

BB45 88234
IN 15-BR--3518



CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA CALORIMÉTRICO
PARA DOSIMETRIA DE FEIXE DE ELÉTRONS
EM PROCESSOS POR RADIAÇÃO**

HOMERO ENRIQUE BAÑADOS PÉREZ

Tese apresentada como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Doutor em Ciências
na Área de Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dra. Letícia Lucente Campos Rodrigues

São Paulo

1994

ÍNDICE

RESUMO	v
ABSTRACT	vi

CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO

1.1	Histórico	1
1.2	A necessidade da dosimetria	4
1.2.1	Aspectos de saúde pública	5
1.2.2	Otimização de processos por radiação	5
1.2.3	Controle independente	6
1.3	Objetivo do presente trabalho	7

CAPÍTULO 2 : FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1	Interação de elétrons com a matéria	8
2.1.1	Poder de freamento	12
2.1.2	Poder de freamento mássico total	12
2.1.2.1	Poder de freamento por colisão mássico	13
2.1.2.2	Poder de freamento por colisão restrito mássico	14
2.1.2.3	Poder de freamento por radiação mássico	15
2.1.2.4	Alcance de elétrons	16
2.2	Dosimetria de elétrons	17
2.2.1	Definições	17
2.2.2	Determinação da dose absorvida	19

2.2.3	Determinação da dose absorvida em materiais irradiados em aceleradores de elétrons	20
2.2.4	Tipos de dosímetros	21
2.2.5	Calibração de dosímetros	22
2.2.6	Dosimetria para controle de processos por radiação	22

CAPÍTULO 3 : CALORIMETRIA

3.1	Introdução	24
3.2	Constituição do calorímetro	26
3.3	Métodos de medidas calorimétricas	27
3.3.1	Calorimetria isotérmica	27
3.3.2	Calorimetria adiabática	27
3.3.3	Calorimetria por fluxo de calor	28
3.3.4	Calorimetria diferencial	28
3.4	Variação da temperatura do núcleo em função do tempo em diferentes métodos calorimétricos	29
3.4.1	Calorímetro adiabático	30
3.4.2	Calorímetro quase-adiabático	31
3.4.3	Calorímetro de fluxo de calor	32
3.4.4	Calorímetro diferencial	34
3.5	Calibração do calorímetro	35
3.6	Medição de temperatura	37
3.6.1	Termistor	37
3.7	Efeitos radioquímicos no núcleo do calorímetro	40

CAPÍTULO 4 : ACELERADORES DE ELÉTRONS

4.1	Introdução	41
------------	-------------------	-----------

4.2	Aceleradores de energia baixa	41
4.3	Aceleradores de energia alta	46
4.4	O acelerador de elétrons do IPEN-CNEN/SP	47

CAPÍTULO 5 : DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA CALORIMÉTRICO

5.1	Introdução	49
5.2	Parâmetros iniciais de projeto	50
5.3	Determinação do posicionamento do sensor de temperatura no núcleo do calorímetro	54
5.3.1	Proposição do problema	54
5.3.2	Determinação da distribuição da dose absorvida em função da profundidade no núcleo do calorímetro	56
5.3.2.1	Determinação da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite pelo programa EDMULT	56
5.3.2.2	Determinação da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite pelo programa EGS4	62
5.3.2.3	Determinação experimental da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite	63
5.3.3	Determinação do posicionamento do sensor de temperatura no núcleo	66
5.3.3.1	Método numérico de Schmidt	66
5.3.4	Construção do calorímetro	73
5.4	Calibração do sensor de temperatura	74
5.5	Desenvolvimento de uma metodologia de calibração do calorímetro	78
5.5.1	Resistores de aquecimento	79
5.5.2	Medição da corrente, tensão e tempo	80

5.5.3	Medição da variação de temperatura no núcleo e cálculo da capacidade térmica	84
5.5.4	Programa de calibração	85
5.6	Operação do calorímetro	89

CAPÍTULO 6 : RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1	Calibração do calorímetro	95
6.2	Avaliação da incerteza associada à determinação da dose absorvida	99
6.3	Utilização do calorímetro na dosimetria de feixe de elétrons	100

CAPÍTULO 7 : CONCLUSÕES **103**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **104**

