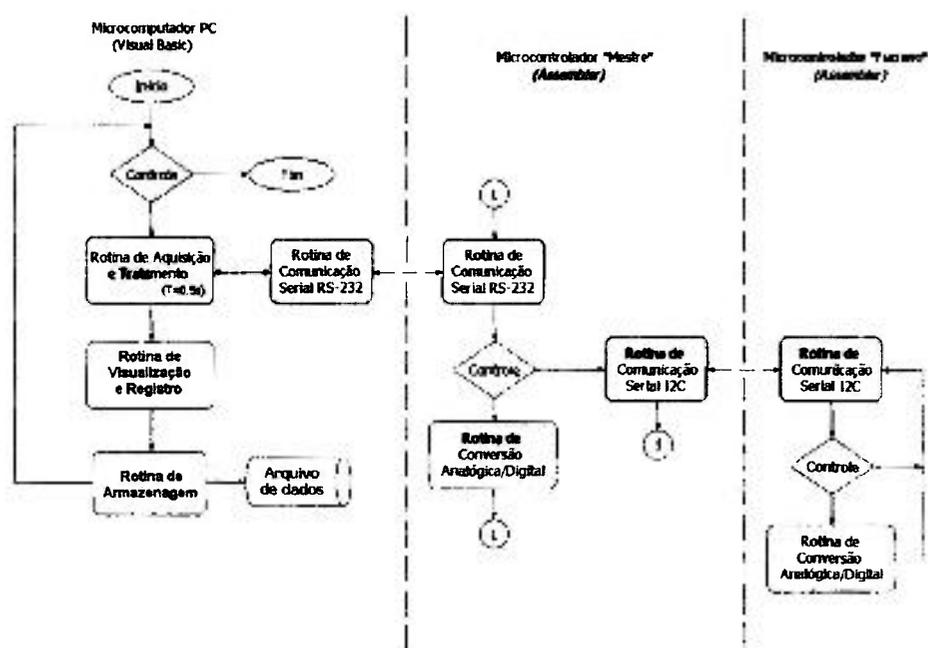


Figura 29 – Fluxograma simplificado do sistema de perfil-alinhamento do feixe

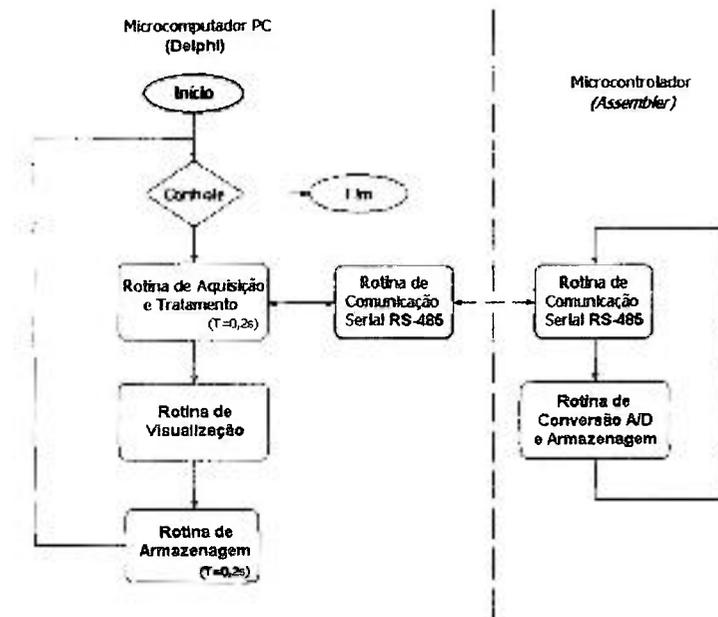


Figura 30 - Fluxograma simplificado do sistema de homogeneidade do feixe

As estruturas de programação podem ser vistas no Apêndice 2. Tratam-se de fluxogramas detalhados dos programas desenvolvidos para os microcontroladores e microcomputador PC.

CAPÍTULO 5

Resultados e discussão

5.1 Sistemas de perfil e alinhamento do feixe

Nesse trabalho, os resultados com relação à monitoração do feixe foram obtidos principalmente durante as produções rotineiras de radioisótopos. No caso do ^{18}F , foram realizadas irradiações com prótons de 18 MeV de energia e com correntes de feixe de $27\ \mu\text{A}$ no alvo. A energia do ciclotron Cyclone 30 foi fixada em 24 MeV. O feixe, antes de atingir a água enriquecida (material-alvo para a produção de ^{18}F), passa por um degradador-espalhador de Al, com 1 mm de espessura, e por duas janelas de Havar, de 25 e 50 μm de espessura, respectivamente.

Para a corrente de feixe utilizada, de $27\ \mu\text{A}$, o rendimento da produção foi melhorado quando o feixe foi espalhado de tal maneira que, cada setor (quatro-setores) apresentou uma corrente de aproximadamente $1\ \mu\text{A}$.

Nos sistemas de alvo-líquido estático, durante a carga do material-alvo, é deixado um espaço na parte superior para permitir que a água expanda na cavidade durante a irradiação⁽⁶⁾. Dessa forma, a condição de perfil de feixe otimizada, ou seja, para o melhor rendimento da produção, foi alcançada quando os setores superior, inferior, esquerdo e direito apresentaram as correntes de feixe próximos de: zero, $1,0\ \mu\text{A}$, $1,5\ \mu\text{A}$ e $1,5\ \mu\text{A}$, respectivamente.

Constatou-se também que, a pressão interna é um indicador importante para o posicionamento do feixe, onde pequenos desvios da condição ideal provocam aumentos imediatos da pressão interna da câmara de irradiação. Esse aumento da pressão pode provocar o rompimento das janelas de Havar e

conseqüentemente a perda do material alvo. No caso, a pressão interna está relacionada com o preenchimento, a forma e o volume do alvo, e também com a penetração do feixe de prótons. Para correntes de feixe de $27 \mu\text{A}$, a pressão interna atingiu aproximadamente 5 bar. Este valor permaneceu relativamente estável durante a irradiação.

A temperatura do gás He de refrigeração das janelas se mostrou bem menos sensível que a pressão, principalmente com relação ao tempo de resposta. Porém, uma vez que o material empregado nas janelas deve apresentar boa condutividade térmica e a temperatura do gás é diretamente proporcional à intensidade de corrente de feixe incidente no alvo, também é interessante monitorar as variações de temperatura do gás refrigerante. No caso, um superaquecimento pode danificar ou até mesmo romper as janelas, e conseqüentemente, a perda do material-alvo. Para a mesma corrente operacional, de $27 \mu\text{A}$, houve um aumento de temperatura de $14 \text{ }^\circ\text{C}$, permanecendo constante durante a irradiação.

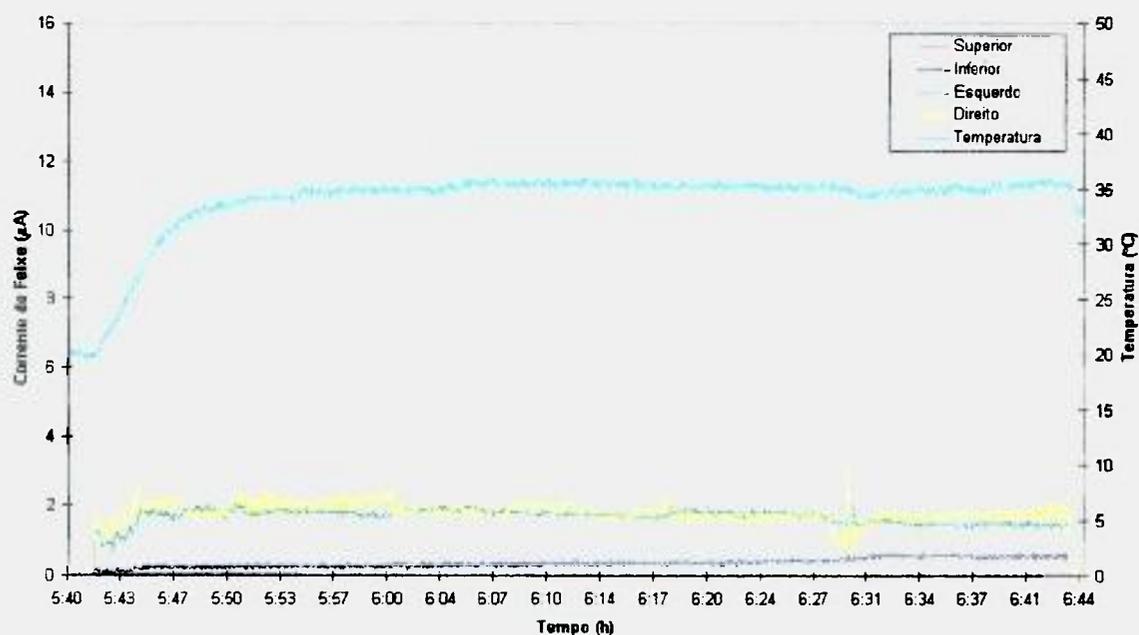


Figura 31 - Registro do perfil de feixe durante uma irradiação do H_2^{18}O para a produção do ^{18}F

A Figura 31 trata-se de um registro das correntes de feixe nos respectivos setores do colimador multi-setor durante uma irradiação para a produção do ^{18}F . Além das pequenas variações no perfil de feixe provocadas pelos ajustes de otimização do feixe no Cyclone 30, percebe-se que o feixe tem uma incidência maior de corrente nos setores laterais. Isto se deve provavelmente a presença do ímã desviador na linha de feixe. Nota-se também o aumento de temperatura de $\sim 14\text{ }^\circ\text{C}$ durante a irradiação.

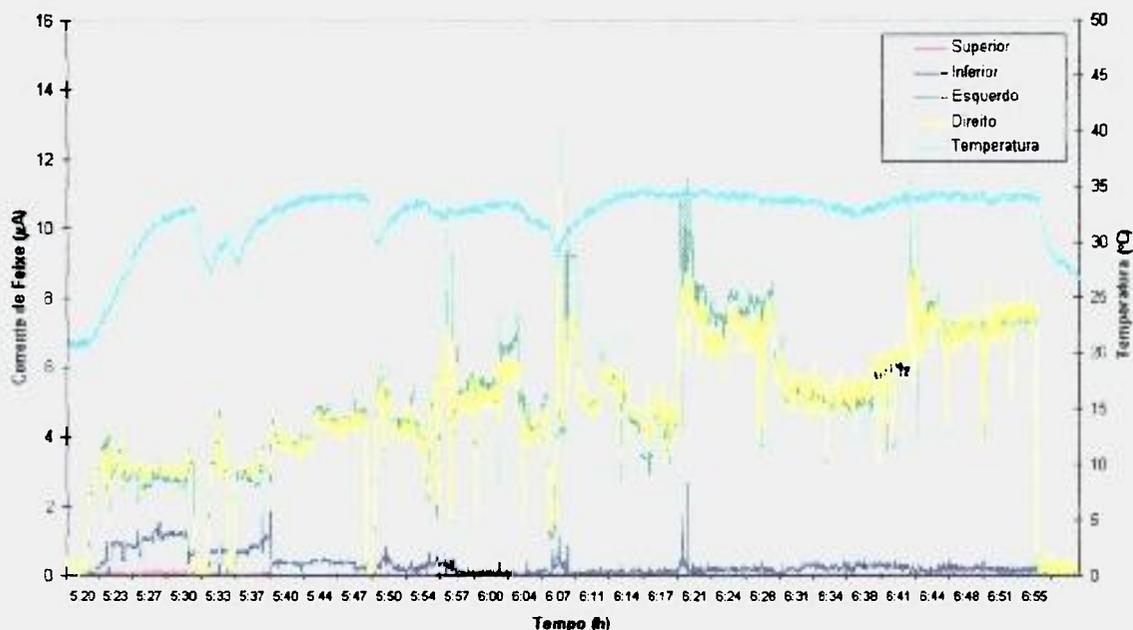


Figura 32 – Alterações no perfil de feixe do ciclotron Cyclone 30

A Figura 32 ilustra o perfil de um feixe durante outra irradiação para a produção do ^{18}F . Comparando-se com a figura anterior, observa-se que o mesmo apresenta uma flutuação e um espalhamento lateral não desejado para esta irradiação. Tal anormalidade foi, em parte, provocada pelos limites operacionais das bobinas de focalização na tentativa de corrigir o efeito, sendo a causa principal provocada por ondas estacionárias no sistema de radiofrequência do ciclotron.

