

T E S E D E M E S T R A D O

Título

D E T E R M I N A Ç Ã O D O S P A R Â M E T R O S

C A R A C T E R Í S T I C O S D O F E I X E D E U M

A C E L E R A D O R L I N E A R

D J A I R A Q U I Ñ O D E L I M A

1978

AGRADECIMENTOS

Registro aqui sinceros agradecimentos:

Ao professor ALFREDO MARQUES DE OLIVEIRA pela abalizada e incansável orientação,

aos amigos

Professor Luiz Tauhata pela sugestão, discussões e trabalho em equipe,

Roberto Poledna pelas discussões e trabalho em equipe,

Donald Clark Binns,

João Emílio,

Eugênio Marins,

Cel Rubens Carrilho pelas discussões construtivas,

Cel Meira Chaves,

Ronaldo Marques,

Vanda Regina, pela prestativa operação do acelerador,

Eduardo Stizey pelos trabalhos em vidro,

D. Nara Pereira,

Rubens Otávio,

Pessoal da Oficina Mecânica e demais amigos que direta ou indiretamente concorreram para a realização deste trabalho,

Ana Rodrigues pela datilografia.

AGRADECIMENTOS ÀS INSTITUIÇÕES:

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA,

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS,

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E
TECNOLÓGICO,

que forneceram as condições materiais para a realização deste
trabalho.

I N D I C E

Capítulo:	Assunto:	Página
1	Introdução	1
2	O dispositivo experimental	5
3	Princípio de operação	14
4	Calibrações	26
5	Medidas e resultados experimentais	34
6	Conclusões e Discussões	44
	Apêndices	48

RESUMO

Foi construído um dispositivo para determinar os parâmetros característicos do feixe de elétrons de um acelerador linear.

Consta, basicamente, de um eletro-calorímetro capaz de fornecer, diretamente, medidas calorimétricas e eletrônicas relacionadas ao feixe e sua interação com os elementos do dispositivo; previamente calibrado, e de um densitômetro óptico de precisão para o estudo de materiais por ele irradiados.

Operando com o acelerador linear de 2 MeV do CBPF, numa série de medidas consistentes, foram obtidos os seguintes resultados para os parâmetros:

potência média	$(10,0 \pm 0,5)$ W
corrente média	$(4,9 \pm 0,11)$ μ A
energia média/partícula	$(2,03 \pm 0,12)$ MeV
largura do pulso	4 μ s
dispersão na amplitude de pulso	1%
frequência de pulsos	188 Hz

Foram levantadas as curvas de isodensidade óptica em lâminas de vidro irradiadas pelo feixe, fornecendo informações sobre a degradação de sua focalização, direção de penetração no material e alcance das partículas.

Utilizando um modelo semiempírico e aproximado foi obtido também a distribuição de dose ponto a ponto no material a partir das curvas de densidade óptica.

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho se propõe um método para a determinação dos parâmetros característicos dos feixes pulsados de elétrons obtidos dos aceleradores lineares de baixa energia. Este método é utilizado para levantar as características do feixe do acelerador linear de 2 MeV existente no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

O dispositivo permite obter os parâmetros abaixo:

- a) Potência média e corrente elétrica do feixe, forma e frequência do pulso;
- b) Energia das partículas, dispersão na energia;
- c) Características de focalização e direção;
- d) Distribuição de isodoses em material irradiado.

Tanto o uso geral em pesquisa pura como a utilização dos aceleradores em aplicações médicas nos hospitais e clínicas de medicina nuclear, requerem o conhecimento preciso de seus parâmetros de operação, revestindo-se esta última de uma responsabilidade especial, pelo fato de por em jogo a vida humana. Vários hospitais e institutos de pesquisas brasileiros dispõem hoje de aceleradores lineares de elétrons (CBPF, USP, USC e hospitais particulares).

Embora as características do feixe possam ser modificadas pelo operador, não há em geral indicadores de painel suficientemente precisos e con-

fiáveis para o acompanhamento destas modificações; após efetuado qualquer ajuste, o operador só terá conhecimento da mudança das características depois de ter realizado medições na saída do feixe. Os métodos de mensuração existentes nem sempre incorporam os requisitos de precisão e portabilidade necessários a cada caso. Para a medição da energia por exemplo podemos citar os seguintes métodos:

a) Determinação da energia por detetores de limiar de reação nuclear. ⁽¹⁾. Em última análise se há reação as partículas tem energia pelo menos igual a do limiar cujo nível é conhecido. Os resultados das medidas obtidas por este método são muito susceptíveis à forma da curva de ativação próximo do limiar de reação.

b) Medida de alcance - energia no alumínio ⁽²⁾. A sensibilidade destas medidas é reduzida para altas energias, devido a radiação de freiamto. Além disto há variação da sensibilidade do detetor devido ao espalhamento múltiplo no final da trajetória dos elétrons.

c) Detetores Cherenkov ⁽³⁾. Este método fornece apenas a energia máxima do feixe de elétrons.

d) Medidas de deflexão magnética. Este método fornece a melhor informação a respeito do feixe possibilitando a medição do espectro

(1) Birnbaum, Harth, Soren e Tobin, - Nucleonics 134(1955)64

(2) Katz e Penfold, - Rev. Mod. Phys. 24 (1952) 28

(3) Bhiday, Jennings e Kalmus, - Proc. Phys. Soc. 72 (1958)973

energético dos elétrons. É contudo trabalhoso para o caso dos aceleradores lineares, pois para se obter toda a precisão que ele pode oferecer é necessário se fazer um alinhamento cuidadoso do feixe na entrada do campo magnético, e as características de focalização do feixe tornam este alinhamento difícil de ser obtido; é demorado, paralisa o uso da máquina durante a calibração, sendo portanto inadequado para se obter medidas frequentes da energia dos elétrons.

e) Método calorimétrico: Consiste em absorver a energia dos elétrons no interior de um calorímetro e medir a quantidade de calor debitada. Sua utilização não é trabalhosa como o anterior, tornando-o conveniente para efetuar medidas frequentes e oferece precisão com erro inferior a 3%. O calorímetro deve ser adequadamente escolhido para cada faixa de energia e corrente do feixe. Por exemplo, para medir energias de feixe 15 MeV, são utilizados calorímetros a fluxo de água conforme foi desenvolvido por S. Lovell e Hsun Shen (4).

O método utilizado aqui baseia-se principalmente na medição da energia do feixe por um calorímetro a gás por ser este apropriado para feixes de baixa energia, além de oferecer precisão (erros da ordem de 5%), portabilidade e rapidez de aferição necessários ao uso frequente. Um copo de Faraday foi adaptado no seu interior, dimensionado para absorver toda a

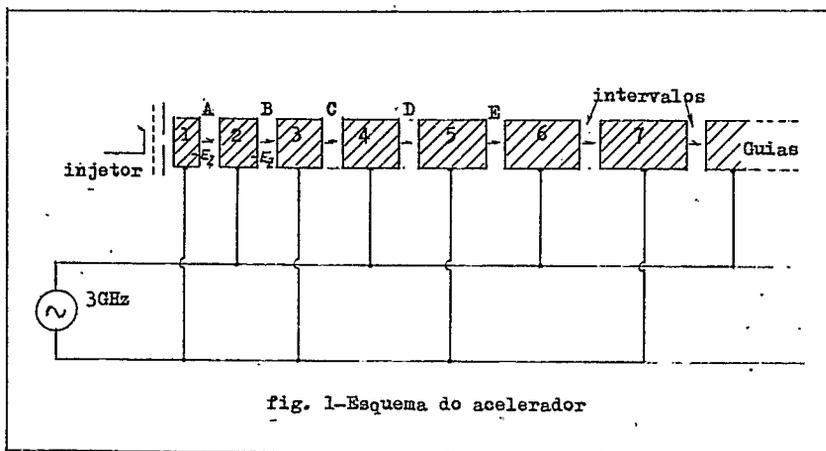
(4) Lovell e Hsun Shen. -- Phys. Med. Biol. 21,2 (1976)198

energia do feixe, de modo a propiciar a execução de medidas elétricas simultaneamente com as calorimétricas. Para estudo das características geométricas do feixe, principalmente ao penetrar em materiais de baixa densidade, foi montado um densitômetro com bastante precisão para distinguir densidades ópticas com diferenças de apenas 0,05%. O dispositivo é de fácil construção e utilização e se encontra adaptado ao acelerador de 2 MeV do CBPF, onde foram efetuados todos os testes que constam deste trabalho.

2. O DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.

2. 1. O ACELERADOR E SUA SAÍDA

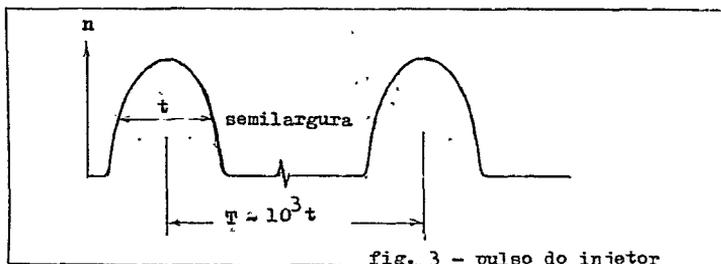
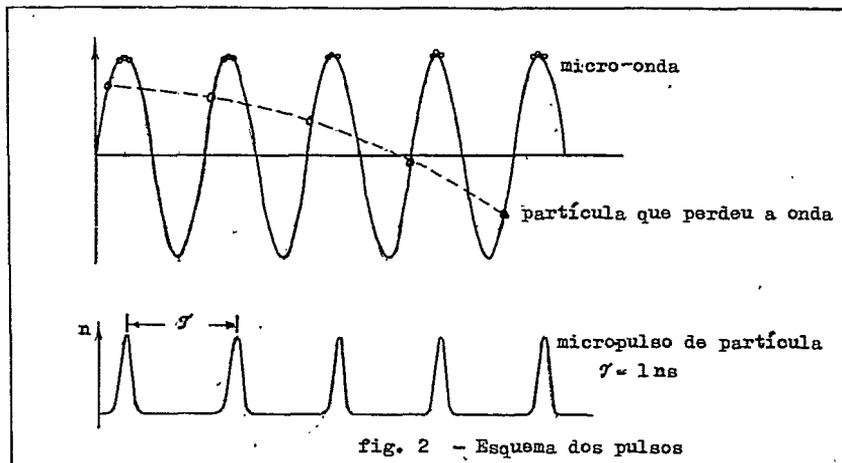
O feixe obtido nos aceleradores lineares de elétrons é constituído de partículas aceleradas pelo campo elétrico de uma onda progressiva nas regiões sucessivas entre guias de onda ao longo da trajetória interna, conforme indica a figura abaixo.