APÊNDICE

1	Programa VARTEMP	115
2	Projeto do calorímetro	124
3	Programa CALTERM	130
4	Correlação dos dados de calibração do termistor	135
5	Correlação dos dados de calibração do sensor HALL	139
6	Programa DOFEC	141
7	Correlação dos dados de calibração do calorímetro	173
8	Cálculo da dose absorvida pelos parâmetros operacionais do acelerador e pela diferença de temperatura do núcleo do calorímetro	175

"DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA CALORIMÉTRICO PARA DOSIMETRIA DE FEIXE DE ELÉTRONS EM PROCESSOS POR RADIAÇÃO"

Homero Enrique Bañados Pérez

RESUMO

Foi desenvolvido um sistema calorimétrico para dosimetria de feixe de elétrons em processos por radiação constituído por um calorímetro com núcleo de grafite, a instrumentação para a medição de temperatura e a calibração elétrica, um microcomputador e os programas para o funcionamento automático do sistema.

A pesquisa foi orientada para a otimização dos parâmetros de projeto; o desenvolvimento de metodologias avançadas para a calibração do sensor de temperatura, a determinação da capacidade térmica em função da temperatura e determinação da dose absorvida; o desenvolvimento dos programas de computação necessários para a operação do sistema.

O intervalo de operação do calorímetro é entre 0,1 a 30 kGy, e a incerteza na medição da dose absorvida é de $\pm 1,8\%$ para um nível de confiança de 95%.

Foram realizados testes comparativos com outros métodos para determinação da dose absorvida utilizando o acelerador de elétrons do IPEN. Os resultados obtidos mostraram uma excelente concordância entre a dose absorvida determinada pelo calorímetro e a dose absorvida calculada a partir da potência nominal fornecida pelo acelerador.

"DEVELOPMENT OF A CALORIMETRIC SYSTEM FOR ELECTRON BEAM DOSIMETRY IN RADIATION PROCESSING"

Homero Enrique Bañados Pérez

ABSTRACT

A calorimetric system for electron beam dosimetry in radiation processing was developed. The system is composed by a graphite core calorimeter, the temperature measuring and electrical calibrating instrumentation, a microcomputer, and the software for the system automation.

The research was directed towards the optimization of the project parameters, the development of advanced methodologies for calibrating the temperature sensor, the determination of the thermal capacity as a function of the temperature, the measurement of the absorbed dose, and the development of the software needed for the system operation.

The operating range extends from 0.1 kGy to 30 kGy. The uncertainty in the measurement of the absorbed dose was estimated to be $\pm 1.8\%$ at the 95% confidence level.

Comparative tests of the absorbed dose measurements were made using the IPEN's electron accelerator. The obtained results showed an excellent agreement between the absorbed dose determined by the calorimeter and the absorbed dose calculated from the nominal power delivered by the accelerator.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde a descoberta dos raios-X por Röntgen, em 1895, e a descoberta da radioatividade por Becquerel, em 1896, o homem tem utilizado as propriedades especiais das radiações ionizantes para o seu benefício. Um campo de desenvolvimento, relativamente recente, que utiliza doses altas de radiação para conseguir efeitos biológicos, químicos e físicos, específicos, é chamado de "Processos por Radiação". O campo de processamento por radiação pode ser dividido nas grandes áreas seguintes: a esterilização de produtos médicos, a irradiação de alimentos, a modificação de plásticos por irradiação e, recentemente, a área de irradiação de efluentes.

A dosimetria, entendida como a área da física radiológica que se preocupa com a absorção de energia, é usada no desenvolvimento, autorização de operação (comissionamento) e no controle dos processos por radiação e é, conseqüentemente, essencial para esta nova indústria [9,33,41,65].

1.1 HISTÓRICO

As primeiras aplicações da radiação foram na medicina. A partir da descoberta da fissão nuclear do urânio por Hahn e Strassmann, em 1939, com o rápido desenvolvimento da bomba atômica e dos reatores nucleares, foi possível a produção de grandes quantidades de material radioativo que permitiram o início do processamento de materiais por radiação.

Um dos produtos da fissão do urânio produzido em grande quantidade é o ^{137}Cs , cujas propriedades radioativas o fazem potencialmente útil como fonte de radiação. Entretanto, o elevado custo da separação química do ^{137}Cs dos outros produtos de fissão do urânio tornam sua utilização dispendiosa.

Por outra parte, outro radioisótopo, o ^{60}Co produzido em reatores nucleares a partir da irradiação com nêutrons do ^{59}Co (estável), tem demonstrado ser a fonte de radiação mais popular e conveniente para a indústria de processamento de materiais por radiação.