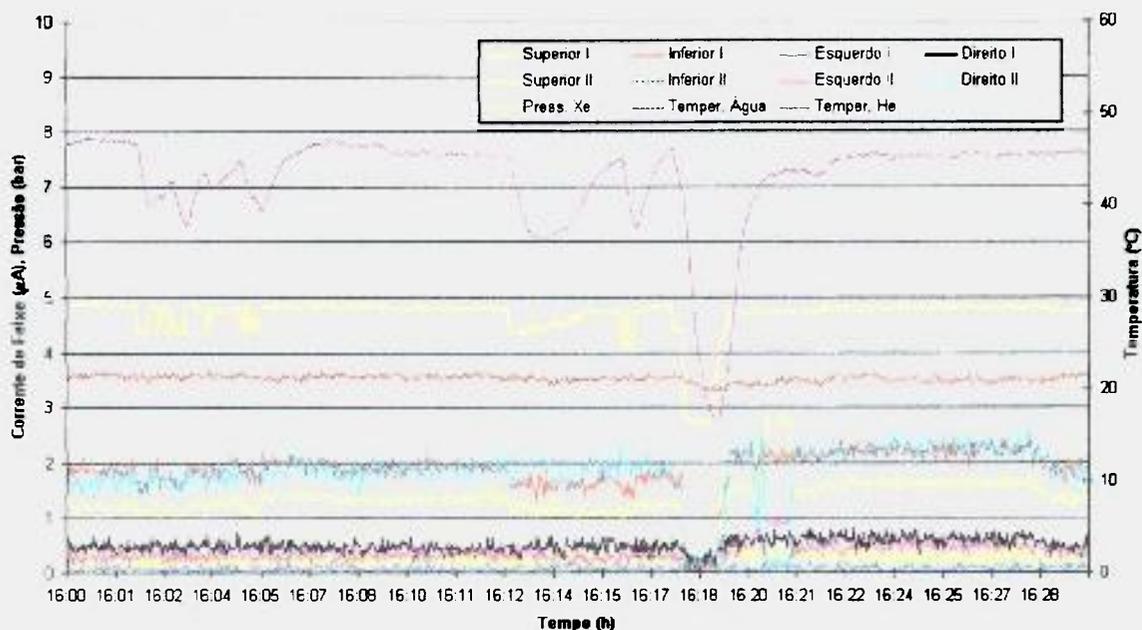


Figura 33 - Registro dos parâmetros – Sistema de alinhamento de feixe

A Figura 33 trata do registro dos parâmetros do sistema de alinhamento de feixe instalado junto ao sistema de irradiação de alvos gasosos (^{123}I). Assim como no sistema do ^{18}F , a pressão do gás da câmara cilíndrica de irradiação se mostrou sensível às variações do perfil de feixe. Para as condições operacionais de irradiação para a produção do ^{123}I , com correntes feixes de $17\ \mu\text{A}$ no alvo e $30\ \text{MeV}$ de energia, a pressão interna da câmara cilíndrica atingiu aproximadamente $5\ \text{bar}$. Também houve o aumento da temperatura do gás He e da água de refrigeração de $9\ ^\circ\text{C}$ e $26\ ^\circ\text{C}$, respectivamente. Nota-se também uma interrupção da irradiação provocada pela instabilidade no sistema de radiofrequência.

Com o feixe otimizado para a melhor eficiência de transporte na linha de feixe, e com os valores observados durante a irradiação, constatou-se nesse caso, um pequeno desvio no alinhamento do sistema de irradiação. Na Tabela 4 pode-se observar que existe uma incidência maior de feixe em determinados setores dos respectivos colimadores de quatro-setores. Assim, tomando como referência o sentido do feixe (ciclotron-alvo), verifica-se que o sistema de

alinhamento que contem o alvo está com uma inclinação negativa e levemente deslocada para a esquerda.

Tabela 4 – Corrente de feixe média em cada setor dos colimadores multi-setores.

setores		Corrente de Feixe (μA)	
		Colimador I	Colimador II
vertical	superior	0,2	1,4
	inferior	1,9	0,0
horizontal	esquerdo	0,1	0,4
	direito	0,5	1,8

Na Figura 34 podem ser vistas as telas (janelas) do programa de monitoração do perfil e alinhamento do feixe, referentes aos sistemas de irradiação para a produção do ^{18}F e ^{123}I , respectivamente. Nas janelas podem ser visualizadas, em tempo real, temperaturas do gás He e da água de refrigeração, pressões internas da câmara de irradiação dos sistemas de irradiação e correntes de feixe em cada setor dos colimadores multi-setores, bem como o registro do comportamento do perfil de feixe.

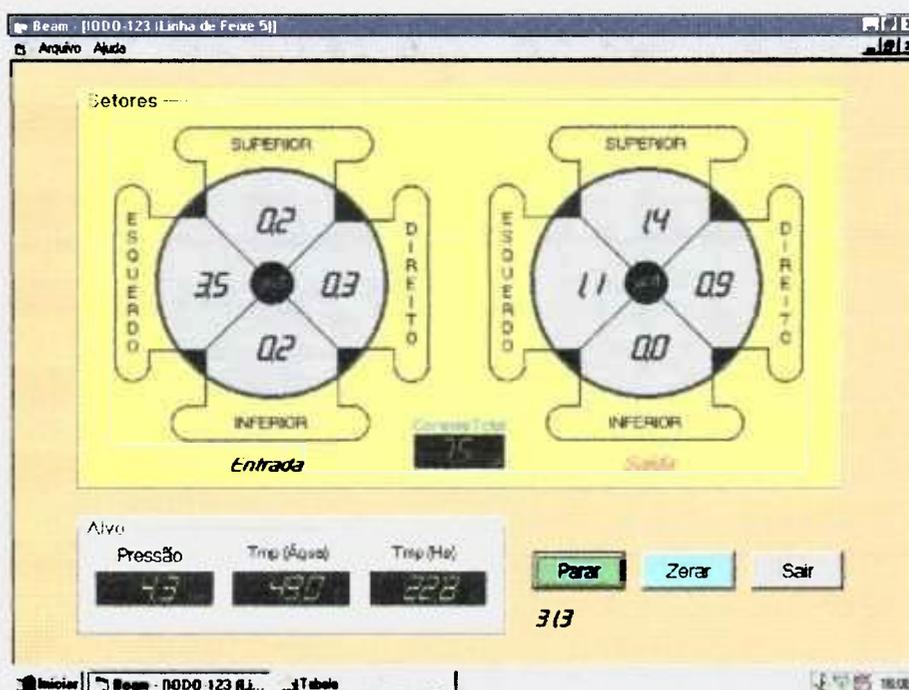
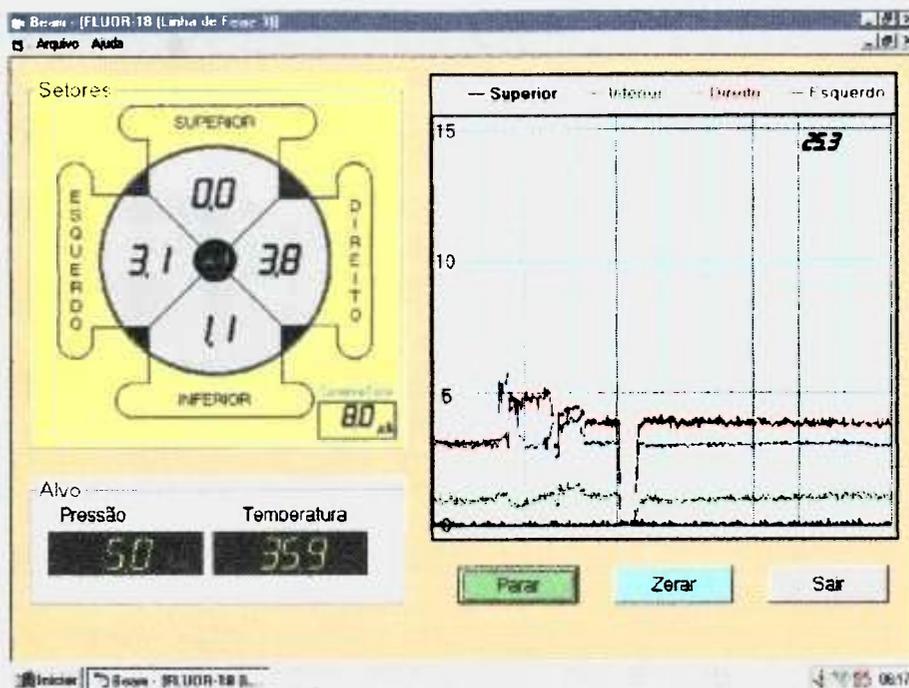


Figura 34 - Telas do programa de monitoração dos sistemas de perfil e alinhamento do feixe

5.2 Avaliação da homogeneidade do feixe do ciclotron CV-28

Com relação à homogeneidade do feixe, uma técnica similar a que foi desenvolvida por Wieland⁽¹⁵⁾, foi utilizada na análise da homogeneidade de feixe do ciclotron CV-28 do IPEN-CNEN/SP.

No caso do ciclotron CV-28, a homogeneidade foi avaliada através de reações monitoras induzidas por prótons em cobre natural. Entre o feixe e a folha colocou-se uma flange de alumínio que permitiu a ativação da folha de cobre apenas em sete pontos distintos. A medida das atividades desses pontos forneceu, portanto, um “mapeamento” da intensidade do feixe na área delimitada pelo colimador com abertura de 10 mm de diâmetro.

Primeiramente, na análise da homogeneidade do feixe, foi feita uma irradiação, com prótons de 24 MeV e corrente de feixe média de 0,87 μA , durante 69 minutos (dose integrada de 1 μAh). Com o feixe desfocalizado, a corrente foi de 0,4 μA em cada região. Os valores indicados apresentaram uma homogeneidade de feixe que variou em torno de 20 % entre os pontos, com uma determinada tendência de apresentar menor intensidade na parte inferior da amostra. Esta tendência acentuou-se quando a irradiação foi realizada com correntes de feixe maiores. Com uma corrente média de 7,6 μA , durante 33 minutos (dose 4,2 μAh), observou-se que existe um fator 2 entre o ponto mais ativo e o menos da amostra, evidenciado na parte inferior da área irradiada. Assim, como na irradiação anterior, a corrente em cada setor foi de aproximadamente 0,4 μA . Esse decréscimo de corrente na parte periférica do alvo já era esperado, pois o aumento da faixa de corrente torna o feixe mais focalizado, fazendo com que atinja com maior intensidade a região central do alvo.