Os elétrons obtidos de um filamento aquecido são injetados na primeira cavidade por um canhão operando a ~ 40 kV. Os guias de onda são ex-

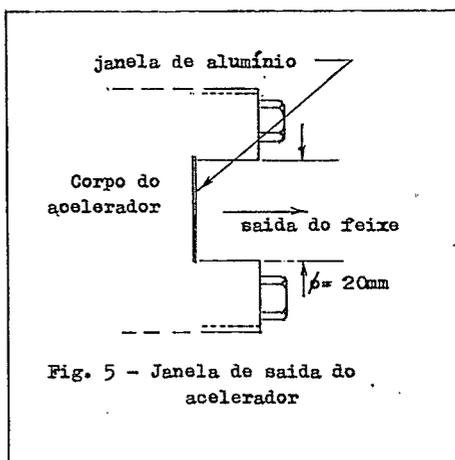
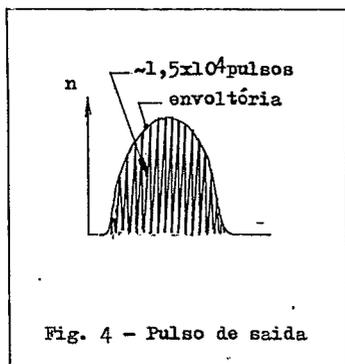
citados por uma Magnetron operando a 3 GHz e seus comprimentos crescem do injetor para a saída pois são iguais ao percurso da partícula em cada período. A maioria das partículas que forma o feixe emergente é constituída daquelas que andaram em fase com a onda, pois aquelas que entram com acentuada diferença de fase nos intervalos entre os guias são desaceleradas e acabam perdendo a onda conforme indica a figura 2.

O injetor de elétrons joga elétrons na frente da onda portadora à razão de 188 Hz da forma da figura 3.



Na saída do feixe obtém-se um pulso semelhante ao do injetor de elétrons que é a envoltória dos micropulsos conforme mostra a figura 4.

A corrente média de partículas é aproximadamente 10^3 vezes menor que a corrente sob os pulsos, devido a relação entre a semilargura do pulso e o período. O feixe após deixar a onda portadora é colimado por focalização magnética e deixa o acelerador atravessando uma janela de alumínio semi-transparente para elétrons conforme nos mostra a figura 5.



2. 2. O CALORÍMETRO.

O calorímetro construído também para funcionar como um copo de Faraday é o elemento básico do dispositivo medidor; é sensível a potências térmicas de até 10^{-1} W dando variações de temperatura de 10^{-3} C/s, e como copo de Far-

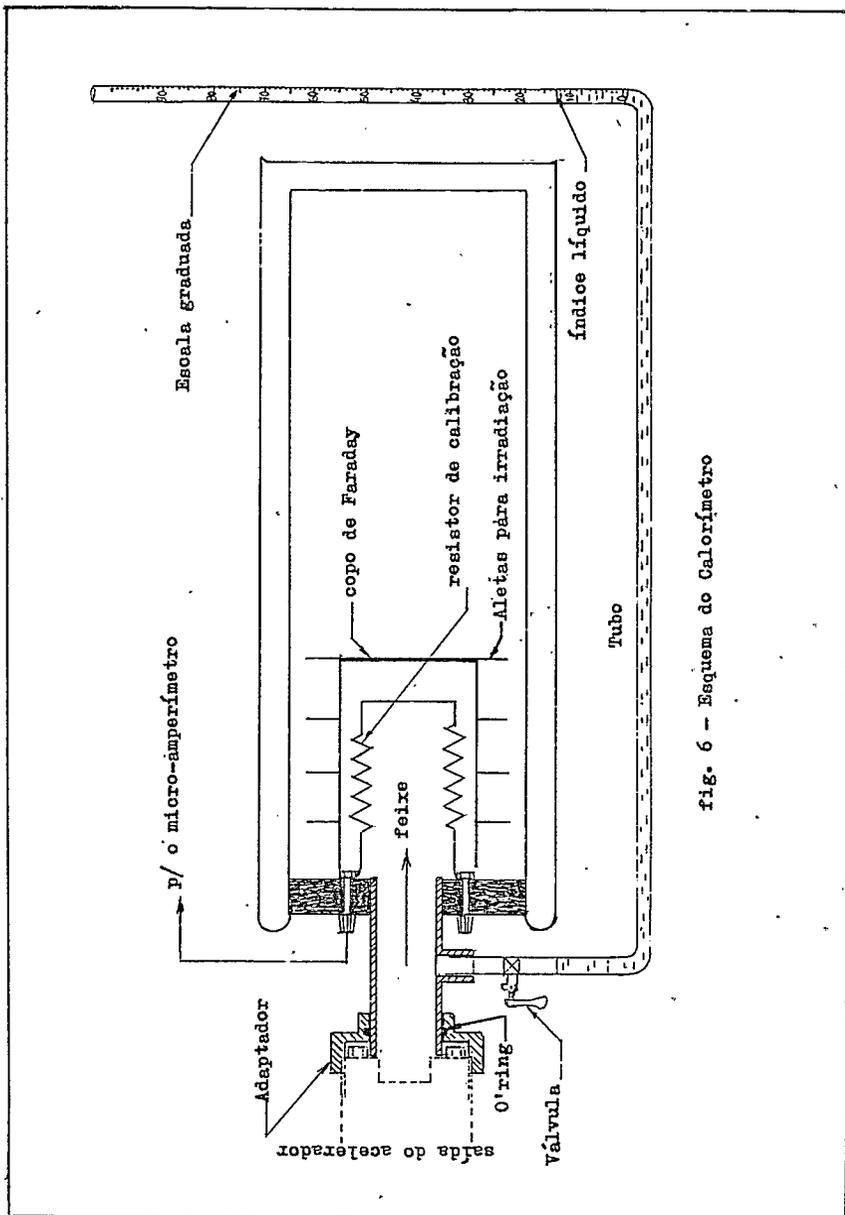


fig. 6 - Esquema do Calorímetro

raday permite medir correntes de feixe de até $0,1 \mu A$.

O calorímetro apresenta as seguintes características estruturais:

a) A entrada do feixe pode ser direta, ou através de uma fi na janela de alumínio, dependendo da finalidade da medida que está sendo efetuada.

b) A dilatação térmica do gás (ar à pressão atmosférica) , provocada pelo calor debitado pelo feixe no interior do calorímetro, desloca um índice líquido num tubo comunicante sobre uma escala graduada no final do tubo.

c) A parte externa do calorímetro é um "Dewar" de aço inoxidável e o frasco interno que constitui o copo de Faraday, é feito de cobre e dimensionado para absorver toda a energia do feixe.

Para fornecer as características elétricas do feixe, o copo de Faraday pode ser utilizado das formas seguintes:

a) Conectado diretamente a um eletrômetro sensível até $0,1 \mu A$ para medir a corrente do feixe.

b) Conectado a um pré-amplificador colocado logo à saída do copo de Faraday e daí a um osciloscópio que mostrará a forma do pulso ou a um sistema de análise, tendo como base um analisador multicanal e um contador de pulsos, que fornecerá todas as informações quanto à dispersão na sua amplitude e quanto à sua frequência. A escolha do circuito do pré-amplificador recaiu no tipo indicado no apêndice D porque este é o sis-

tema mais simples capaz de acomodar satisfatoriamente as demandas de resposta de frequência e casamento de impedância à linha de transmissão, além de oferecer uma alta impedância de entrada necessária a utilização de um circuito de RC grande comparado com o tempo de duração do pulso.

O pré-amplificador e as linhas de transmissão tem suas blindagens ligadas à terra para minimizar a influência das fortes interferências presentes na área de utilização do acelerador.

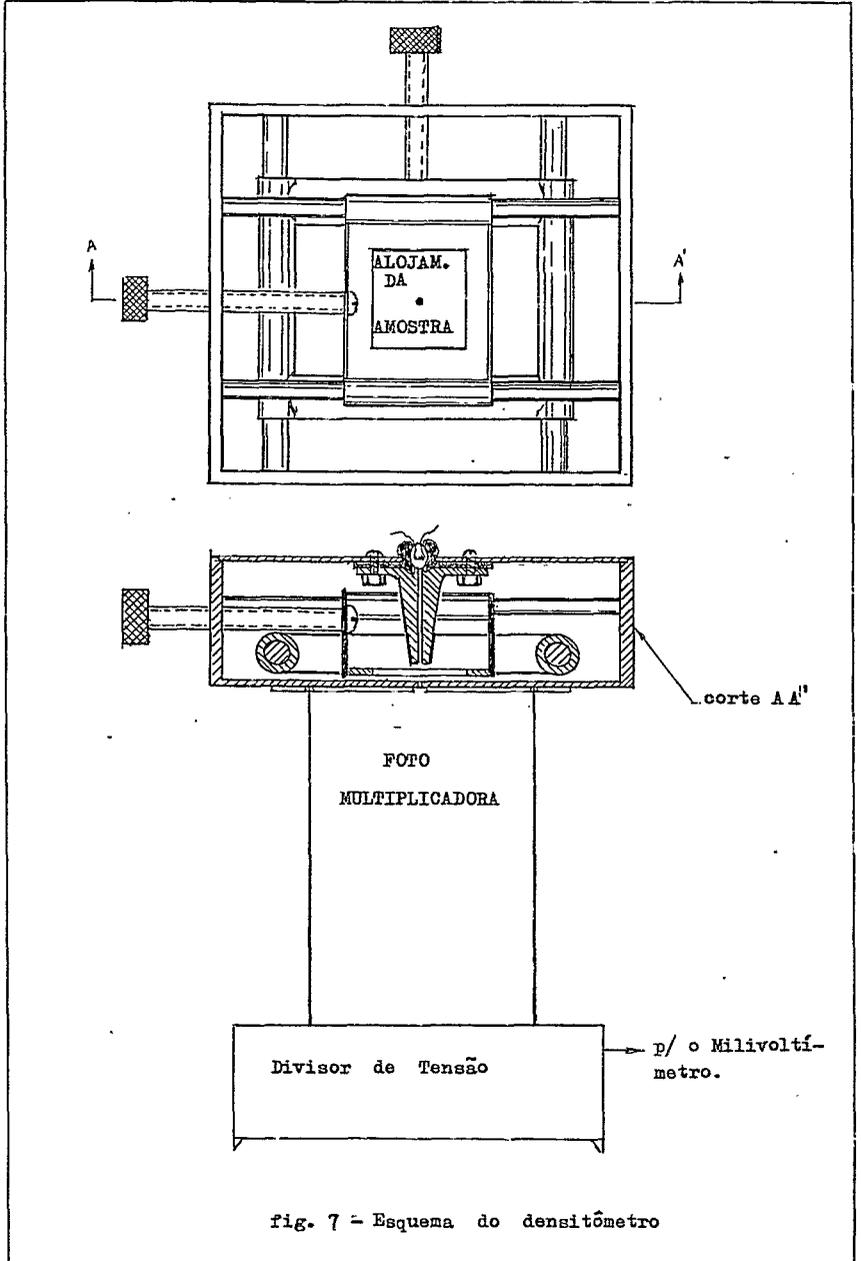
Todas as leituras são feitas a uma distância considerável do acelerador onde as radiações tem um nível tolerável pelo organismo humano.

Os demais parâmetros calorimétricos estão no apêndice A.

2. 3. O DENSITÔMETRO

O densitômetro fig. 7, consta de uma câmara escura com uma platina do tipo usado em microscópio, que permite movimentos da amostra no plano x,y e contendo uma lâmpada com luz colimada por pequenos orifícios alinhados no eixo z.