Ao mesmo tempo que o desenvolvimento de energia nuclear foi se expandindo, avanços tecnológicos também ocorriam na indústria eletrônica estimulada pelo desenvolvimento do radar durante a guerra, o que tornou possível a construção, cada vez mais confiável, de aceleradores de elétrons de potência e energia altas, tais como os aceleradores lineares e aceleradores tipo Van de Graaff. Assim, somando-se as fontes radioisotópicas de atividade alta, que emitem raios gama altamente penetrantes, os aceleradores de elétrons, também de intensidade e energia alta, que emitem radiação menos penetrante, torna-se possível a irradiação de grandes volumes de materiais com doses altas de radiação [33,49].

Hoje, o processamento por radiação é uma indústria em contínuo crescimento com um ativo programa de desenvolvimento de novas aplicações [13]. A relação a seguir mostra algumas destas aplicações no Brasil:

Esterilização de produtos médicos. (1)

Esterilização de fármacos. (1)

Eliminação de microorganismos em alimentos e especiarias. (1)

Extensão da vida útil de alimentos perecíveis. (2)

Desinfestação de grãos e frutas cítricas. (2)

Inibição da germinação em cebolas e batatas. (2)

- Degradação de polímeros. (2)*
- Produção de compostos madeira-plástico. (1)*
- Reticulado ("cross-linking") de polímeros. (1)*
- Vulcanização de borrachas. (2)*
- Cura de recobrimentos plásticos. (1)*
- Cura de tintas de impressão. (2)*
- Eliminação de monômeros em polímeros. (2)*
- Reticulação de isolantes plásticos em cabos elétricos. (1)*
- Produção de plásticos termo-contráteis. (1)*
- Produção de lubrificantes secos. (2)*
- Imobilização de enzimas em, ou sobre, polímeros. (2)*

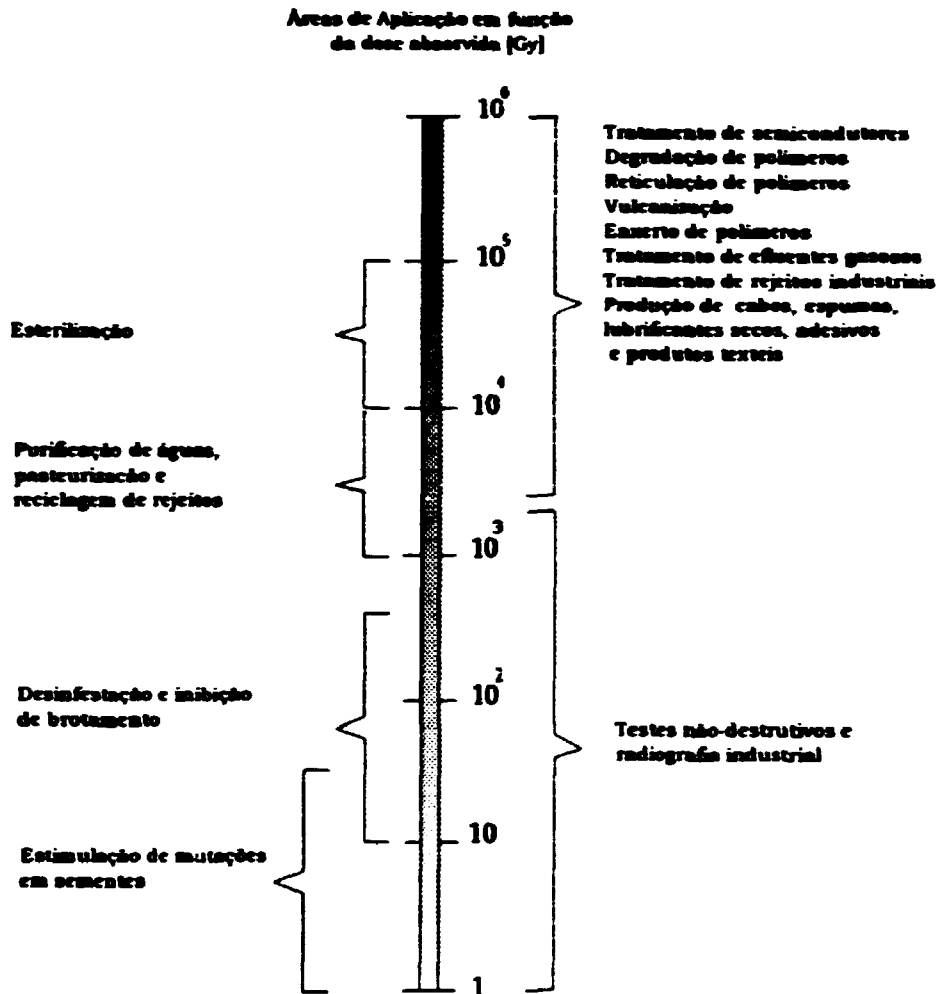
- Purificação de águas e tratamento de esgotos. (2)*
- Tratamento de rejeitos industriais. (2)*
- Depuração de efluentes gasosos. (2)*