Na Figura 35 nota-se o resultado final, cujas percentagens apresentadas representam os valores normalizados em relação ao ponto central, sendo que cada um desses valores é a média das atividades medidas, referentes aos fotopicos de ^{65}Zn e ^{65}Zn de energia de 548, 596 e 1115 keV, respectivamente. Nela, pode-se visualizar a distribuição percentual da homogeneidade do feixe de

prótons ao longo das amostras irradiadas com correntes nominais de $1 \mu\text{A}$ e $10 \mu\text{A}$ respectivamente.

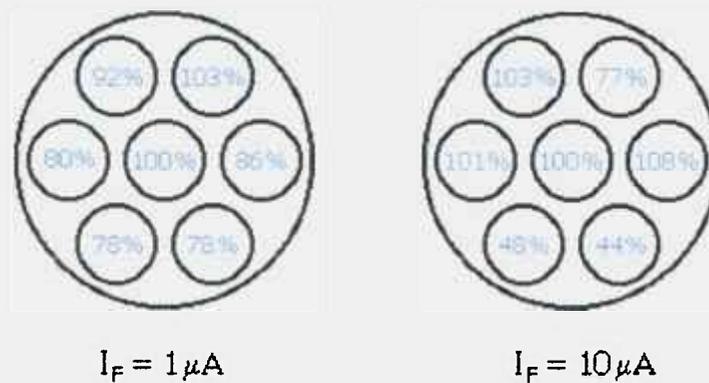


Figura 35 – Distribuição percentual das atividades induzidas nas duas folhas de Cu ativadas com correntes nominais de $1 \mu\text{A}$ e $10 \mu\text{A}$ respectivamente.

Esta técnica não foi aplicada na avaliação da homogeneidade do feixe do ciclotron Cyclone 30, pois os resultados são obtidos somente após a análise dos dados com o detector de Ge-hiperpuro. Isto significa que, a fixação dos parâmetros operacionais do ciclotron é imposta ser reprodutível, em função da irradiação de avaliação, o que nem sempre é verdadeiro.

5.3 Avaliação da homogeneidade do feixe do ciclotron Cyclone 30

Uma otimização da técnica mencionada acima e similar a desenvolvida por DeVinney *et al*⁽¹⁹⁾, empregando termopares distribuídos em pontos previamente determinados na superfície de um alvo, foi utilizada na avaliação da homogeneidade do feixe do ciclotron Cyclone 30 (v. item 4.3.2b). A temperatura foi monitorada durante a fixação dos parâmetros de ajustes do feixe, possibilitando verificar a homogeneidade do feixe de forma rápida, segura, independente do número de testes e em tempo real.

Esse sistema de avaliação da homogeneidade do feixe foi instalado na saída 1 do distribuidor magnético (linha destinada ao condicionamento do cíclotron e treinamento de pessoal).

No caso, foi utilizado um colimador com abertura de 10 mm para limitar a área irradiada, onde os termopares estão posicionados. Nos testes, foi fixada a energia em 15 MeV e variou-se a corrente de feixe (15 μ A e 30 μ A). O feixe otimizado consistiu no compromisso entre a razão das correntes no alvo e na saída do cíclotron (eficiência de transferência), o que implica na fixação de parâmetros para as bobinas de focalização e centralização e para a fonte de íons. Assim, com o feixe otimizado para melhor eficiência de transferência, de 66 %, e inicialmente, com uma corrente de feixe média de 15 μ A, a homogeneidade do feixe variou no máximo de 11 % em relação ao ponto central, conforme pode ser visto na Figura 36a. Observou-se também que o feixe apresenta uma concentração maior na região esquerda-inferior. Da mesma forma, com a mesma eficiência de transferência de 66 %, esta tendência acentuou-se quando aumentou-se a corrente de feixe para 30 μ A. A homogeneidade do feixe variou de 19 % em relação ao ponto central mantendo o mesmo perfil de feixe, conforme a Figura 36b. Este aumento para 19 % na homogeneidade é considerado normal, pois o aumento da faixa de corrente torna o feixe mais focalizado, fazendo com que atinja com maior intensidade no alvo.

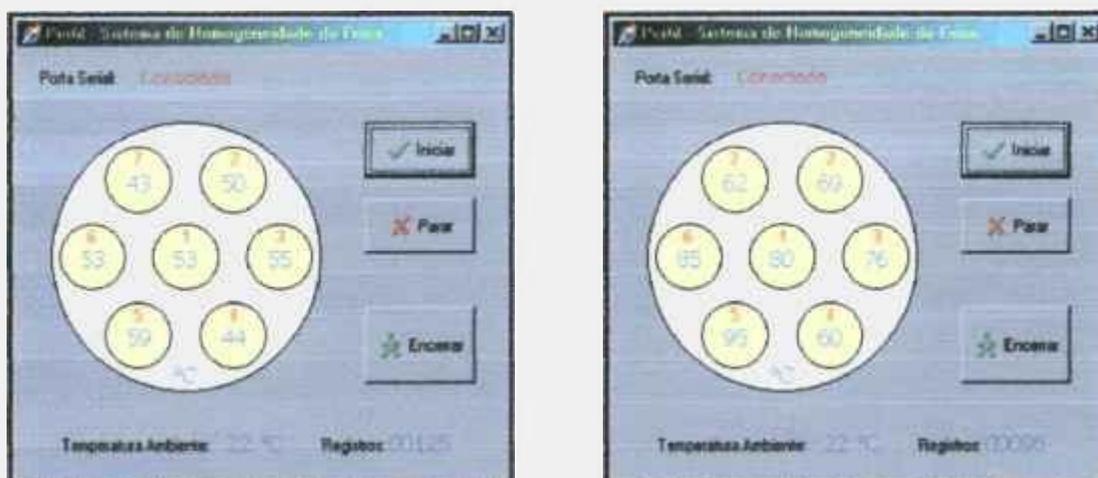
a) $I_F = 15 \mu\text{A}$, $E = 15 \text{ MeV}$ b) $I_F = 30 \mu\text{A}$, $E = 15 \text{ MeV}$

Figura 36 - Telas do sistema de avaliação da homogeneidade do feixe.

a) Irradiação com corrente de feixe $15 \mu\text{A}$ e energia de 30 MeV

b) Irradiação com corrente de feixe $30 \mu\text{A}$ e energia de 30 MeV

Esta tendência de concentração na região esquerda-inferior pode ser visualizada nas figuras 37a e 37b, que ilustram as variações percentuais em relação ao ponto central. Na Figura 37c, observa-se a variação percentual de cada ponto com o seu correspondente quando se aumentou a corrente de $15 \mu\text{A}$ para $30 \mu\text{A}$. Na região de maior incidência de feixe, os valores de temperatura variaram entre 151% e 161% . Nos demais, permaneceram em torno de 140% .

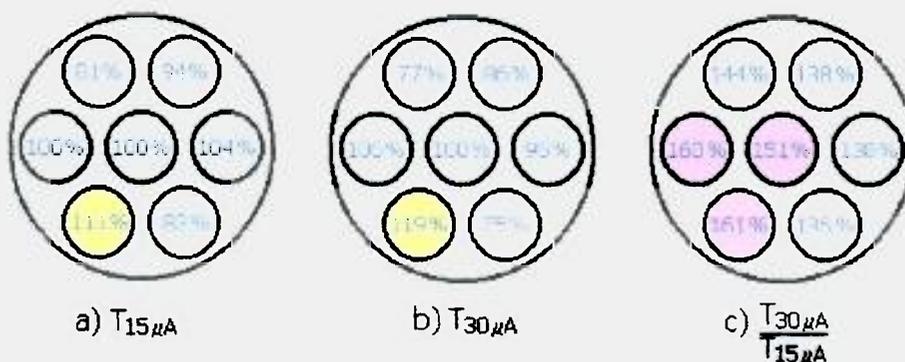
a) $T_{15\mu\text{A}}$ b) $T_{30\mu\text{A}}$ c) $\frac{T_{30\mu\text{A}}}{T_{15\mu\text{A}}}$

Figura 37 - Variações percentuais das temperaturas em relação ao ponto central:

a) Corrente de feixe igual a $15 \mu\text{A}$ e b) Corrente de feixe igual a $30 \mu\text{A}$.

c) Variação percentual de cada ponto correspondente (15 e $30 \mu\text{A}$)

Notou-se que, variando-se os valores das bobinas de focalização e de centralização do feixe para uma melhor distribuição de temperatura, a eficiência de transferência diminui acentuadamente, o que comprometeu o valor da corrente efetiva no alvo. Isto é fundamental no rendimento de produção do radioisótopo, que é função da intensidade de corrente no alvo.

Este dispositivo é de grande valia para treinamento de pessoal na operação de cíclotrons, pois pequenas mudanças de qualquer parâmetro operacional, ou seja, sua influência no posicionamento do feixe em relação à área irradiada, pode ser vista em tempo real. Desta maneira, o iniciante na operação do cíclotron pode realmente visualizar o que acontece com o feixe em relação à mudança de qualquer parâmetro operacional.

5.4 Energia do feixe de prótons do cíclotron Cyclone 30

No presente trabalho, a avaliação da energia do feixe foi realizada por análise de ativação por prótons através de reações monitoras em cobre natural utilizando a técnica descrita por Kopecký ⁽²¹⁾.

A energia média do feixe incidente foi determinada comparando-se a razão das atividades induzidas de ⁶²Zn e ⁶⁵Zn produzidas simultaneamente na folha de cobre com a razão de suas seções de choque de referência (valores estabelecidos na literatura ⁽²¹⁾).

Uma vez que as correntes de feixe correspondentes às atividades dos dois radionuclídeos monitores produzidos simultaneamente devem ser iguais, para tempos de exposição curtos com relação às meias-vidas, pode-se estabelecer:

$$\sigma_R = \frac{\sigma_{62}}{\sigma_{65}} = \frac{A_{62} \cdot \left(\frac{T_{1/2}}{T} \right)_{62}}{A_{62} \cdot \left(\frac{T_{1/2}}{T} \right)_{65}}$$

onde, A_{62} e A_{65} são as respectivas atividades de ^{62}Zn e ^{65}Zn corrigidas para o final da irradiação e $T_{1/2}$, as meias-vidas.

Dessa forma, a energia média do feixe na folha monitora foi calculada pela seguinte expressão:

$$\sum k_i E^i = [A_{62} \cdot (T_{1/2})_{62}] / [A_{65} \cdot (T_{1/2})_{65}] \quad i = 0-3$$

onde E é a energia média na folha de cobre, A_{62} e A_{65} são as respectivas atividades de ^{62}Zn e ^{65}Zn corrigidas para o final da irradiação, $T_{1/2}$, as meia-vidas e k_i , os parâmetros do polinômio, determinados experimentalmente por Kopecký pelo ajuste do gráfico das seções de choque de referência em função da energia do próton.