Os orifícios de colimação após a transmissão da luz através da amostra difundem-na sobre o fotocátodo de uma fotomultiplicadora, convenientemente polarizada e adaptada à saída da câmara escura; a corrente gerada na fotomultiplicadora forma uma tensão na resistência (10 k Ω) de carga podendo ser lida num voltímetro.



Usando-se fontes de alimentação, para a lâmpada e para a fotomultiplicadora, bem estabilizadas (oscilações inferiores a 0,05 %) e um voltímetro a 4 dígitos podemos ter leituras precisas com erros inferiores a 0,05 %, precisão esta, necessária à determinação de isodensidades nos materiais padrões utilizados.

Para evitar a evaporação do fotocátodo e para se obter uma melhor colimação da luz que iluminará a amostra, usa-se uma pequena lâmpada cuja luz é colimada sobre uma região da amostra e adiante espalhada sobre o fotocátodo e uma tensão de polarização da fotomultiplicadora, relativamente baixa (aproximadamente 1,6 kV). Todo o sistema é montado de modo a não permitir a entrada de luz externa.

As tensões são lidas em mV e as fontes também oferecem possibilidades de se efetuar ligeiros ajustes para se uniformizar as normalizações das leituras em relação à transparência máxima V_0 .

O quadro de tensões V obtidas ponto a ponto é convertido em densidade óptica $D = \ln \frac{V_0}{V}$ e se se conhecer a curva, densidade óptica versus dose, característica do material irradiado pode-se obter o quadro de dose.

2. 4. OUTROS DISPOSITIVOS.

Para determinação da frequência e da dispersão na amplitude dos pulsos do feixe utilizamos o sistema visto no diagrama abaixo:

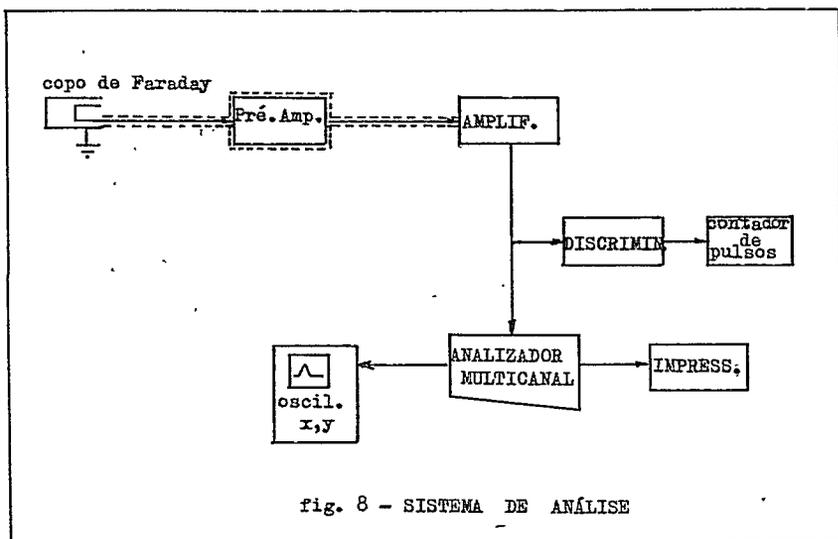


fig. 8 - SISTEMA DE ANÁLISE

3. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

3. 1. CALORIMETRIA

A absorção do feixe no calorímetro, leva à conversão de quase toda a sua energia em calor e este por sua vez aquece e dilata o gás deslocando o índice no tubo comunicante sobre uma escala graduada.

Para melhor análise dos fenômenos toma-se a equação de equilíbrio termodinâmico abaixo na sua forma diferencial:

$$dQ = nC_v dT + pdV \quad (3.1.1)$$

Considerando a aproximação em que o gás se comporta como um gás perfeito, para pequenas variações dQ temos:

$$pV = nRT \quad (3.1.2)$$

Diferenciando vem:

$$pdV + Vdp = nRdT \quad (3.1.3)$$

Reescrevendo

$$dT = \frac{pdV + Vdp}{nR} \quad (3.1.4)$$

Levando esta na (3.1.1) obtemos:

$$dQ = \left(\frac{C_v}{R} + 1\right)pdV + \frac{C_v}{R}Vdp \quad (3.1.5)$$

mas,

$$dp = \frac{\rho dV}{A} \quad (3.1.6)$$

e

$$\frac{C_v}{R} + 1 = \frac{C_p}{R} \quad (3.1.7)$$

A é a seção do tubo e ρ é a densidade do líquido.

Levando as igualdades (3.1.6) e (3.1.7) na (3.1.5) encontra-se:

$$dQ = \left(\frac{C_p}{R}p + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R}V\right)dV \quad (3.1.8)$$

integrando a (3.1.6) temos:

$$p = p_0 + \frac{\rho}{A}(V - V_0) \quad (3.1.9)$$

Levando na (3.1.8) temos:

$$dQ = \left(\frac{C_p}{R}p_0 - \frac{\rho}{A} \frac{C_p}{R}V_0 + \frac{\rho}{A} \frac{C_p}{R}V + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R}V\right)dV$$

Integrando temos:

$$\Delta Q = \frac{C_p}{R} P_0 (V - V_0) - \frac{\rho}{A} \frac{C_p}{R} V_0 (V - V_0) + \frac{\rho}{A} \frac{C_p}{R} \left(\frac{V^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} \right) + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R} \left(\frac{V^2}{2} - \frac{V_0^2}{2} \right)$$

ou rearranjando e considerando que $\Delta V = V - V_0$ pode-se escrever:

$$\Delta Q = \frac{C_p}{R} P_0 \Delta V + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R} V_0 \Delta V + \frac{\rho}{2A} \frac{C_p}{R} (\Delta V)^2 + \frac{\rho}{2A} \frac{C_v}{R} (\Delta V)^2$$

Para o caso de interesse as variações de volume ΔV são pequenas, o que permite desprezar os termos de segunda ordem, (vide apêndice F), então:

$$\Delta Q = \left(\frac{C_p}{R} P_0 + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R} V_0 \right) \Delta V \quad (3.1.10)$$

As variações de volume ΔV são observadas através do movimento ΔH do índice, portanto,

$$\Delta V = A \Delta H \quad (3.1.11)$$

Se as reações moleculares provocadas pelo feixe não mudam a característica predominante diatômica do gás, todos os termos dentro do parenteses

são constantes, então:

$$\Delta Q = C \Delta H \quad (3.1.12)$$

onde

$$C = \left(\frac{C_p}{R} P_0 A + \frac{C_v}{R} V_0 \right)$$

Os elétrons ao penetrarem no calorímetro cruzam uma coluna de aproximadamente 16 cm de gás (ar) onde podem perder até 2% de suas energias, segundo a taxa $\frac{dE}{dx}$ conhecida para este caso, (2) depois penetram na base do copo de Faraday onde perdem toda a energia cinética restante sendo que uma pequena taxa é convertida em raios gama (radiação de freiamento). Devido ao grande poder de penetração desta radiação a energia é subtraída do interior do calorímetro, porém a taxa é pequena e pode ser calculada (cerca de 2,8% vide apêndice E), permitindo fazer-se as correções nas medidas calorimétricas.

Quanto aos processos de trocas de calor, neste calorímetro, podem ser classificados em dois conjuntos:

- a) trocas de calor entre os elementos internos:
- b) trocas de calor entre os elementos internos e o ambiente

externo, ou fugas.

(2)

Katz e Penfold-Rev. Modern Physics 24 (1952)28

As trocas de calor entre os elementos internos devem ser rápidas e as fugas devem ser lentas para que a resposta do gás represente fielmente a energia debitada pelo feixe.

Para minimizar o tempo das trocas internas é necessário que a massa do copo interno seja crítica e sua geometria seja favorável às trocas de calor; por isso é construído com material bom condutor (cobre), tem paredes finas com furos para a circulação do gás, aletas de irradiação, e base de espessura maior que o alcance dos elétrons de modo a freiar completamente o feixe.

As fugas se fazem principalmente através das conexões de entrada e de saída de informações do calorímetro e dependem proporcionalmente do gradiente de temperatura entre o ambiente interno e o externo em cada instante. Quando este gradiente é muito pequeno, como acontece nas primeiras mensurações de uma série, as fugas são desprezíveis. Na maioria das vezes as fugas são importantes e devem ser levadas em consideração para correção das leituras, tanto por ocasião da calibração do calorímetro como por ocasião das medidas no acelerador. Levadas em consideração, os movimentos do índice líquido constituem uma resposta linear do calor debitado no interior do calorímetro. A calibração do calorímetro é feita na escala graduada do tubo comunicante, medindo-se a potência dissipada num resistor no interior do aparelho, sobre o qual se faz passar uma corrente elétrica precisamente determinada.

3. 2. MEDIDAS DE CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO FEIXE.

Para se obter as medidas das características elétricas do feixe, utiliza-se o copo de Faraday.

A corrente elétrica pulsada do feixe vê o copo de Faraday como uma das placas de um capacitor, (de capacitância C_0), a outra é a carcassa externa do calorímetro; assim sendo, a corrente do feixe $i(t)$ desenvolverá entre o copo e a terra uma tensão $V(t)$ dada por:

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (3.2.1.)$$

Quando o dispositivo tem o copo-carcassa acoplado à entrada de um pré-amplificador o circuito equivalente deste estágio é o indicado na figura 9 onde C_1 é desprezível, (vide apêndice D). Então $C = C_0$.

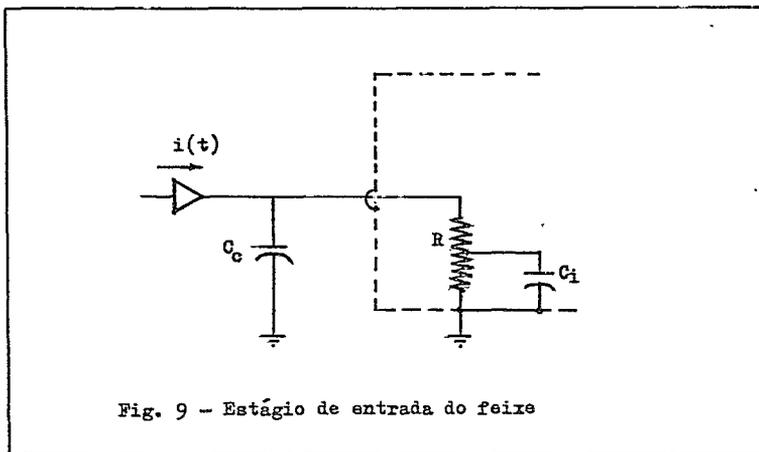


Fig. 9 - Estágio de entrada do feixe

Se,

$$i(t) = \begin{cases} I_0(t) & \text{para } t < T \\ 0 & \text{para } t > T \end{cases} \quad (3.2.2)$$

temos:

$$V(t) = \frac{e^{-t/RC}}{C} \int_0^t I_0(t) e^{t/RC} dt \quad t < T \quad (3.2.3)$$

$$V(t) = V(T) e^{-t/RC} \quad t > T \quad (3.2.4)$$

Mas o tempo de duração do pulso é $T \sim 3 \mu s$

A capacitância do estágio é $C = 10 \text{ nF}$

A resistência $R = 4,7 \times 10^5 \Omega$

Então,

$$RC = 4,7 \times 10^5 \times 10 \times 10^{-9} = 4,7 \times 10^3 s \quad (3.2.5)$$

e

$$\frac{t}{RC} \sim 1\% \quad (3.2.6)$$

Neste caso se tomarmos só o primeiro termo da expansão das exponenciais na (3.2.3) o erro não atingirá 1% e temos:

$$V(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_0(t) dt \quad t < T \quad (3.2.7)$$

Derivando a (3.2.7) em relação a t , temos:

$$C \frac{dV(t)}{dt} = I_0(t) \quad t < T \quad (3.2.8)$$

Utilizando-se um dispositivo diferenciador no circuito, pode-se obter a forma do pulso de corrente. Além da forma do pulso o sinal obtido do pré-amplificador traz informações da frequência e da dispersão na amplitude dos pulsos, que são melhor analisados no sistema de análise descrito no item 2. 4.