- Modificação de materiais semicondutores. (2)*
- Indução de cor em gemas. (1)*

(1) : Atualmente em produção rotineira.

(2) : Atualmente em pesquisa e desenvolvimento.

Os intervalos de dose absorvida utilizados em alguns processos são:



1.2 A NECESSIDADE DA DOSIMETRIA

Em todos os processos por radiação, anteriormente citados, a dosimetria está envolvida como um controle necessário para estabelecer o processo e para estudos de pesquisa e desenvolvimento. A dosimetria fornece a base quantitativa contra a qual as mudanças químicas, físicas ou biológicas induzidas pela radiação são medidas. É, conseqüentemente, a metodologia aplicada para assegurar que o processo por radiação atende às especificações e, também, para garantir que os

resultados obtidos no laboratório possam ser reproduzidos em outros laboratórios ou em uma instalação de irradiação industrial [9,10,33,35,65].

1.2.1 ASPECTOS DE SAÚDE PÚBLICA

A esterilização de produtos médicos e a irradiação de alimentos são dois processos que estão intimamente relacionados com a saúde pública. Isto também é verdade para as técnicas de irradiação de águas servidas e depuração de efluentes gasosos. Todos estes processos, quando corretamente aplicados, conferem grandes vantagens, e a dosimetria desempenha um importante papel para garantir resultados satisfatórios.

No caso de esterilização de produtos médicos por radiação as autoridades da saúde deverão aprovar o processo de esterilização por radiação, requerendo que todos os produtos médicos tratados sejam irradiados com uma dose acima de um valor predeterminado. Neste caso, o responsável pela operação da planta de irradiação deverá demonstrar por meio de dosimetria que todo o produto recebeu a dose de esterilização mínima. Pode também, em alguns casos, ser necessário demonstrar que a dose máxima nunca é ultrapassada [65].

No caso de irradiação de alimentos uma ampla faixa de dose é geralmente utilizada para gerar os diferentes efeitos desejados e, também, é importante, para cada efeito, as doses mínima e máxima aplicadas ao produto alimentar. Aqui também, a dosimetria é a única forma independente e quantitativa de regular e garantir o processo de irradiação.

1.2.2 OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS POR RADIAÇÃO

Em quase todas as outras aplicações de processos por radiação não há regulamentação imposta pelas autoridades da saúde, entretanto, algumas aplicações no tratamento de água e esgotos podem ser uma exceção. Consequentemente, não

há um requerimento oficial para que se demonstre que o produto irradiado está sendo tratado com um nível de dose bem definido. Por outra parte, parece provável que muitos produtos irradiados serão comercializados com o argumento de que o produto foi testado para o efeito desejado. Os processos por radiação são executados em uma instalação de irradiação e o cliente poderá requerer, como medida do controle de qualidade, que a dose aplicada seja avaliada por um dosímetro apropriado [11,65]. Os novos processos por radiação são desenvolvidos no laboratório de pesquisa, transferidos para desenvolvimento em escala de planta piloto e finalmente transferidos para uma exploração comercial. Esta transferência, do laboratório até a instalação comercial, é facilitada quando o desenvolvimento do efeito induzido por radiação é cuidadosamente aferido em função da dose, determinada pela dosimetria. Desta forma, a determinação da dose permite quantificar o efeito e estabelecer os parâmetros do processo. A dosimetria tem assim um importante papel na otimização dos processos por radiação, sendo uma medida através da qual se consegue também a otimização da operação comercial, tanto no aspeto financeiro quanto técnico [12,45].