Para tal, empregando a técnica do empilhamento, foram realizadas irradiações com duração de aproximadamente 12 minutos e com corrente média de feixe de 1 μA , obtendo os seguintes resultados conforme a Tabela 5:

Tabela 5 – Resultados obtidos na determinação da energia do feixe ciclotron Cyclone 30 no experimento 1

Primeiro Experimento:

Folha de cobre		Atividade		Energia média na folha de Cu		
ordem	espessura (μm)	^{62}Z (Bq)	^{65}Z (Bq)	obtida (MeV)	calculada (MeV)	diferença (%)
1)	50	$1,98 \times 10^6$	628	28,2	30 (nominal)	6,0
2)	50	$1,85 \times 10^6$	1349	19,9	22,6	11,9

Tabela 6 – Resultados obtidos na determinação da energia do feixe
ciclotron Cyclone 30 no experimento 2

Segundo Experimento:

Folha de cobre		Atividade		Energia média na folha de Cu		
ordem	espessura (μm)	^{62}Z (Bq)	^{65}Z (Bq)	obtida (MeV)	calculada (MeV)	diferença (%)
1)	50	$3,88 \times 10^6$	$1,28 \times 10^3$	28,7	30 (nominal)	4,3
2)	50	$4,60 \times 10^6$	$2,30 \times 10^3$	20,9	23,6	11,4

Verifica-se que as energias medidas nas folhas de cobre do segundo experimento estão de acordo com as obtidas no primeiro e é inferior aos 30 MeV indicados pelo fabricante.

Portanto, a partir da energia obtida, ~ 28 MeV, as degradações sucessivas da energia do feixe nas respectivas folhas de Cu, Ni/Zr, Al e Cu foram recalculadas, resultando nos valores de energia conforme a Figura 38. Pela figura, as energias recalculadas para as segundas folhas de cobre, 20,1 MeV e 20,7 MeV, estão de acordo com as medidas para estas mesmas folhas, 19,9 MeV e 20,9 MeV, conforme as Tabelas 5 e 6.

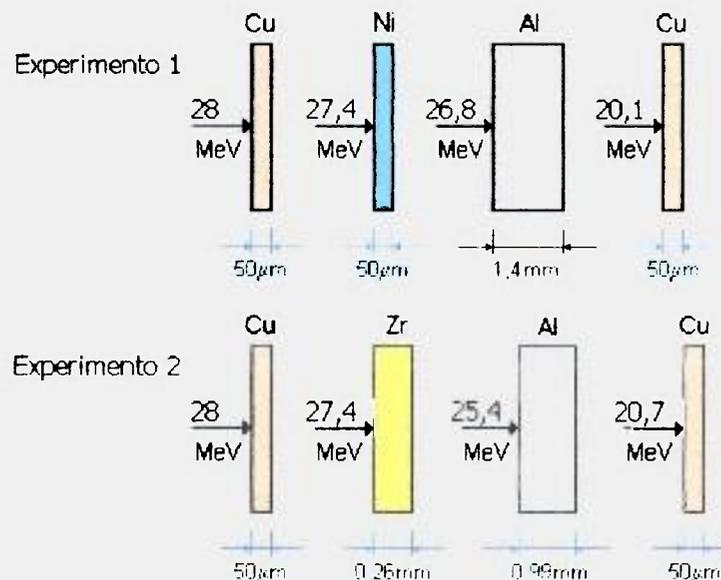


Figura 38 – Degradações da energia do feixe corrigidas para 28 MeV

CAPÍTULO 6

Conclusões

No Centro de Aceleradores Cíclotrons, devido à produção rotineira de radioisótopos, buscou-se desde o início, conciliar a realização da parte experimental do plano de trabalho com as irradiações para as produções de ^{18}F e ^{123}I .

Por motivos circunstanciais, devido à dificuldade em obter dispositivos e equipamentos complexos, sofisticados, importados e de custo elevado normalmente empregados para diagnósticos de feixe em aceleradores, procurou-se obter resultados utilizando dispositivos e equipamentos de construção relativamente simples, porém, confiáveis, baseados na experiência do dia-a-dia e na tecnologia atual disponível no mercado nacional, dando lugar à imaginação e invenções. Praticamente, pode-se dizer que toda a parte experimental envolvida nesse trabalho foi desenvolvida no IPEN.

Apesar da disponibilidade de equipamentos e *softwares* similares no mercado, optou-se pelo desenvolvimento de toda a instrumentação eletrônica e também da programação (interfaces analógicas, de conversões digitais, aplicativos de programa, etc). Além de reduzir significativamente o custo do projeto, proporcionou experiência no uso de tecnologias modernas e sofisticadas de instrumentação eletrônica e de aquisição remota de dados. Os microcontroladores utilizados neste trabalho são, atualmente, muito empregados em projetos de equipamentos de automação de processos por suas excelentes características e recursos disponíveis, tornando possível o desenvolvimento de sistemas compactos e baratos, embora complexos e sofisticados. O padrão de comunicação serial RS-485, tem sido empregado cada vez mais nas redes de automação industrial (*Fieldbus*), permitindo a transmissão de dados em altas taxas, a longas distâncias (até 1200 m), e são praticamente imunes a ruídos devido à transmissão diferencial, dispensando o uso de cabos blindados,

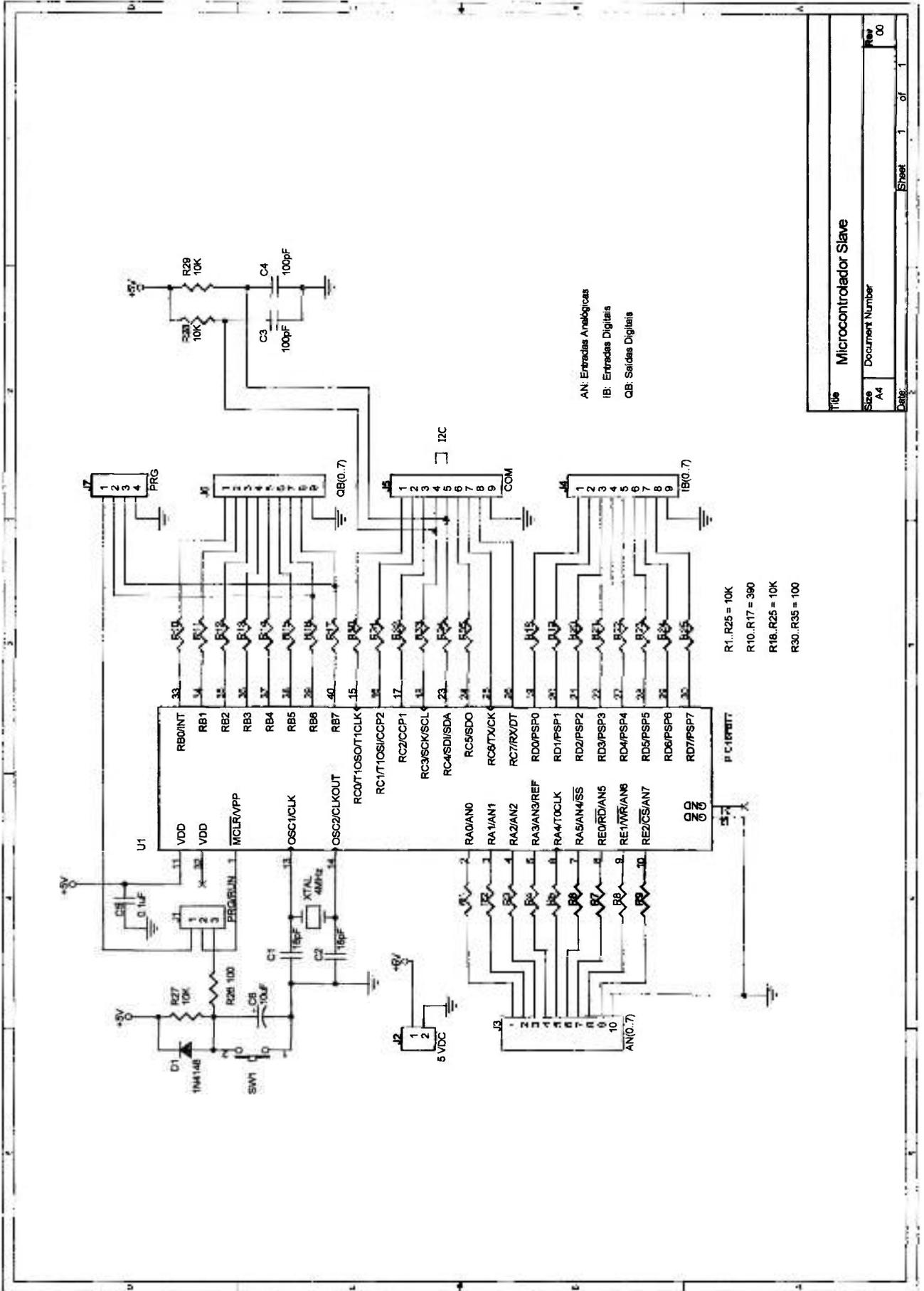
utilizando-se apenas um cabo de par trançado (fios comuns trançados). A aquisição remota de dados do sistema de monitoração do feixe através da comunicação serial RS-485 permitiu diminuir a quantidade de cabos longos nos eletrodutos e conseqüentemente minimizar a interferência a ruídos. Portanto, a experiência adquirida nesse trabalho no uso de tecnologias modernas de instrumentação e controle, trouxe benefícios importantes que também serão aplicados em outros projetos nos cíclotrons do IPEN.

Desde a sua instalação, os sistemas de monitoração de feixe fazem parte das irradiações para a produção rotineira de ^{18}F e ^{123}I e no treinamento de pessoal, auxiliando os operadores do Cyclone 30 no processo de otimização do feixe no alvo, uma vez que, qualquer presença de "pontos quentes" na área irradiada pode provocar o rompimento das janelas de Havar e conseqüentemente a perda do material-alvo, um material isotopicamente enriquecido e de custo elevado, cerca de U\$ 200/g (H_2^{18}O) e 20.000/carga (^{124}Xe). É importante mencionar que, em sistemas de irradiação de alvos líquidos ou gasosos, além da perda de material-alvo provocado pelo rompimento das janelas decorrentes da existência desses "pontos quentes", tal fato pode levar a mudanças bruscas de pressão tanto na linha de feixe como também no próprio cíclotron, comprometendo a sua integridade operacional. O custo aproximado de um Cyclone 30 é de U\$ 5.000.000,00.

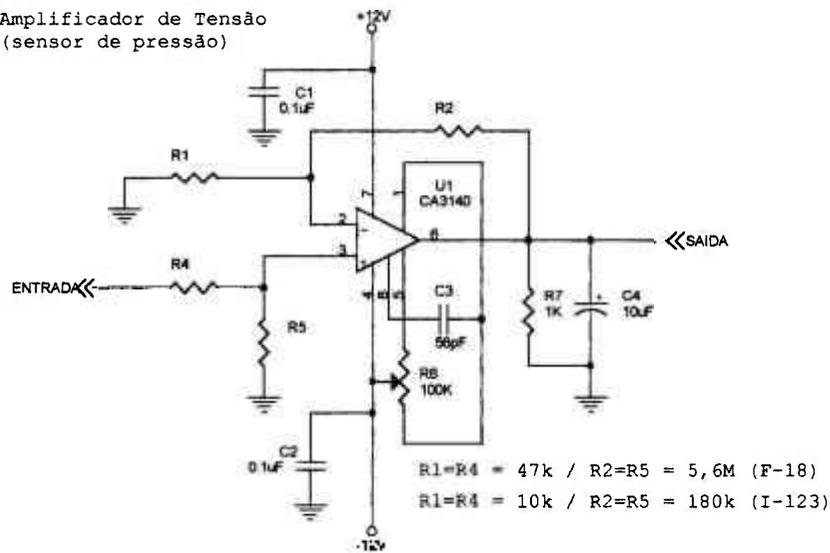
Portanto, devido o alto custo envolvido no processo de produção de um radioisótopo, buscou-se meios técnicos que resultassem na maior segurança operacional e confiabilidade durante as irradiações e, conseqüentemente uma garantia na qualidade do produto final, no caso, o radioisótopo. Assim, a partir dos resultados obtidos, comprovou-se que as manifestações do feixe, observadas através dos parâmetros monitorados nos sistemas (perfil, alinhamento, etc) estão diretamente relacionados às variações reais no comportamento do feixe durante as irradiações. Dessa forma, tem-se buscado a otimização do feixe a partir desses parâmetros monitorados, o que permite um controle maior sobre as variáveis de irradiação, evitando assim, danos que possam comprometer a integridade da instalação.