A corrente média do feixe é obtida diretamente do copo de Faraday num micro-amperímetro.

3. 3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E ISODENSIDADES.

Ao se levantar as características geométricas do feixe, considerou-se dois níveis do problema:

a) O da focalização do feixe em si à saída do acelerador. A focalização do feixe é um dos parâmetros mais importantes tanto para o rendimento do acelerador como para a eficiência das medidas nas aplicações localizadas do feixe. Pode ser alterada por mudanças feitas na bobina de focalização e pode ser observada pelos efeitos do feixe sobre mate-

riais sensíveis tais como: superfícies luminescentes; blocos de materiais fusíveis; e materiais que ganham coloração.

b) O da perda de focalização (degradação) ao atravessar um material. Este é de interesse para as aplicações em amostras espessas como as aplicações médicas, e depende do primeiro podendo ser desenvolvido de modo a prestar informações deste.

O processo utilizado nesta tese para levantar as características da degradação do feixe, baseia-se na propriedade de materiais transparentes que, ao serem irradiados, formam centros de cor, cuja concentração aparece como uma mancha visível. A concentração de cor da mancha, em cada região do material, é relacionada com a quantidade de energia absorvida ali e pode ser medida por um densitômetro óptico.

Para levantamento da densidade óptica, divide-se a mancha em pequenas regiões (pontos) relacionados aos eixos coordenados escolhidos convenientemente.

A sensibilidade do método depende do grau de precisão na localização dos pontos e na leitura de suas densidades ópticas. Aí surge um problema, pois para se aumentar a precisão na localização dos pontos, o material é utilizado na forma de lâminulas, de pequena espessura e quanto mais finas, menos visível aparecerá a mancha, exigindo para mensuração, instrumentos ópticos de maior sensibilidade, conforme será descrito no item da calibração do densitômetro.

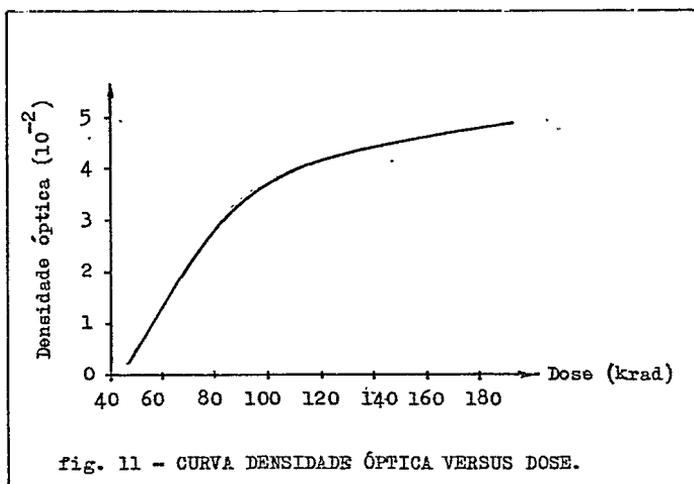
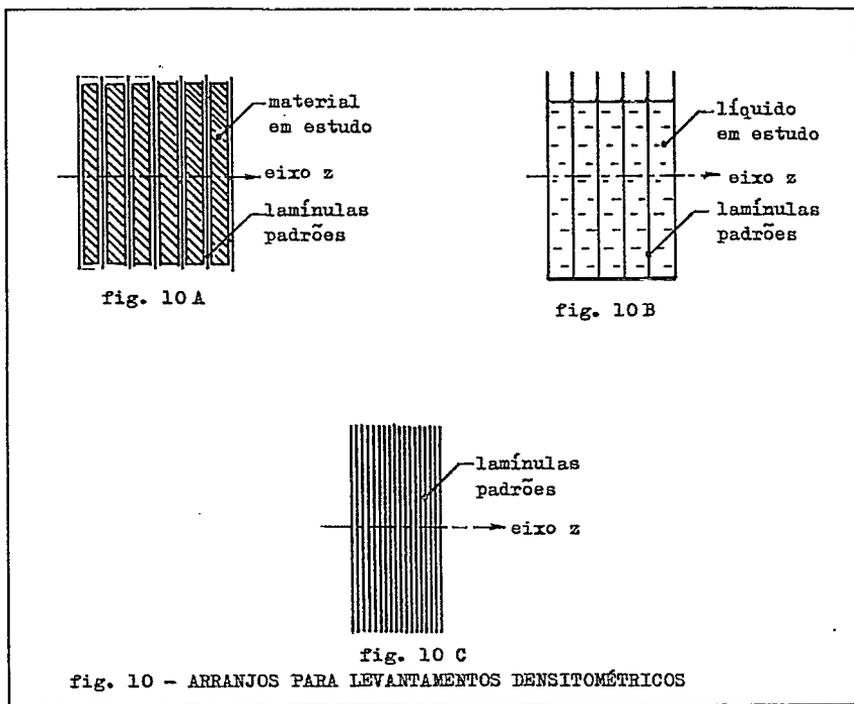
O uso das lâminulas, neste método, poderá ser adaptado ao levantamento

das características de desenvolvimento do feixe, no interior de qualquer material laminável bastando-se para isto, ter o cuidado de, ao se irradiar, intercalar entre as lâminas do material em estudo, as laminulas-padrão conforme indica a fig. 10A, ficando os seus planos, normais ao eixo z de penetração do feixe. As manchas que aparecerão nas laminulas trarão informações sobre a parte do feixe degradado, após atravessar as diversas espessuras do material em estudo.

Se o material em estudo é utilizado no estado líquido também poderá ser estudado pelo mesmo princípio. Basta que este líquido seja posto numa cuba montada conforme indica a fig. 10B (à semelhança de uma bateria de automóvel cujas placas e estojo são as laminulas-padrão) e registrando seus efeitos sobre o feixe nas diferenças entre densidades ópticas em laminulas sucessivas.

Para que um material venha a constituir um padrão é necessário que tenha uma constituição uniforme, e que seja levantado o efeito da degradação do feixe sobre ele; para este levantamento irradia-se um conjunto de laminulas justapostas conforme mostra a fig. 10C e em seguida faz-se um levantamento densitométrico que permita um conhecimento do desenvolvimento do feixe no material.

Levando-se em consideração que estas laminulas são delgadas, que a degradação acumulada do feixe será tanto menor quanto (menor) o for a espessura do material atravessado, dependendo, no que reste, das características



do feixe incidente, pode-se usar as primeiras lâminulas do arranjo da figura 10C, para obter informações a respeito das características de focalização do feixe primitivo.

Como padrão utilizou-se o vidro por ter sido o único nesta oportunidade disponível em condições de suportar o feixe do acelerador de 2 MeV, sem queimar, e comercialmente oferecido já sob forma de lâminulas.

As leituras obtidas, (apêndice C) após convertidas em densidades ópticas pela expressão $D = k n \frac{V_0}{V}$, (onde V é a leitura na região em estudo, e V_0 a leitura na lâminula não irradiada) podem ser registradas num papel milimetrado em posições correspondentes permitindo assim traçar as curvas de isodensidades ópticas em planos de interesse. As curvas de isodensidades ópticas são relacionadas às curvas de isodoses desde que se conheça a curva de densidade óptica versus energia absorvida obtidas das lâminulas e que tem a forma típica da figura 11, (Reprodução em escalas lineares de um trecho da figura 16).

Durante a calibração do calorímetro devem ser observadas três etapas:

- a) Aquela em que a potência é dissipada; no seu interior;
- b) Aquela compreendida entre o desligamento da fonte e o estabelecimento do equilíbrio térmico interno;
- c) Aquela que se inicia logo após o estabelecimento do equilíbrio térmico interno, quando poderão ser medidas as fugas.

É importante para simplificação dos cálculos começar a calibração quando houver equilíbrio entre as temperaturas internas e externas. A posição do índice líquido é essencialmente dinâmica, influenciando sobre ela duas componentes: a energia convertida em expansão elástica do gás do calorímetro e a energia perdida por fugas. A altura do índice reflete a diferença destas duas componentes em cada etapa. A energia fornecida ao calorímetro é igual a potência dissipada vezes o tempo da etapa a). A máxima altura do índice ocorrerá no fim da etapa b), e, é proporcional a energia ganha na etapa a), menos a energia perdida por fugas nas etapas a) e b). As fugas de calor do calorímetro dependem exclusivamente do gradiente de temperatura do ambiente interno para o externo; portanto, para cada diferença líquida de altura do índice haverá um valor para a taxa de fugas e após estabelecido o equilíbrio interno, isto é, na etapa c), a taxa de fuga cairá exponencialmente. Como na etapa c) só as fugas estão presentes, é este o intervalo apropriado para estudar as suas curvas características.

As exponenciais que representam as curvas características das fugas

só ficam bem definidas se conhecido o nível assintótico ou seja, aquele antes de iniciada a série de medidas, instante em que, o gradiente de temperatura é nulo. No fim da etapa c) também ocorre gradiente nulo, mas o intervalo de tempo requerido para isso teoricamente é infinito (na prática, é um tempo muito longo, podendo ainda, não ser alcançado, pois as variações meteorológicas a longo prazo poderão alterar as condições originais da experiência).

Conhecida a curva característica das fugas versus altura do índice l_f quido, e conhecidos os intervalos de tempo do movimento determina-se a energia desviada pelas fugas.

Durante a calibração as medidas obtidas podem ser grupadas conforme detalhes do apêndice B.

Na última parte das medidas fornece-se mais energia e prolonga-se a etapa c) referente as fugas até o índice atingir assintoticamente o nível mais baixo h_0 . Os pares de valores (h, t) após ajustados por processo padrão dão uma exponencial montada na reta horizontal de nível h_0 , que permite avaliar as correções de fuga, (apêndice H).

Para a referida curva tem-se:

$$h(t) - h_0 = (h(t_0) - h_0) e^{-at} \quad (4.1.1)$$

A derivada $\frac{\partial h(t)}{\partial t}$, fornece a taxa de fuga para cada nível do índice.