1.2.3 CONTROLE INDEPENDENTE

A medição da dose de radiação, nos níveis de dose especificados utilizados nos processos por radiação, depende das mudanças físicas ou químicas induzidas em materiais, detectáveis por técnicas de análise bem estabelecidas. Essas mudanças utilizadas para a determinação da dose são, geralmente, independentes dos efeitos produzidos no atual processo, por exemplo, não dependem do número de microorganismos mortos ou do grau de polimerização de um plástico. Uma medição confiável e reproduzível da dose fornece uma verificação independente e quantitativa da eficiência do processo e pode ser usada para o controle do processo, para satisfazer o cliente e as autoridades normativas, ou para a otimização e controle rotineiro da operação [65].

A dosimetria das radiações oferece um meio barato e seguro para o controle da qualidade em processos por radiação. Entretanto, deve ser enfatizado que a determinação de valores elevados de dose absorvida sobre um amplo intervalo de taxa de dose, em vários meios e em diferentes ambientes, apresenta problemas especiais, que incluem efeitos de saturação, de temperatura, atmosféricos, de dependência da resposta com a energia e a taxa de dose e reações competitivas, todos os quais podem introduzir erros na medida da dose. A habilidade para corrigir os erros sistemáticos e minimizar a imprecisão depende do conhecimento do ponto de vista físico da interação entre a radiação e a matéria e dos procedimentos e materiais necessários para realizar a dosimetria [9,36].

1.3 OBJETIVO DO PRESENTE TRABALHO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema dosimétrico por calorimetria, de qualidade metrológica elevada e de funcionamento automático, para ser utilizado na determinação da dose absorvida em materiais irradiados com feixe de elétrons gerados por aceleradores de elétrons industriais.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 INTERAÇÃO DE ELÉTRONS COM A MATÉRIA

O entendimento dos processos físicos básicos de interação de elétrons de energia alta com a matéria é de fundamental importância para a determinação da dose absorvida em um meio irradiado por um feixe de elétrons [20].

A maior diferença entre as interações de partículas não-carregadas e carregadas é que as primeiras sofrem um pequeno número de interações, cada uma envolvendo uma grande perda de energia, enquanto que as partículas carregadas sofrem um elevado número de interações, cada uma com uma pequena perda de energia. Deste fato, podemos considerar que o elétron perde gradativamente sua energia cinética em um processo chamado de "aproximação de freamento contínuo" ou CSDA (*continuous slowing down approximation*) [15,19,20,64].

O elétron é uma partícula carregada possuindo um campo elétrico Coulombiano. Na passagem pela matéria interage com um ou mais elétrons ou com o núcleo da maioria dos átomos, transferindo em cada uma destas possíveis interações uma pequena fração de sua energia cinética. Elétrons com energias de MeV sofrem da ordem de 10.000 colisões quando atravessam um alvo, conseqüentemente, seu comportamento pode ser descrito pela teoria estatística do espalhamento múltiplo, que compreende os seguintes principais modos de interação :

- a) espalhamento inelástico com os elétrons do átomo;
- b) espalhamento elástico com os átomos;
- c) espalhamento inelástico com o núcleo (bremsstrahlung).

As duas primeiras formas de interação são os mecanismos mais importantes de perda de energia do elétron , onde é verificado um grande número de colisões, resultando na excitação e ionização dos átomos do meio atravessado [15,27,55].

Espalhamento inelástico : É a colisão entre o elétron incidente e um único elétron atômico, o qual é ejetado com energia cinética elevada e é chamado de raio delta (δ), tendo energia suficiente para provocar novas interações Coulombianas. A probabilidade de ocorrência desta interação aumenta quando o parâmetro de impacto é da ordem do raio atômico. Em relação ao espalhamento elástico, esta interação ocorre com menor frequência, porém, como a fração de energia cedida pelo elétron incidente é elevada, significa que as frações de energia cedidas ao meio em ambos os tipos de interação são da mesma ordem de grandeza [15,64].

Espalhamento elástico de elétrons pelo campo Coulombiano do átomo : É a interação mais provável, onde o elétron incidente perde energia através da ação cumulativa do espalhamento múltiplo. Em cada espalhamento o elétron perde uma pequena quantidade de energia, apenas a necessária para mudar sua trajetória, satisfazendo a conservação do momento da colisão. A secção de choque diferencial por átomo para espalhamento elástico é proporcional a Z^2 [27].