Apêndice 1

Esquemas dos circuitos eletrônicos

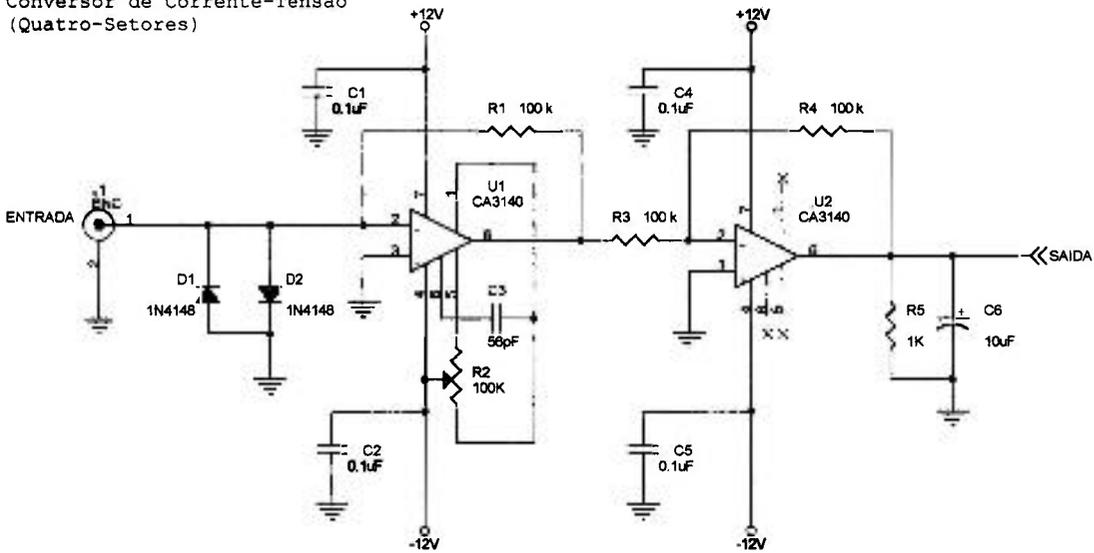


Amplificador de Tensão
(sensor de pressão)



Title		
Amplificador de Tensão - Pressão		
Size	Document Number	Rev
A4		00
Date:	Sheet	1 of 1

Conversor de Corrente-Tensão
(Quatro-Setores)

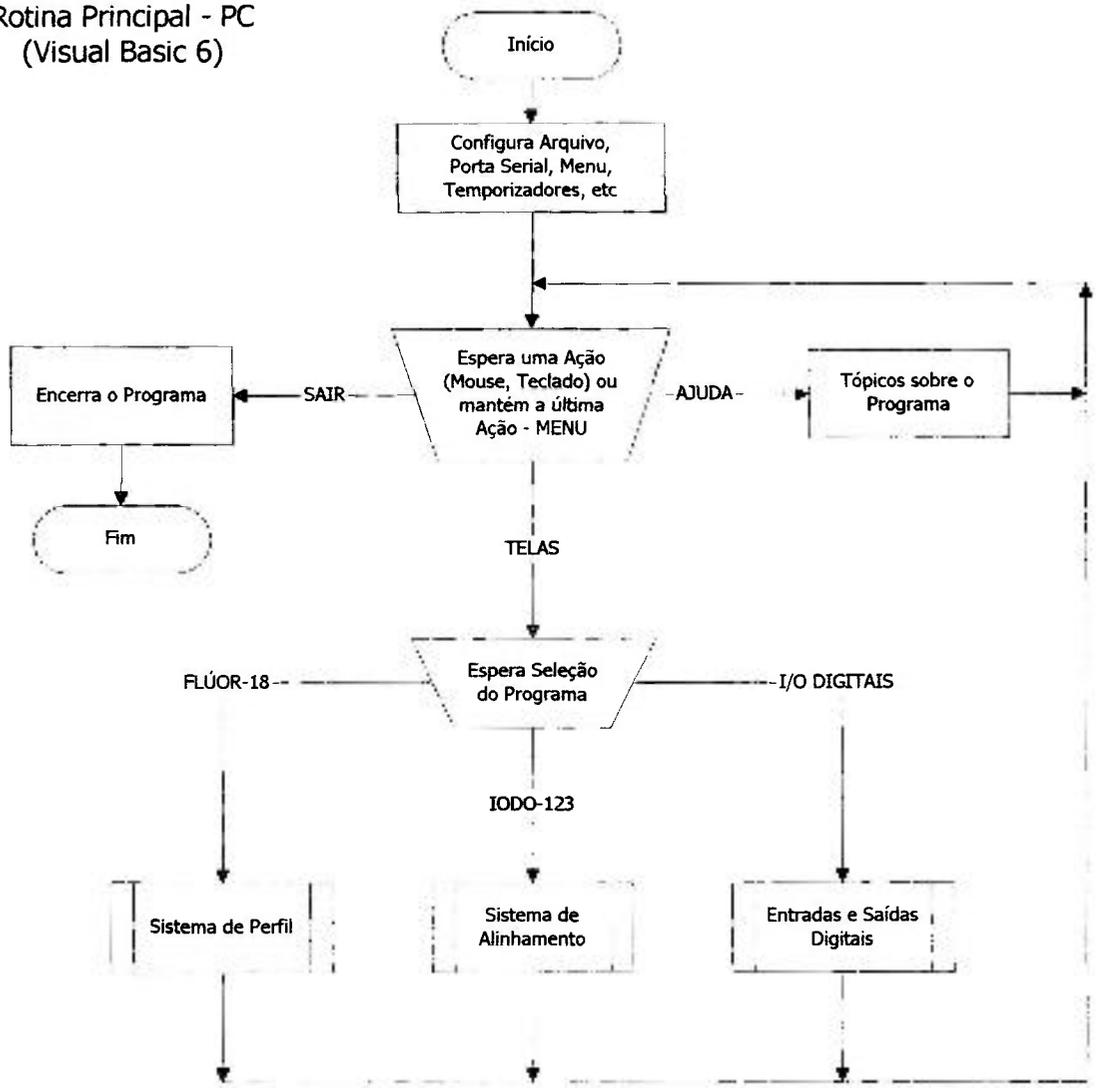


Title		
Conversor de Corrente-Tensão		
Size	Document Number	Rev
A4		00
Date:	Sheet	1 of 1

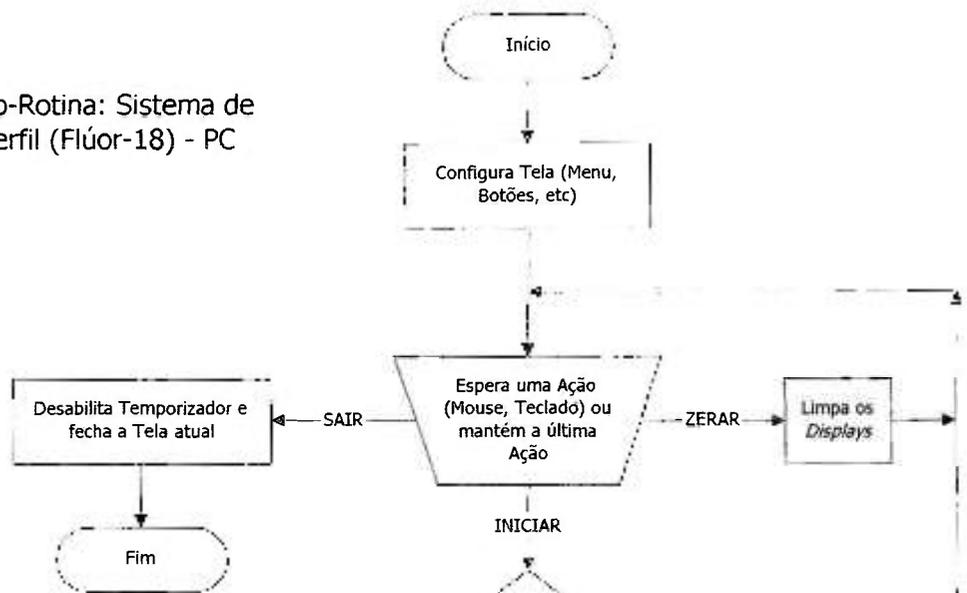
APÊNDICE 2

a) Fluxogramas do Sistema de Perfil-Alinhamento de Feixe

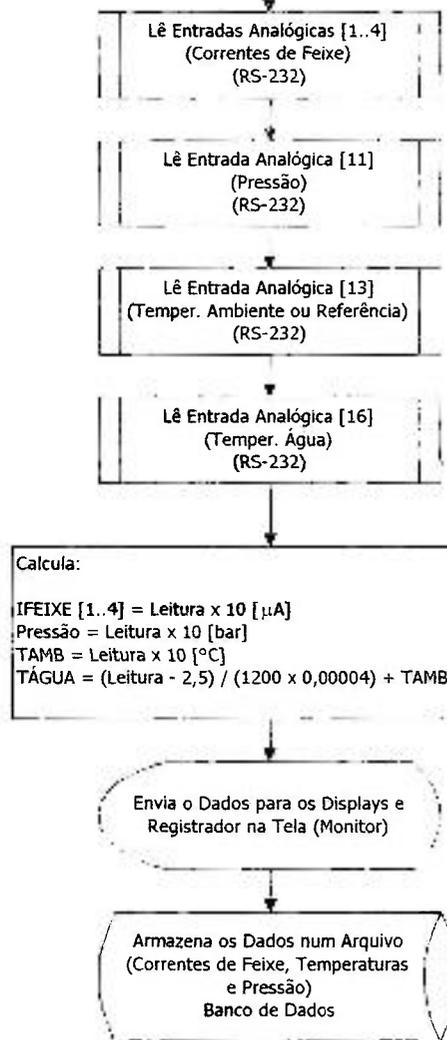
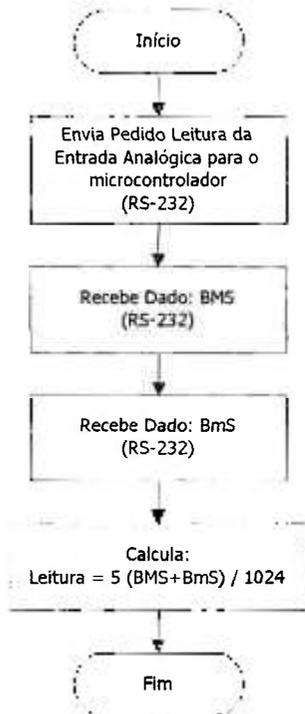
Rotina Principal - PC
(Visual Basic 6)