A correção das fugas para o intervalo entre duas leituras obtidas nos instantes t_1 e t_2 da etapa C) será:

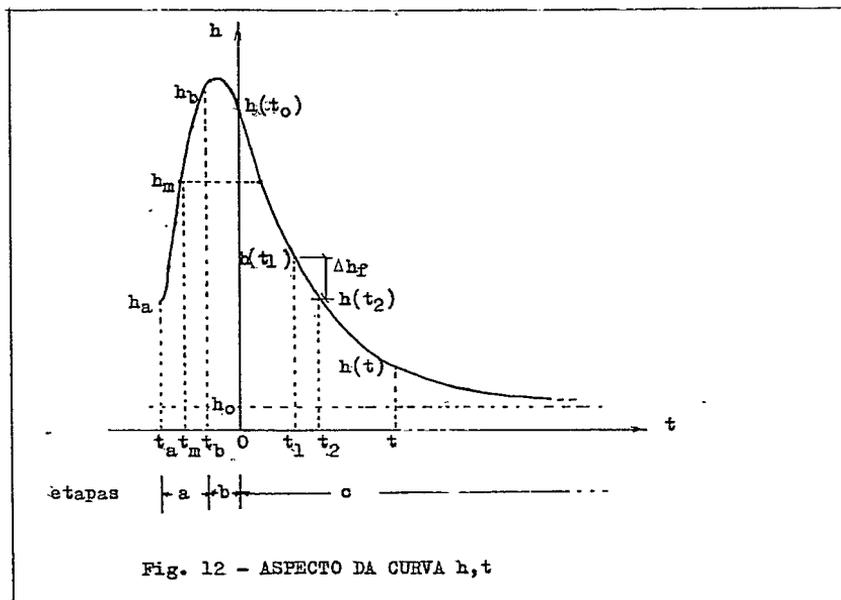


Fig. 12 - ASPECTO DA CURVA h, t

$$\Delta h_f = h(t_1) - h(t_2) \quad (4.1.2)$$

Que pode ser escrito como:

$$\Delta h_f = (h(t_1) - h_0)(1 - e^{-a(t_2 - t_1)}) \quad (4.1.3)$$

As correções das fugas para os intervalos Δt entre leituras nas etapas a) e b), (quando a posição do índice (h, t) não obedece a exponencial, por exemplo para o nível h_m) podem ser calculadas aproximadamente, multiplicando-se o Δt pela taxa média de fuga do intervalo $\frac{\partial h}{\partial t}$ obtida no ponto m do trecho exponencial, no mesmo nível do h_m .

A soma das variações da altura aparente Δh com as correções de fuga permite obter:

$$\Delta H = \Delta h_a + \Delta h_f$$

Comparando-se a energia fornecida ao calorímetro pelo efeito Joule ΔJ com a variação de altura corrigida ΔH obtém-se o parâmetro de calibração do calorímetro $\frac{\Delta J}{\Delta H}$ (J/mm).

Para o calorímetro montado para este trabalho o parâmetro de calibração $\frac{\Delta J}{\Delta H} = (3,4 \pm 0,1) \text{ J/mm}$, (vide apêndice B).

4. 2. DENSITÔMETRO.

As dimensões e o grau de precisão do densitômetro dependem respectivamente do diâmetro das manchas e das variações da sua opacidade.

A janela de saída do feixe no acelerador tem um diâmetro de 20 mm, mas considerando a abertura do feixe após espalhamento na amostra deveremos prever manchas opacas de até 30 mm de diâmetro.

A platina para varrer uma área de $30 \times 30, \text{mm}^2$ precisa permitir que a mancha se desloque sobre uma área de $60 \times 60 \text{mm}^2$.

As manchas obtidas em lamínulas de espessura da ordem de 0,1 mm tem densidade óptica de no máximo 0,1 com variações de região para região da ordem de 0,002; estas densidades são muito pequenas.

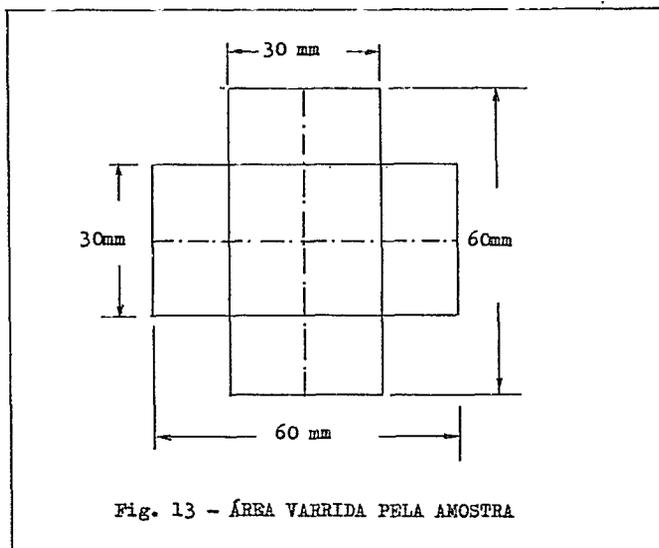


Fig. 13 - ÁREA VARRIDA PELA AMOSTRA

Uma solução para se obter dispositivos capazes de oferecer sensibilidade desta ordem, é usar no densitômetro uma fotomultiplicadora.

A luz que incidirá na amostra deverá ser colimada para definir bem a região em estudo mas antes de atingir a fotomultiplicadora, deverá ser dispersa para evitar evaporação local do fotocátodo (para restringir ainda mais a possibilidade de evaporação, usa-se uma tensão de polarização relativamente baixa ($\sim 1600V$)). Também é conveniente que a tensão possa ser ajustada para permitir a normalização da leitura V_0 de transparência máxima.

A escolha da lâmpada, da sua tensão de alimentação e da resistência de carga da fotomultiplicadora dependerá em última análise, da colimação da luz e das escalas do voltímetro utilizado que irá permitir a leitura das tensões na resistência de carga da fotomultiplicadora. No densitômetro construído para este trabalho usou-se uma lâmpada de 3 W alimentada por uma fonte estável e usou-se uma resistência de carga de $10.k\Omega$ obtendo-se para transparência máxima uma tensão de $(500,0 \pm 0,2)mV$.

Os parafusos micrométricos da platina tem passo de $1mm$, e suas posições determinam o ponto (x,y) sobre as lamínulas que por sua vez deverão ser postas na platina sempre na mesma posição.

O método aqui descrito pode dar resultados mais rápidos com densitômetros mais automatizados, (já que o protótipo montado para este trabalho é de operação manual embora ofereça bastante precisão).

4. 3. CURVA DENSIDADE ÓPTICA VERSUS DOSE .

É difícil a obtenção desta curva. Para se obter uma aproximação desta, procedeu-se da seguinte forma:

- a) Considerou-se como dose média em cada lamínula, o quociente das parcelas da energia absorvidas pela fração da massa onde a densidade óptica é igual ou superior a 0,002, (valor escolhido pelo limite de sensibilidade do densitômetro).
- b) Considerou-se como dose máxima, o triplo da dose média, o que equivale à hipótese simplista de se considerar a distribuição de energia caindo linearmente da dose máxima a zero isotropicamente, a partir do centro da região. O baricentro desta distribuição (correspondendo a dose média), se situa a um terço da dose máxima.
- c) Para densidade óptica máxima, foi tomado o valor médio entre as quatro maiores leituras de cada mancha, e depois ajustado para a sequência das trinta manchas em estudo.
- d) A curva é traçada como densidade óptica máxima versus \log_{10} da dose máxima, para evidenciar toda a faixa da lei em estudo, fig. 16, (em parte reproduzida na fig. 11 em escalas maiores).

5. MEDIDAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

- a) Potência do feixe
- b) Corrente do feixe
- c) Energia por partícula

As medidas de potência do feixe e corrente do feixe obtidas simultaneamente permitem a determinação da energia por partícula.

Com o auxílio do calorímetro, foram feitas medidas de potência do feixe do acelerador de 2 MeV existente no CBFF. Estas medidas e seus resultados podem ser grupadas no seguinte quadro:

tempo Δt (s)	Corrente do feixe i (μA)	Níveis do índice $h_0=39,2mm$		Δh_L (mm)	Δh_F (mm)	ΔH (mm)	ΔE (J)	Potência do feixe P (W)	Energia partícula
		h_2 (mm)	h_1 (mm)						
5,0s	4,7	53,0	39,2	13,8	0,2	14,0	47,6	9,5	(2,03 \pm 0,12)MeV
5,0	4,6	61,0	48,8	12,2	0,3	12,5	42,5	8,5	
5,0	4,9	71,6	57,0	14,6	0,5	15,1	51,3	10,3	
10,0	4,9	93,0	66,8	26,2	0,8	27,0	91,8	9,2	
10,0	5,0	101,2	74,0	27,2	1,5	28,7	97,6	9,8	

As colunas $\Delta t(s)$, $i(\mu A)$, h_2 e h_1 correspondem às leituras feitas de tempo, corrente, e níveis do índice líquido no fim e no início de cada período do acelerador ativo.

Nas colunas seguintes $\Delta h_x = h_2 - h_1$, Δh_f é a correção das fugas obtidas da calibração usando como referência o nível h_0 e $\Delta H = \Delta h_x + \Delta h_f$.

A coluna ΔE é o produto dos valores ΔH pelo parâmetro operacional do calorímetro $\left(\frac{\Delta J}{\Delta H}\right)$ calibração enquanto a coluna P é obtida pela expressão $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ e a última coluna é a energia por partícula obtida pela expressão P/i , e o valor corrigido com a radiação de freiamento e a perda de energia no ar.

Para se obter o Δh_f é conveniente mudar os referenciais h_0 tanto das medidas como da calibração para $h_0 = 0$.

CÁLCULOS DA ENERGIA DAS PARTÍCULAS

$$\bar{P} = 9,5 \text{ W}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\bar{P}_i^2 - P_i^2} = 0,5 \text{ W}$$

$$P = (9,5 \pm 0,5) \text{ W}$$

$$\bar{i} = 4,9 \mu A$$

$$\sigma_i = \sqrt{23,62 - 23,61} = \sqrt{0,01} = 0,1 \mu A$$

$$i = (4,9 \pm 0,1) \mu A$$

Para se obter:

$$\epsilon \text{ (MeV)} = \frac{\text{Energia}}{\text{partícula}} \text{ (MeV)} = \frac{\text{Energia}}{\text{Carga}} \left(\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} \right)$$

Tem-se:

$$\frac{E}{\text{Carga}} \left(\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} \right) = \frac{P \text{ (W)}}{i \text{ (A)}}$$

então,

$$\epsilon \text{ (MeV)} = \frac{9,5 \pm 0,5}{4,9 \pm 0,1} \text{ MeV}$$

$$\bar{\epsilon} = 1,94 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{\epsilon} = \bar{\epsilon} \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_P}{P} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_i}{i} \right)^2} = 1,94 \sqrt{\left(\frac{0,5}{9,5} \right)^2 + \left(\frac{0,1}{4,9} \right)^2} = 0,11$$

$$\epsilon = (1,94 \pm 0,11) \text{ MeV}$$

Fazendo a correção da radiação de freiamto (para 2,8%, vide apêndice

E) tem-se:

$$\epsilon' = \epsilon \times 1,028 = (1,99 \pm 0,11) \text{ MeV}$$

Considerando a energia perdida no tubo de entrada (2% vide apêndice G) tem-se a energia dos elétrons:

$$\bar{W} = 1,02 \times e' = (2,03 \pm 0,12) \text{ MeV}$$

(A potência média corrigida é $(10,0 \pm 0,5) \text{ W}$)

5. 2. FOCALIZAÇÃO E DIREÇÃO.