Espalhamento inelástico com o núcleo : Ocorre quando o parâmetro de impacto é menor que o raio atômico, resultando em uma interação radioativa inelástica. Como produto da interação do elétron com o campo Coulombiano do núcleo resulta a aceleração e a deflexão do elétron, com emissão de radiação eletromagnética (bremsstrahlung). Neste tipo de interação o elétron pode ceder até 100% de sua energia cinética para o fóton. A secção de choque diferencial por átomo para esta interação é também proporcional a Z^2 [20,27].

Com base nos tipos de interação do elétron com a matéria, descritos acima, podemos classificar os mecanismos de perda de energia cinética do elétron em :

Perda de energia por colisão : É o mecanismo mais importante de perda de energia por meio de um número grande de colisões com elétrons atômicos, resultando na excitação e ionização do material atravessado. A teoria clássica indica que o elétron incidente fornece um impulso ao elétron atômico, o qual é proporcional à força do campo Coulombiano e ao tempo que o elétron atua. O momento transferido ao elétron atômico é proporcional ao tempo de interação, ou seja, a $1/v$, onde v é a velocidade do elétron. Assim, a energia recebida pelo elétron atômico é proporcional à $1/v^2$ ou $1/E$, onde E é a energia do elétron incidente. A perda de energia dE ao longo de um incremento de percurso dl será também proporcional à densidade eletrônica do meio atravessado. Quando a energia do elétron é relativística, sua velocidade se aproxima de um valor constante e a variação $1/E$ de dE/dl se modifica. Entretanto, a contração do campo elétrico torna as colisões distantes mais prováveis e dE/dl aumenta levemente [15,19,20,55]. A figura 2.1 mostra esta relação.

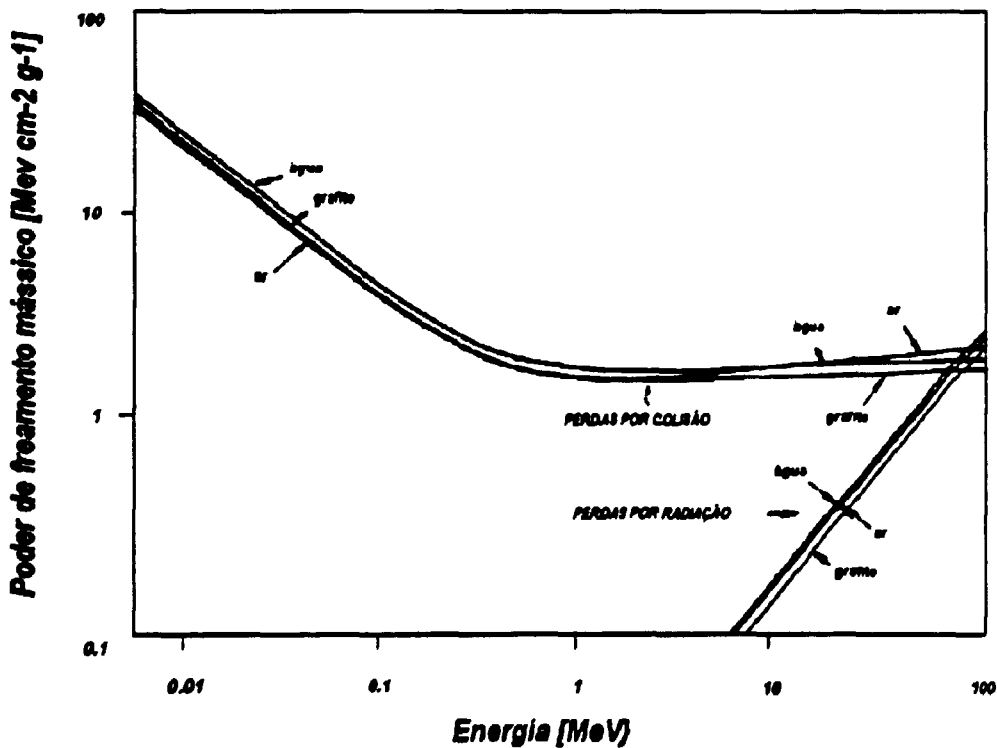


Figura 2.1 : Poder de freamento mássico de elétrons na matéria [51].

Em átomos com número atômico elevado, a energia de ligação dos elétrons atômicos das camadas mais internas é também elevada, fazendo com que a excitação seja menos provável e, em consequência, dE/dl diminui lentamente quando Z aumenta. Pela teoria da mecânica quântica, BETHE e ASHKIN demonstram que dE/dl devido à ionização e à excitação é proporcional ao quadrado da carga do elétron, ao inverso do quadrado das velocidades, à densidade do meio, à relação Z/A do meio e à função logarítmica do inverso do potencial de ionização médio I . Como Z/A e a função logarítmica de $1/I$ variam muito lentamente com Z , assim também ocorre com dE/dl [15,20,27,64].