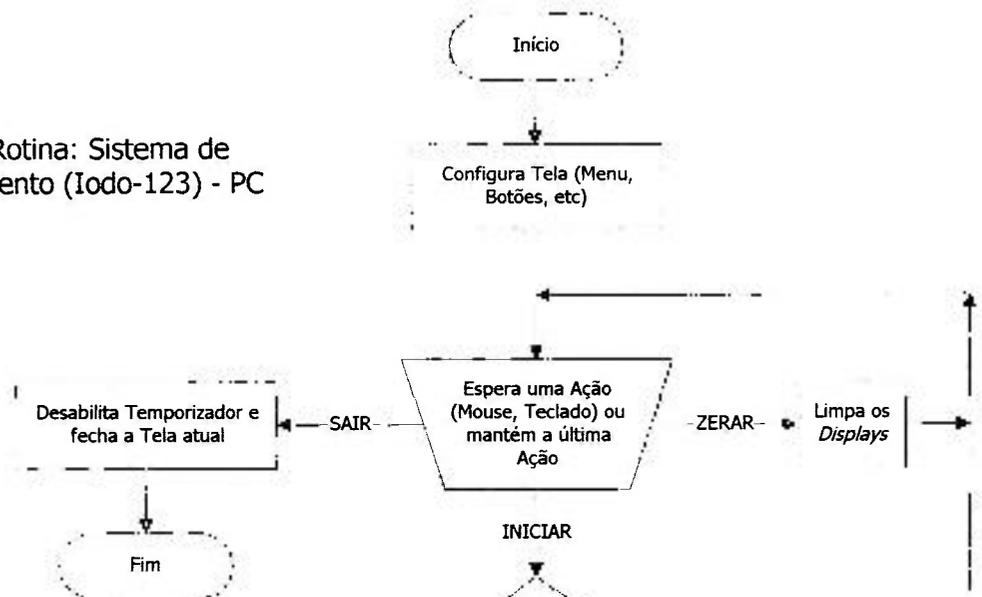
Sub-Rotina: Sistema de Perfil (Flúor-18) - PC



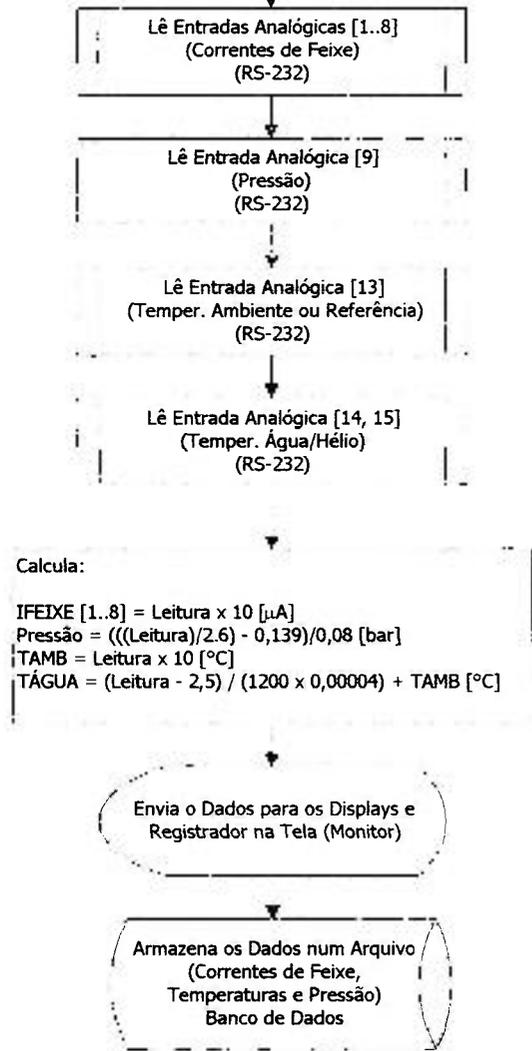
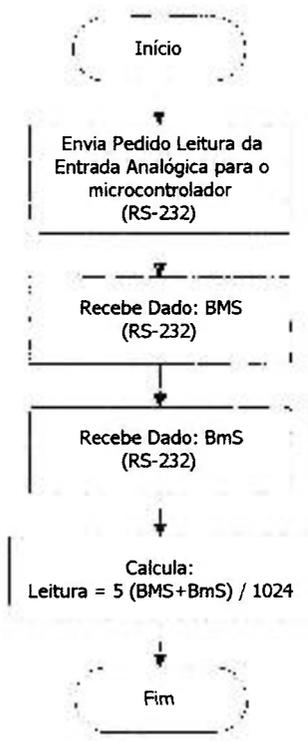
Sub-Rotina de Pedido de Leitura Analógica



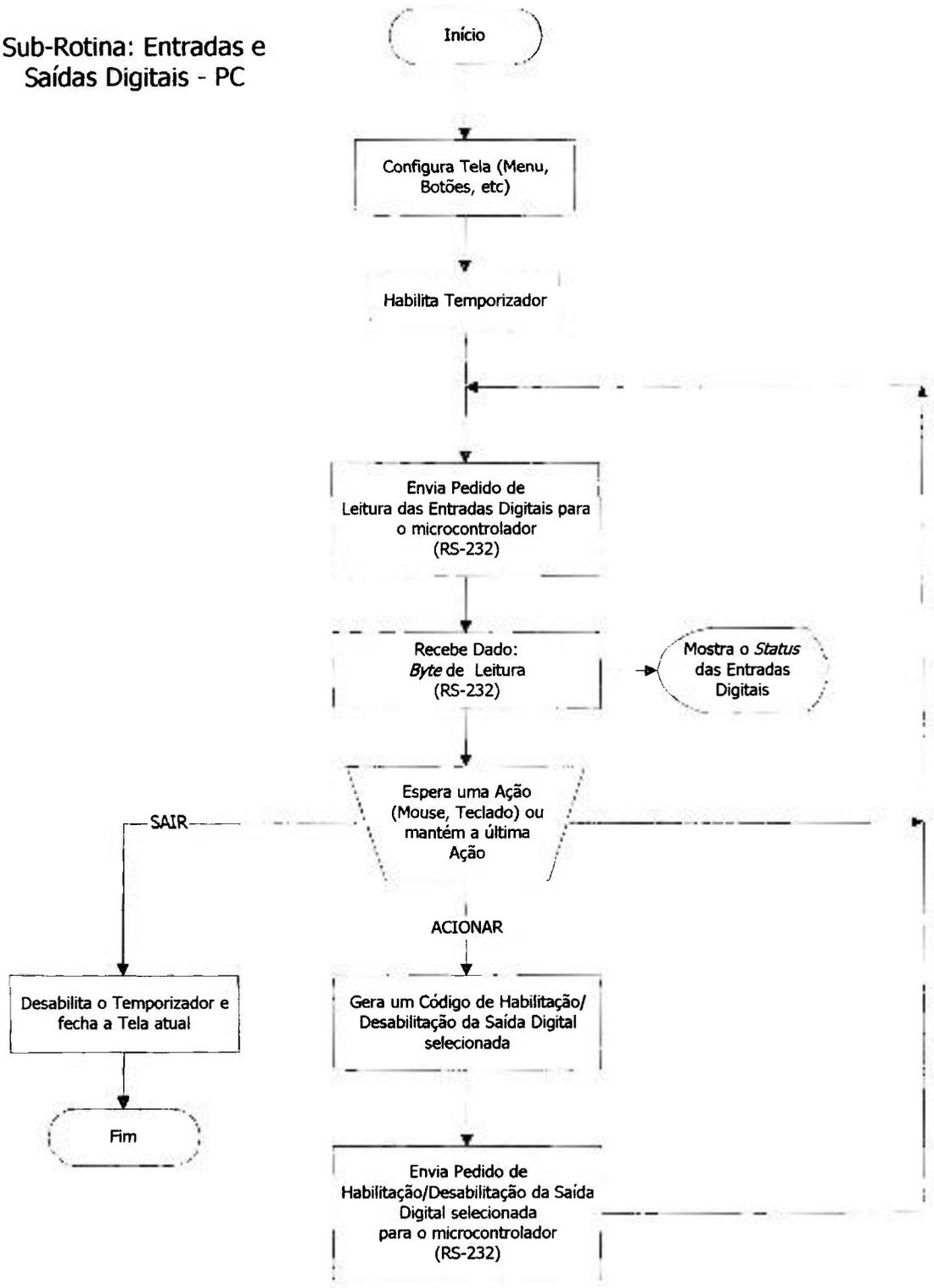
Sub-Rotina: Sistema de Alinhamento (Iodo-123) - PC



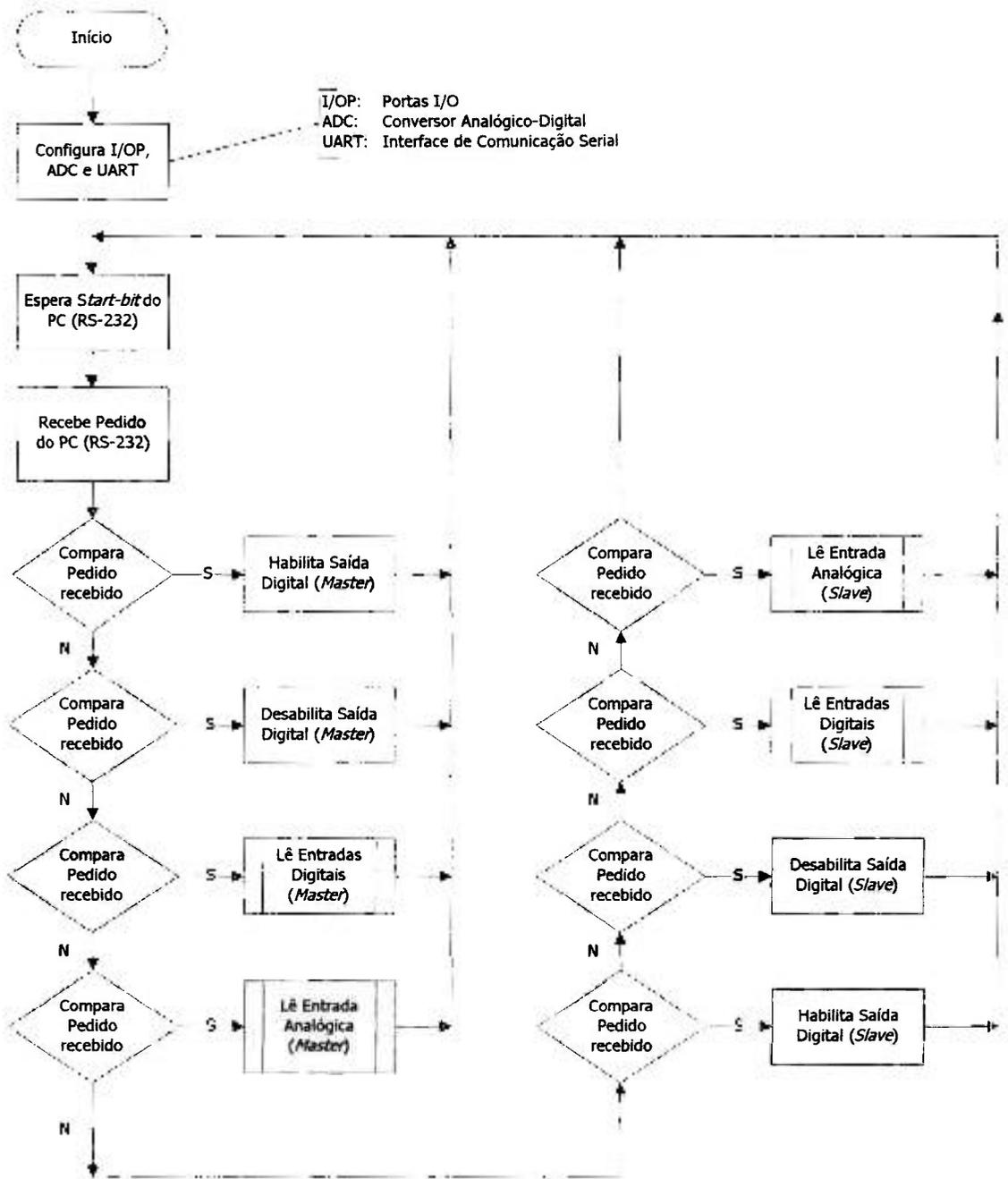
Sub-Rotina de Pedido de Leitura Analógica