Foram efetuadas no acelerador de 2 MeV do CBPF, um conjunto de medições com o fim de se obter, as características de degradação da focalização numa situação específica do feixe colimado para um diâmetro de 3 mm dando uma potência de 1,8W e para isto, irradiou-se um conjunto de 30 lâminulas de 0,1mm justapostas, com um tempo de 5s.

Das medidas densitométricas traçou-se as curvas de isodensidades tanto nos planos das laminulas(x,y) como nos planos perpendiculares(x,z) e (y,z) conforme figuras 14 e 15.

Estas curvas de isodensidades nos planos(x,y) mostram por uma análise visual direta as características de degradação da focalização do feixe.

As figuras obtidas das primeiras lâminulas trazem informações sobre a focalização primitiva do feixe. Estas informações serão tanto mais precisas quanto menor for a fração de energia do feixe absorvida na laminula, (O tipo disponível, vidro de 0,1mm de espessura, absorve 18% da

energia).

As figuras de isodensidades nos planos, (x,z) e (y,z) trazem informações relacionadas com as características de direção de penetração do feixe no material irradiado. A curva densidade óptica versus dose, figura 16, obtida para as laminulas de vidro, utilizadas como padrão (vide item 4.2), converte as linhas de isodensidades em linhas de isodoses.

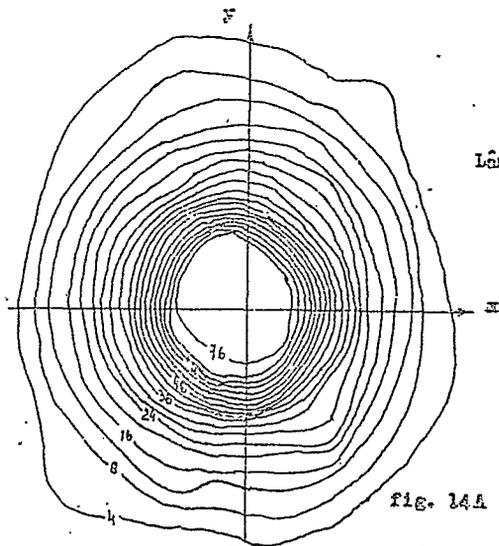
5. 3. MEDIDAS DE FREQUÊNCIA E DISPERSÃO NA ENERGIA.

Utilizando-se o sistema de análise descrito no final do capítulo 2, foram feitas as medidas de frequência e de dispersão na energia do acelerador, apresentado na Tabela (1), e segundo as quais fez-se o gráfico correspondente; figura 17.

Com a contagem do tempo e o número de pulsos obtidos no contador de pulsos, obteve-se a frequência de 188 Hz, correspondente à frequência do injetor de elétrons do acelerador.

5. 4. A FORMA DO PULSO

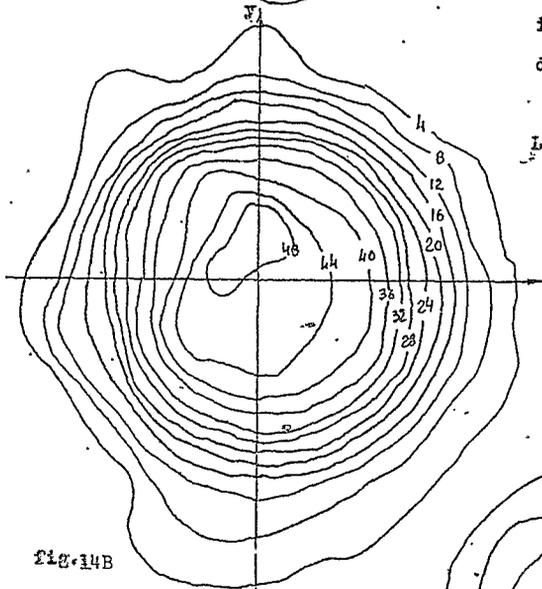
Utilizando-se o osciloscópio à saída do pré-amplificador conforme analisado no item 3.2., e um dispositivo diferenciador composto de uma linha de retardo curto-circuitada, obteve-se a forma do pulso de corrente do feixe, figura 18.



Lâmina 1ª

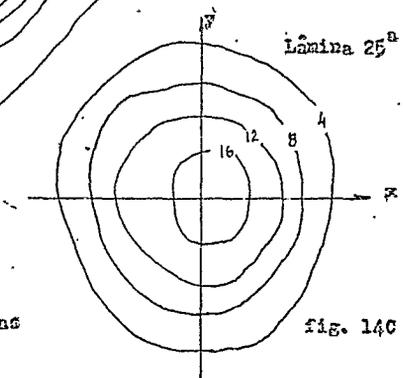
fig. 14A

As densidades ópticas indicadas estão em unidades de 10^{-3} .



Lâmina 15ª

fig. 14B



Lâmina 25ª

fig. 14C

Fig. 14 - Mapas de isodensidades puros das lamínulas

As densidades ópticas indicadas estão em unidades de 10^{-3} .

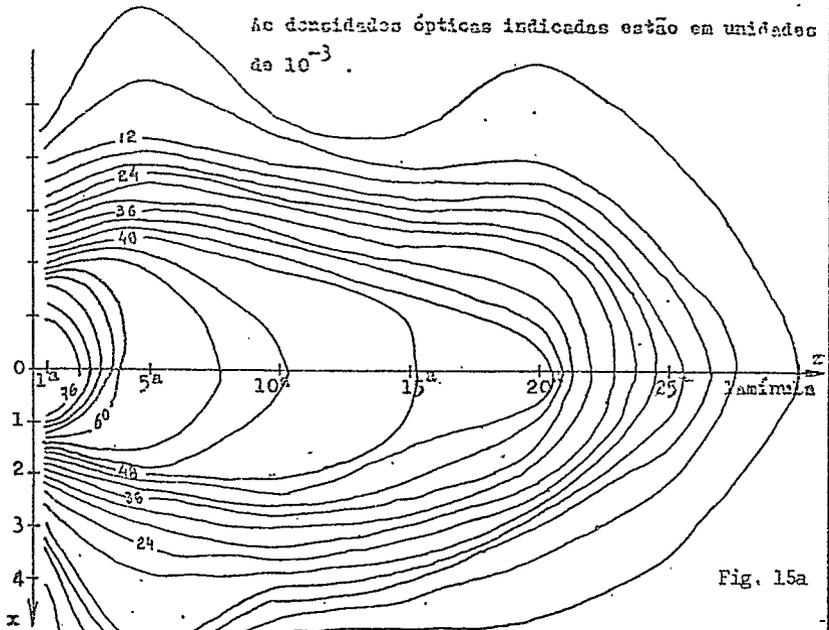


Fig. 15a

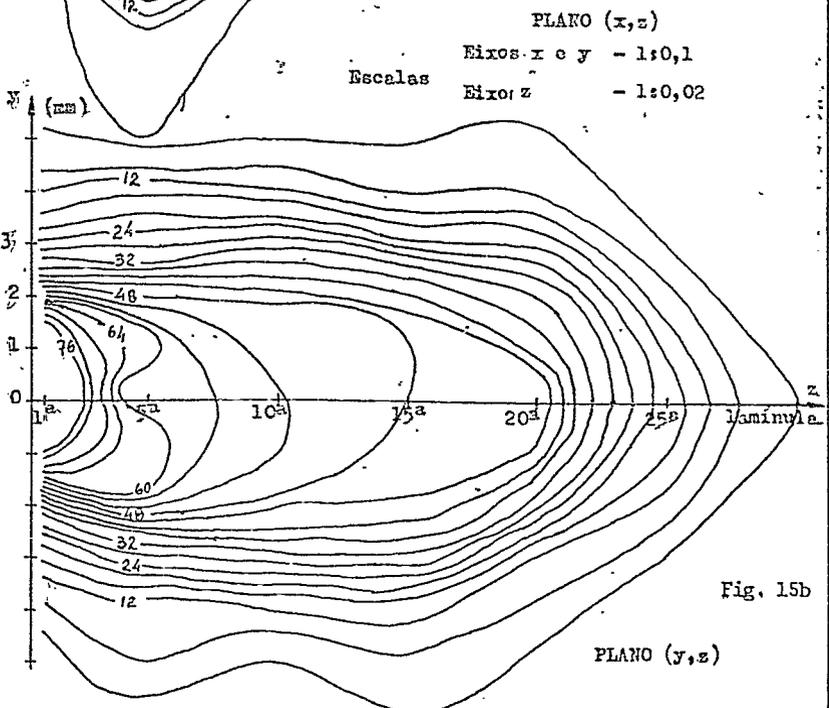


Fig. 15b

Fig.15 - MAPAS DE ISODENSIDADES : PLANOS LONGITUDINAIS

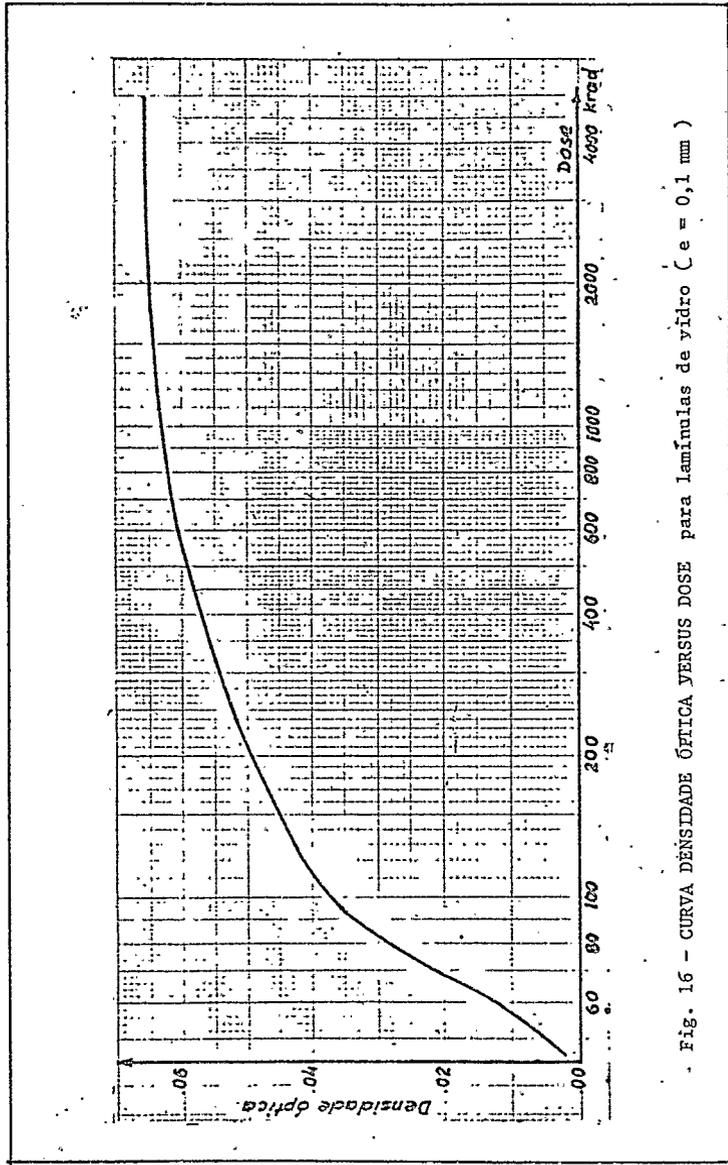


Fig. 16 - CURVA DENSIDADE ÓPTICA VERSUS DOSE para laminulas de vidro (e = 0,1 mm)