Sub-Rotina: Entradas e Saídas Digitais - PC

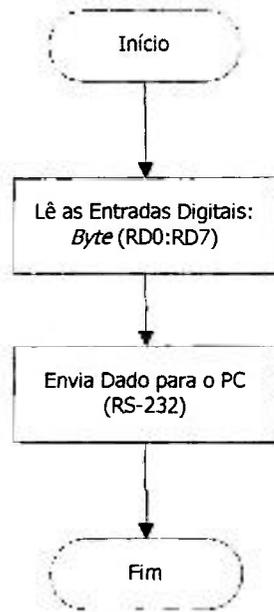


Rotina Principal - Microcontrolador *Master*
(*Assembler*)

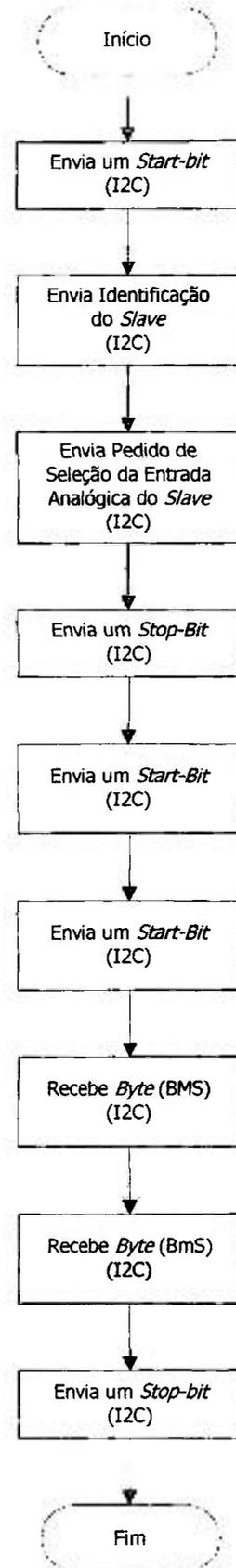


Master: Microcontrolador Mestre
Slave: Microcontrolador Escravo
 BMS: *Byte* Mais Significativo
 BmS: *Byte* Menos Significativo

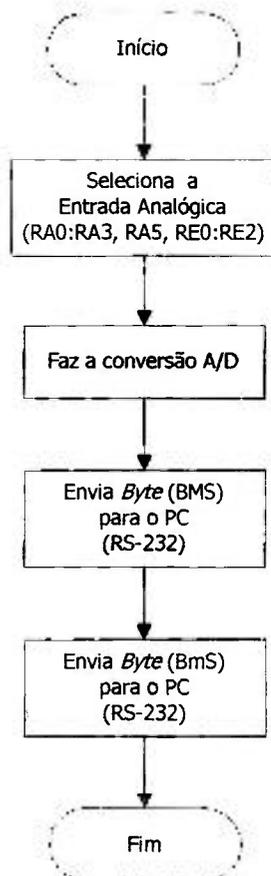
Sub-Rotina de Leitura das Entradas Digitais - *Master*



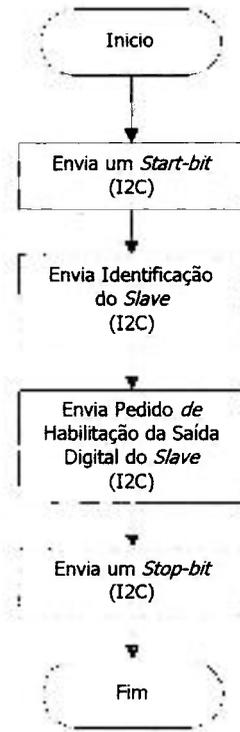
Sub-Rotina de Leitura da Entrada Analógica (*Slave*)



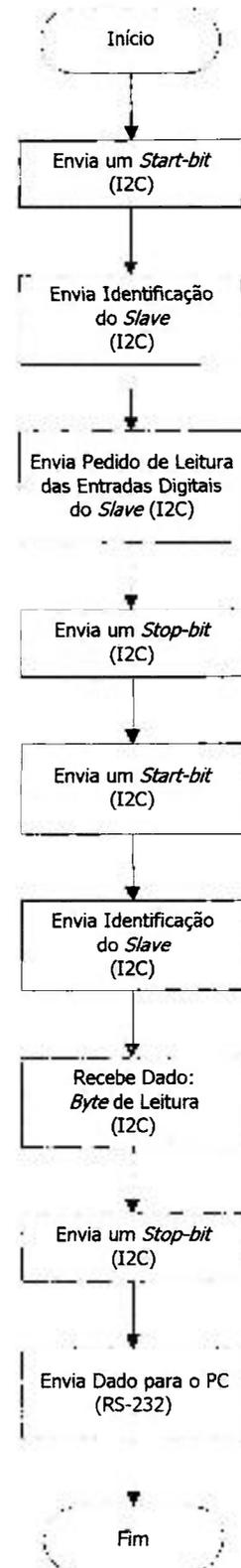
Sub-Rotina de Leitura das Entrada Analógica - *Master*



Sub-Rotina de Habilitação das Saída Digital (*Slave*)



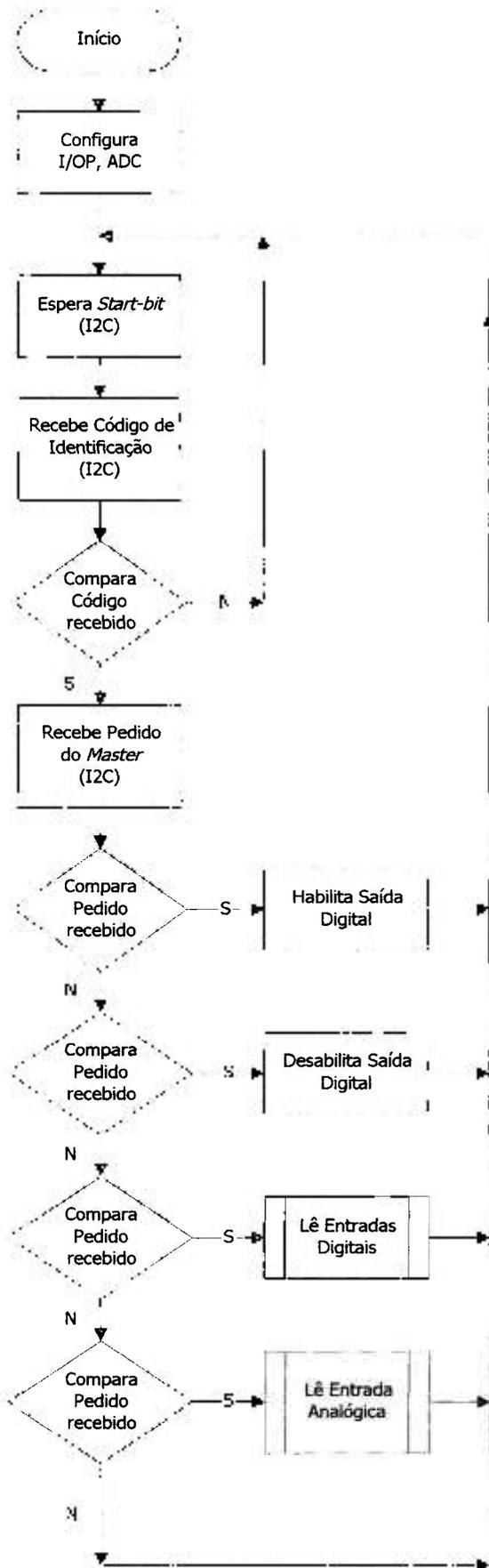
Sub-Rotina de Leitura das Entradas Digitais (*Slave*)



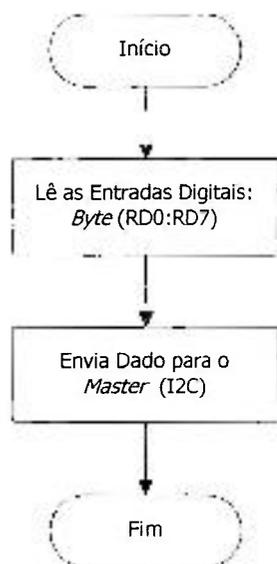
Sub-Rotina de Desabilitação das Saída Digital (*Slave*)



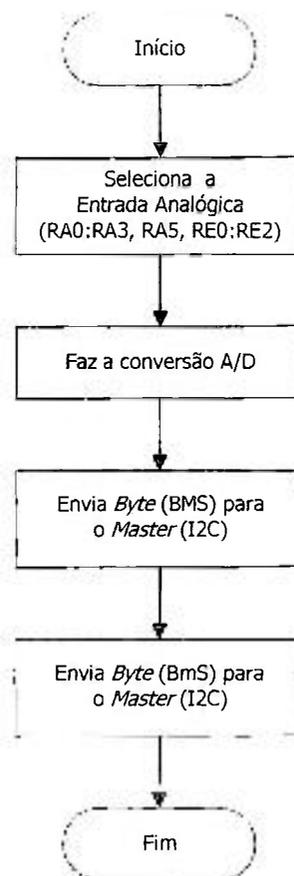
Rotina Principal - Microcontrolador *Slave*