T A B E L A I

ESPECTRO DO PULSO DO LINAC SEM COLIMADOR ENTRE OS CANAIS 384 - 511

```

384 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
392 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
400 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
408 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
416 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
424 000000 000000 000001 000000 000000 000001 000000 000000
432 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
440 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
448 000000 000000 000000 000000 000000 000008 000085 000317
456 000647 000893 001474 002003 002253 002838 003507 004728
464 006092 005748 005740 005929 005443 004258 003337 002353
472 001529 000688 000304 000194 000106 000055 000021 000004
480 000001 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
488 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
496 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000
504 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000 000000

```

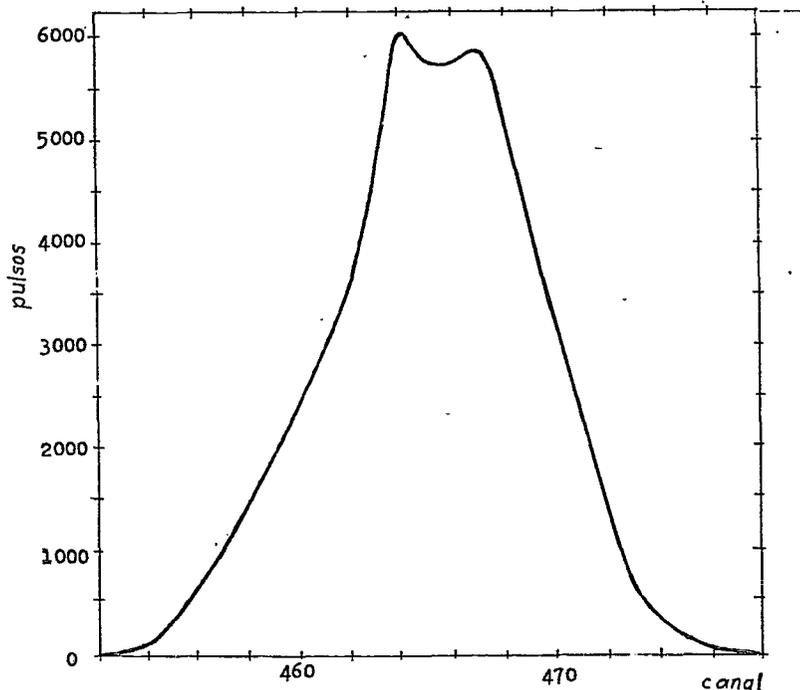
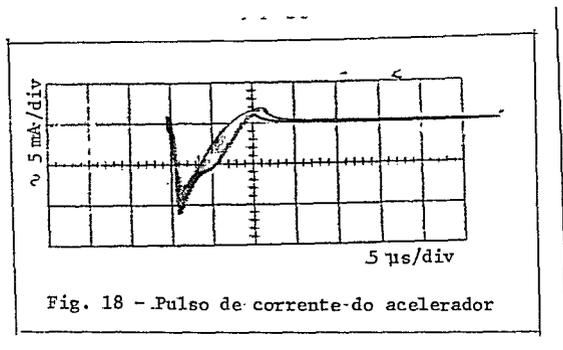


Fig. 17 - CURVA DE DISPERSÃO DA AMPLITUDE DOS PULSCS



C O N C L U S Ū E S E D I S C U S S Ū E S .

Este trabalho mostra que o propósito de se obter um método para determinar os parâmetros de mérito de feixes de elétrons de aceleradores satisfazendo as exigências de portabilidade do equipamento, precisão e rapidez das medidas, é perfeitamente atingível, pelo menos na faixa de energia onde foi testado (~2 MeV).

Estes procedimentos podem ser utilizados tanto para a calibração e controle das características do feixe (medidas de energia, focalização e dispersão da energia) como em suas aplicações (medidas de isodensidades, energia e potência do feixe).

Apesar do dispositivo ser barato e de fácil construção, as medidas não apresentam flutuações além dos erros já comentados (cerca de 5%).

Os resultados sobre potência do feixe e corrente elétrica apresentam dispersões inferiores a 5% e 2%, respectivamente, permitindo o cálculo da energia por partícula com erro inferior a 5,4%.

Os valores encontrados destas três grandezas foram:

Potência média do feixe:	$(10,0 \pm 0,5) \text{ W}$
Corrente média.....:	$(4,9 \pm 0,1) \text{ } \mu\text{A}$
Energia por partícula...:	$(2,03 \pm 0,12) \text{ MeV}$

A curva de dispersão da amplitude dos pulsos tem uma semi-largura de

1% e mostra existir duas classes de impulsos correspondendo a valores distintos de corrente média. Estas informações tem pertinência apenas para uma observação mais fina da qualidade dos pulsos, e para explicar a oscilação na forma do pulso (vide figura 18).

A frequência e a forma dos pulsos permitem avaliar a corrente de pico que é de ~1000 vezes a corrente média, (relação entre o período e a largura dos pulsos).

O método utilizado envolve algumas aproximações e modelos funcionais simplificados, que merecem alguns comentários.

No que diz respeito às medidas calorimétricas, cabe justificar algumas das aproximações empregadas. Em primeiro lugar o tratamento dado ao ar como gás perfeito encontra justificativa no valor de $C_p - C_v$ nas condições da experiência. Em segundo lugar cabe também uma palavra de explicação sobre o procedimento adotado no tratamento das transferências de energia do feixe diretamente ao gás do calorímetro. Trata-se, como se sabe, principalmente de processos elásticos com elétrons atômicos que não afetam graus de liberdade das moléculas como um todo e não contribuem diretamente para incrementar a energia cinética. Exceto, talvez, pela quebra de moléculas, quando algum acréscimo de energia cinética pode se manifestar mas que de resto é neutralizado pela forte probabilidade de recombinação, a energia transferida vai finalmente aparecer sob a forma de energia cinética de elétrons primários ou secundários que são absorvidos muito an-

ser simulada em computador ou então extraída a partir de um modelo "ad hoc" como o utilizado. A primeira alternativa padece do mesmo defeito assinalado acima. A segunda, adotada neste texto, tem sua validade apoiada na adequação do modelo aos dados experimentais. Os dados aqui obtidos fornecem um limite prático para a área transversal onde a energia é absorvida e exibem uma razão entre as densidades ópticas máxima e média igual a três. O modelo é construído a partir desses dados e permite extrair valores aproximados das doses máximas em cada laminula, a serem relacionadas com as densidades ópticas máximas.

O método foi testado para um acelerador de 2 MeV, mas pode ser estendido a aceleradores de energia mais alta, se se proceder às modificações estruturais necessárias nos aparelhos. Para medir energia de feixes de aceleradores de 15 MeV, utiliza-se calorímetro à água ⁽⁴⁾. Estes aparelhos utilizam água num sistema circulatório para absorver a energia dos elétrons, porisso não podem concorrer quanto a portabilidade, com o calorímetro à gás.

Para determinação dos outros parâmetros há necessidade de se encontrar outros materiais, que se prestem para servir de padrões na densitometria óptica. Para estes casos a mica é uma proposta promissora, pois apresentou uma resposta qualitativa boa nos testes efetuados.

(4) Lovell e Hsun Shen - Phys. Med. Biol., 21,2 (1976) 198

A P Ê N D I C E A

PARÂMETROS PARA CALORIMETRIA

1. Acelerador.

Características previstas do feixe sem colimador:

Corrente elétrica.....: $i = 10 \mu\text{A}$

Energia por partícula.....: $E/\text{partícula} = 2 \text{ MeV}$

Diâmetro do feixe na saída: $\phi = 20 \text{ mm}$

Potência do feixe.....: $P = 2 \text{ MeV} \times 10 \mu\text{A} = 20 \text{ W}$

Para utilização do feixe com colimador a corrente será muito menor dependendo da geometria do colimador.

2. Calorímetro.

Dimensões:

Volume interno.....: $V_i = 1,4 \text{ l} \approx 1400 \text{ cm}^3$

Gás utilizado.....: ar

Massa de ar.....: $m_{\text{ar}} = 1,8 \text{ g}$

Capacidade térmica.....: $C_{\text{ar}} = 0,43 \text{ Cal/}^\circ\text{C}$

Massa interna do calorímetro.....: $m_{\text{aço}} = 520 \text{ g}$

Capacidade térmica do calorímetro: $C_{\text{aço}} = 62,4 \text{ Cal/}^\circ\text{C}$

Massa do copo interno.....: $m_{\text{cu}} = 60 \text{ g}$

Capacidade térmica do copo.....: $C_{\text{cu}} = 5,6 \text{ Cal/}^\circ\text{C}$

Capacidade térmica total:

$$C = 68,4 \text{ Cal/}^{\circ}\text{C} = 286 \text{ J/}^{\circ}\text{C}$$

Taxa de variação de temperatura prevista:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{C} = \frac{20 \text{ W}}{286 \text{ J/}^{\circ}\text{C}} = 0,07 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$$

Taxa de variação de volume do ar previsto:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \beta_{\text{ar}} V_1 \frac{\Delta T}{\Delta t} = 0,4 \text{ cm}^3/\text{s}$$

A P E N D I C E B

CALIBRAÇÃO DO ÍNDICE LÍQUIDO

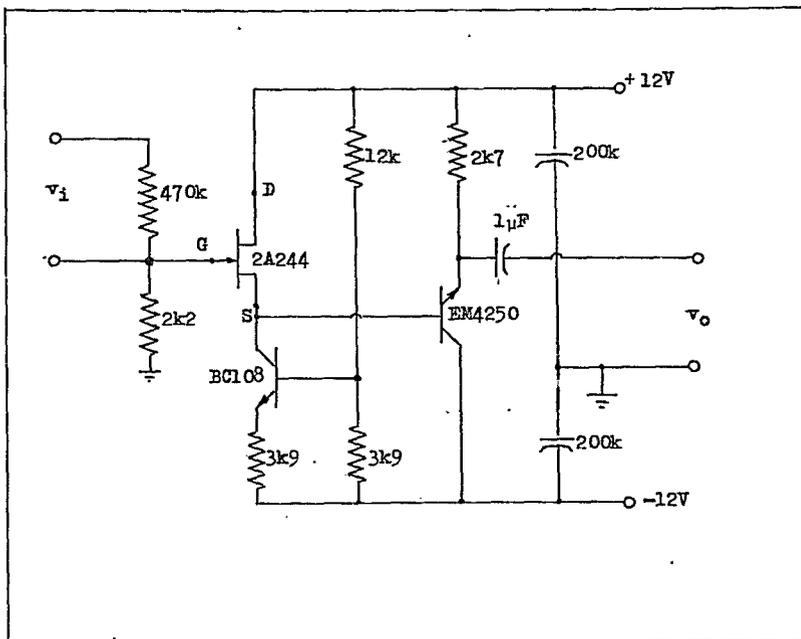
ΔJ (J)	ΔH (mm)	$x = \frac{\Delta J}{\Delta H}$ J/mm	x^2	
1ª série				
60,0	17,7	3,38	11,42	$\bar{x} = 3,459$ $\overline{x^2} = 11,97$ $\sigma_x = 0,07$
60,0	17,1	3,51	12,32	
60,0	17,1	3,51	12,32	
60,0	17,6	3,41	11,63	
60,0	17,6	3,41	11,63	
60,0	17,3	3,47	12,04	
60,0	17,0	3,53	12,46	
60,0	17,4	3,45	11,90	
2ª série				
75,0	23,2	3,23	10,43	$\bar{x} = 3,351$ $\overline{x^2} = 11,243$ $\sigma_x = 0,11$
75,0	21,8	3,44	11,82	
75,0	22,3	3,36	11,29	
75,0	22,2	3,38	11,42	
85,0	24,4	3,48	12,11	
80,0	22,9	3,49	12,18	
78,8	24,5	3,22	10,37	
87,5	27,3	3,21	10,30	

Média Geral $\frac{\Delta J}{\Delta H} = (3,40 \pm 0,10) \text{ J/mm}$

Neste quadro a 1^a coluna contém as energias ΔJ fornecidas ao calorímetro pelo efeito Joule; a 2^a coluna contém as variações de altura do índice líquido com as correções de fuga, e as outras duas colunas auxiliam na obtenção das médias da razão $\Delta J/\Delta H$ (parâmetro de calibração do calorímetro).

A P Ê N D I C E D

Circuito do pré-amplificador.



O FET do estágio de entrada tem capacitância $C_i = 1\text{pF}$ e responde a sinais de $f_{\text{max}} \sim 450\text{ MHz}$.

A P Ê N D I C E E

CÁLCULO DA PERDA DE ENERGIA, DO CALORÍMETRO, POR RADIAÇÃO DE FREIAMENTO.

Para fazer a correção da perda de energia por radiação de freiamto avalia-se esta perda com auxílio da expressão:

$$-dE_0 = NE_0(k \beta_{\text{rad}}) dx \quad (5) \quad (E. 1)$$

onde,

$$\beta_{\text{rad}} = \frac{4Z^2 r_0^2}{137} \ln 183 Z^{-1/3} \quad (E. 2)$$

O número atômico do Cobre $Z_{\text{Cu}} = 29$

O raio clássico do elétron $r_0 = 2,82 \times 10^{-13} \text{ cm}$

A razão $k_{\text{Cu}} = 0,5$ obtido do gráfico fig. da referência.

A energia das partículas é $E_0 = 2 \times 0,51 (\text{m}_0 c^2) = 1,02 (\text{m}_0 c^2)$

A molécula grama do Cobre $p = 63,57 \text{ g}$

A densidade é $\rho = 8,92 \text{ g/cm}^3$

O nº de átomos por cm^3 é:

(5) Koch e Mötzt - Rev. of Modern Phys. 4 (1959) 949

$$N_{\text{Cu}} = \frac{6,02 \times 10^{23} (\text{átomos/mol}) \times 8,92 (\text{g/cm}^3)}{63,57 (\text{g/mol})}$$

$$N_{\text{Cu}} = 8,45 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3$$

Levando-se estes valores na (E. 2) encontra-se:

$$\rho_{\text{rad}} = 7,98 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

(6)

O alcance de elétrons de 2 MeV no cobre é $x = 0,865 \text{ mm}$

E para uma espessura $x = 0,865 \text{ mm}$ obtém-se da (E. 1):

$$E_0 = -2,9 \times 10^{-2} (m_0 c^2) - 5,8 \times 10^{-2} \text{ MeV}$$

O que permite determinar a perda percentual

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 2,9\%$$

Para radiação gama de energia de 2 MeV o coeficiente de absorção $\mu = 0,333/\text{cm}$ enquanto o fator de amortecimento será:

$$\text{F.A.} = e^{-\mu \Delta x}$$

(6) Tr. Tabata et al. - Nuclear Inst. and Meth. 103 (1972)85.

Para as paredes de aço do calorímetro onde $\Delta x = 0,1\text{cm}$ tem-se:

$$\text{F.A.} = 0,967$$

Considerando-se a reabsorção da radiação gama através deste fator tem-se a perda de energia do calorímetro devido a radiação de freiamento que será:

$$\frac{\Delta E}{E_0} \times \text{F.A.} = 2,9\% \times 0,967 = 2,8\%$$

A P Ê N D I C E F

CÁLCULO DO ERRO RELATIVO Q DA APROXIMAÇÃO FEITA NA EQUAÇÃO(3.1210)

$$Q = \frac{\text{termos em } (\Delta V)^2}{\text{termos em } \Delta V}$$

$$Q = \frac{\frac{\rho}{2A} \frac{C_p}{R} (\Delta V)^2 + \frac{\rho}{2A} \frac{C_v}{R} (\Delta V)^2}{\frac{C_p}{R} p_0 \Delta V + \frac{\rho}{A} \frac{C_v}{R} V_0 \Delta V}$$

que pode ser escrito como:

$$Q = \frac{\frac{C_p}{C_v} + 1}{\frac{A}{\rho} \frac{C_p}{C_v} p_0 + V_0} \times \frac{\Delta V}{2} \quad (\text{F. 1})$$

Para os gases diatômicos.....: $\frac{C_p}{C_v} = 1,4$

Para o calorímetro usado: o volume $V_0 = 1,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

O tubo comunicante tem.....: $A = 1,26 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

O índice de água tem.....: $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$

A pressão atmosférica.....: $p_0 = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

e as variações de nível do índice máximas $\Delta H = 0,1m$ dando $\Delta V = A \Delta H =$
 $= 1,26 \times 10^{-5} m^3$.

Levando estes valores na (F. 1) obtém-se:

$$Q = 0,047 \%$$

A P Ê N D I C E ' O

CÁLCULO DA ENERGIA PERDIDA NO TUBO DE ENTRADA.

Cálculo da energia perdida no ar ($\rho = 1,3 \text{ mg/cm}^3$) do tubo de entrada (comprimento $x = 15 \text{ cm}$).

$$\text{A taxa de perda de energia } \frac{dE}{dR} = \frac{E_0}{R} (1,265 - 0,191 \ln E_0)^{-1} \quad (2) \quad (G.1)$$

Para $E_0 = 2,03 \text{ MeV}$

$$R = 412 E_0^{1,265 - 0,0954 \ln E_0} \quad (G.2)$$

A perda relativa de energia no tubo será:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \rho \frac{dE}{dR} \times x \quad (G.3)$$

Levando as expressões (G.1), (G.2) e demais valores na (G.3) obtém-se:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 2\%$$

(2)

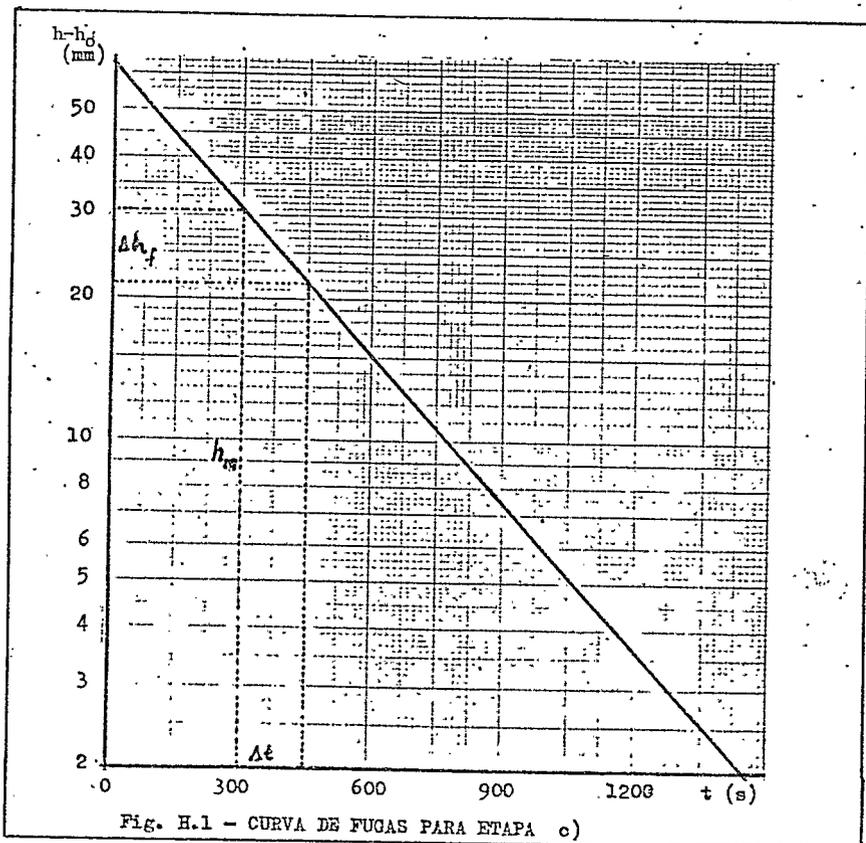
Katz e Penfold - Rev. of Modern Physics. 24 (1952) 28

A P Ê N D I C E H

A CURVA DE FUGAS

A curva de fugas fig. H. 1, abaixo, relaciona as alturas do índice líquido em relação ao nível de equilíbrio, $h-h_0$, com os tempos da etapa c) de calibração do calorímetro, e permite a determinação das correções de fugas.

Para um intervalo de tempo Δt com altura máxima h_m a correção de fuga será Δh_f .



B I B L I O G R A F I A

- (1) Birnbaum, Harth, Seren e Tobin - *Nucleonics* 13,4(1955)64 - Determining Betatron Energy by Activity Ratios.
- (2) Katz e Penfold - *Rev. Mod. Phys.*, 24(1952)28 - Range-Energy Relations for Electrons and the Determination of Beta-Ray End-Point Energies by Absorption.
- (3) Bhidey, Jennings e Kalmus - *Proc. Phys. Soc.*, 72(1958)973 - Measurement of Electron Beam Energy Using a Gas Čerenkov Detector.
- (4) Lovell e Hsun Shen - *Phys. Med. Biol.*, 21,2(1976)198 - A Flow Calorimetric Method of Determining Electron Beam Energy.
- (5) Koch e Metz - *Reviews of Mod. Phys.*, 31,4(1959)949 - Brčmsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data.
- (6) Tabata Ito e Okabe - *Nuclear Inst. and Meth.*, 103(1972)85 - Generalized Semiempirical Equations for the Extrapolated Range of Electrons.