Sub-Rotina de Leitura das Entradas Digitais - *Slave*

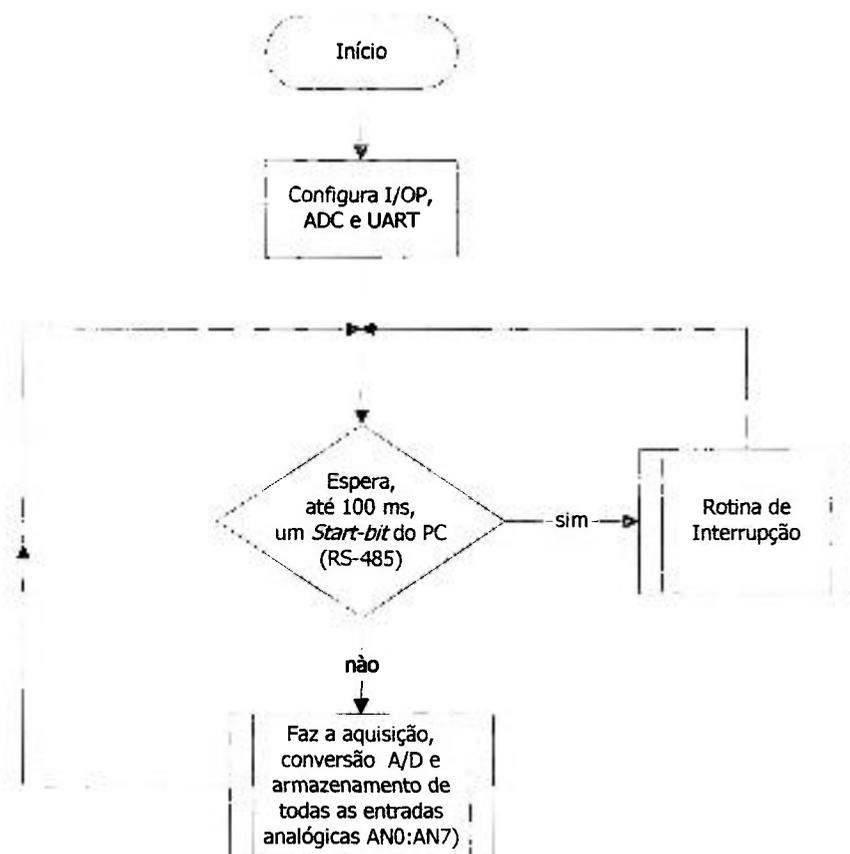


Sub-Rotina de Leitura da Entrada Analógica - *Slave*

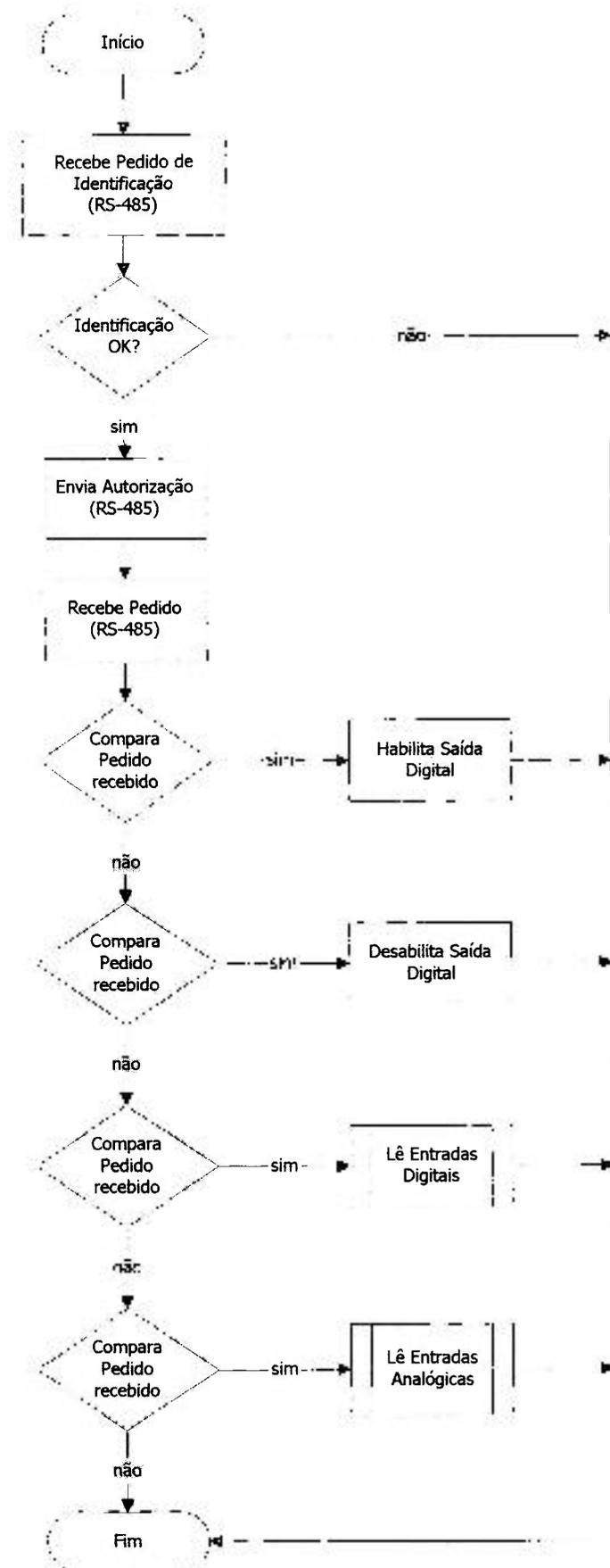


b) Fluxogramas do Sistema de Homogeneidade do Feixe

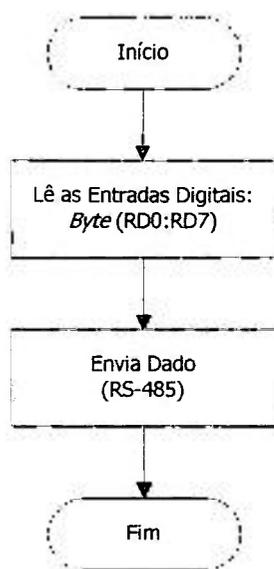
Rotina Principal - Microcontrolador Remoto



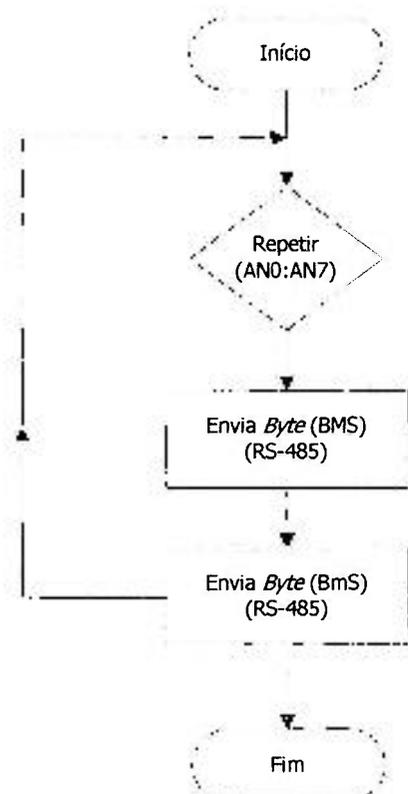
Rotina de Interrupção - Microcontrolador Remoto



Sub-Rotina de Leitura das Entradas Digitais



Sub-Rotina de Leitura das Entradas Analógicas



Sub-Rotina de Conversão e Armazenamento das Entradas Analógicas



Referências Bibliográficas

- 1) THE CYCLOTRON CORPORATION. **Instruction and services manual for Cyclotron Corporation's – model CV-28 Cyclotron** – ser. n. 604, US Pat. (TTC Ins 26), nov, 12, 1976.
- 2) PIRART, C., Technologies relevant to commercial radioisotopes. In: International Conference on Non-Energetic Applications of Nuclear Science-Brussels, june 1-3, 1995, **Proceedings ...** Brussels: BNS, 1995.
- 3) ION BEAM APLICATIONS. **Technical Description of the CYCLONE 30 Cyclotron System for IPEN-CNEN/SP**, 1995.
- 4) KOZIOL, H. **Beam Diagnostics for Accelerators**, CAS, Jyväskylä, Finland, September 1992, CERN 94-01, 1994. v. 2 p. 565-595.
- 5) ANDRADE, F. A. **Aceleradores de partículas**. Washington, D.C.: Eva V. Chesneau, 1971.
- 6) SAJJAD, M.; LAMBRECHTT, R. M. Cyclotron targetry for medical radioisotope production, **Nucl. Instrum. and Meth.**, v. B40/41, p.1100-1104, 1989.
- 7) WILLIAMSON, C. F.; BOUJOT, J. P. and PICARD, J. **Tables of range and stopping power of chemical elements for charged particles of energy 0,5 to 500 MeV**, Rapport - CEA - R 3042, 1966.
- 8) ROVELLI, A. Review of beam diagnostics for radioactive beams. In: The 1999 Particle Accelerator Conference, **Proceedings ...** New York, 1999, 482-486.
- 9) AFRAMIAN, A.; ASKOURI, N. A. and KHAN, H. A. Charged particle beam profile measurements. **Nucl. Instrum. and Meth.**, v. 121, p. 421-424, 1974.

- 10) MILMAN, J.; HALKIAS, C. C. **Eletrônica: dispositivos e circuitos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981.
- 11) SILVA JÚNIOR, V. P. da. **Microcontroladores PIC: Teoria e Prática**. São Paulo: V.P. da Silva Júnior, 1997.
- 12) MARINHO, J. E. S.; MARINHO, E. S., Mini-Curso de Microcontrolador. **Saber Eletrônica Especial**, n. 2, p. 54-73, 2001.
- 13) BRAGA, N. C. Conversores Analógicos/Digitais. **Saber Eletrônica**, n. 328, p. 22-27, 2000.
- 14) SILVA JÚNIOR, V. P. da. **Microcontroladores 8051**. São Paulo: Érica, 1990.
- 15) HYMAN, L. G.; JANKOWSKI, D. Measurement of proton beam profiles. **Nucl. Instrum. and Meth.**, v. 113 p. 285-286, 1974.
- 16) BÜTTIG, H.; A beam profile monitor based on the application of infrared thermography. **Nucl. Instrum. and Meth.**, v. 203 p. 69-71, 1982.
- 17) WIELAND, B. W. A negative ion cyclotron using 11 MeV protons for the production of radionuclides for clinical positron tomography. In: The First Workshop on Targetry and Target Chemistry, october 4-7, 1985, Heidelberg. **Proceedings...**, p. 119-125.
- 18) NORTIER, F. M.; STEVENSON, N. R.; GELBART, W. Z. Investigation of thermal performance of solid targets for radioisotope production. **Nucl. Instrum. and Meth.**, v. A355, p. 236-241, 1995.
- 19) DEVINNEY, J.; LADECKI, M.; KABALKA, G. W.; ALVORD, C. W.; NELSON, J. Cyclotron Target Beam Homogeneity Measurement Device. In: Sixth Workshop on Targetry and Target Chemistry, August 17-19, 1995, Vancouver, B.C. Canada.

- 20) SONCK, M.; VAN HOYWEGHEN, J. and HERMANNE, A. Determination of the external beam energy of a variable energy, multiparticle cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes*, v. 47(4), p. 445 - 449, 1996.
- 21) KOPECKÝ, P. Proton beam monitoring via $\text{Cu}(p, x)^{58}\text{Co}$, $^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$ and $^{65}\text{Cu}(p, n)^{65}\text{Zn}$ reactions in copper. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, v. 36(8), p. 657 - 661, 1985.
- 22) INTERSIL CORPORATION. *CA3140, CA3140A Data Sheet - 4.5 MHz, BiMos operational amplifier with MOSFET input/bipolar output*, september, 1998.
- 23) NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM35 – Precision centigrade temperature sensors*, november, 2000.
- 24) MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC16F87X – 28/40-pin 8-bit CMOS Flash microcontrollers*, 1998.
- 25) MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC16F84A – 18-pin enhanced Flash/EEPROM 8 bit microcontroller*, 1998.
- 26) CAPELLI, A. Redes Profibus e Ethernet. *Saber Eletrônica*, n. 334, p. 9-13, 2000.
- 27) BRAGA, N. C. Conheça o barramento I2C. *Saber Eletrônica*, n. 338, p. 26-31, 2001.
- 28) MAXIM INTEGRATES PRODUCTS. *+5 V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers*, may, 2000.
- 29) TEXAS INSTRUMENTS. *SN65176B, SN75176B – Differential Bus Transceivers*, june, 1999.
- 30) MAZZEI, P. E. Obtenção de circuitos impressos pelo processo fotográfico "Photo-Resist". *Eletrônica Popular*, p. 24-28, setembro, 1981.