Perda de energia por radiação : Da teoria eletromagnética clássica, uma partícula carregada sob uma aceleração f emite radiação a uma taxa proporcional à f^2 . Para uma partícula carregada no campo de um núcleo de número atômico Z , f é proporcional à Z/M , onde M é a massa da partícula. A taxa de emissão de radiação é, por isto, proporcional à $(Z/M)^2$. Devido à dependência com $1/M^2$, a perda de energia por radiação não é importante para qualquer partícula mais pesada que o elétron, aumentando proporcionalmente com a energia do elétron. A taxa de perda de energia por emissão de radiação representa menos de 1% da perda total de energia para elétrons de 1 MeV em tecido biológico, chegando a ser o processo predominante de perda de energia apenas quando a energia do elétron é superior a 100 MeV no mesmo material; esta situação ocorre em materiais de número atômico elevado, por exemplo o chumbo, para uma energia do elétron da ordem de 10 MeV. A distribuição da direção de emissão de radiação (bremsstrahlung) tem um máximo na direção de incidência do elétron e aumenta proporcionalmente com a energia do elétron. O ângulo médio de emissão é aproximadamente igual a mc^2/E , onde E é a energia do elétron, m sua massa e c a velocidade da luz [15,20].

2.1.1 PODER DE FREAMENTO (*Stopping Power*)

O poder de freamento é a taxa média de perda de energia dos elétrons em qualquer ponto ao longo de sua trajetória. É comum separar o poder de freamento total em dois componentes :

- a) Poder de freamento por colisão : energia média perdida por unidade de percurso devido à colisões Coulombianas com elétrons atômicos do meio, resultando em ionização e excitação;
- b) Poder de freamento por radiação : energia média perdida por unidade de percurso devido à emissão de bremsstrahlung no campo elétrico do núcleo atômico e dos elétrons do átomo.

O poder de freamento linear com dimensões de energia/percurso será nomeado como $-(dE/dx)$ ou S . Frequentemente é mais conveniente considerar o poder de freamento mássico, S/ρ , onde ρ é a densidade do meio. A utilização do poder de freamento mássico elimina a dependência com a densidade. Com S em unidades de MeV cm^{-1} e ρ em g cm^{-3} , S/ρ resulta na unidade de $\text{MeV cm}^2 \text{g}^{-1}$ [20,21].

2.1.2 PODER DE FREAMENTO MÁSSICO TOTAL

Para elétrons, o poder de freamento mássico total (*total mass stopping power*) $(S/\rho)_{\text{tot}}$ [ICRU 35] [20] inclui a perda total de energia dE por colisão e por radiação para uma espessura dl num material de densidade ρ . Para energias menores que 10 MeV, onde as interações nucleares são nulas, o poder de freamento mássico total pode ser separado em dois componentes [51] :

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{dE}{dl} \right]_{\text{tot}} = \left[\frac{S}{\rho} \right]_{\text{tot}} = \left[\frac{S}{\rho} \right]_{\text{col}} + \left[\frac{S}{\rho} \right]_{\text{rad}} \quad (2.1)$$

O primeiro componente, $(S/\rho)_{col}$, inclui todas as perdas de energia por colisão, as quais, diretamente, produzem elétrons secundários e excitações atômicas. Também inclui as perdas de energia devido à produção de radiação Cerenkov. O segundo componente, $(S/\rho)_{rad}$, inclui todas as perdas de energia do elétron primário que resultam na produção de bremsstrahlung.

2.1.2.1 Poder de Freamento por Colisão Mássico :

Segundo a derivação teórica de BETHE, ROHRLICH e CARLSSON [20,64], o poder de freamento por colisão mássico pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$\left(\frac{S}{\rho}\right)_{col} = \frac{2\pi r_e^2 m_e c^2 N_A Z}{\beta^2 M_A} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{\tau^2 (\tau + 2)}{2(1/m_e c^2)^2} \right] + F(\tau) - \delta \right\} \quad (2.2)$$

onde δ é a correção do efeito da densidade,

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + [\tau^2 / 8 - (2\tau + 1) \cdot \ln 2] / (\tau + 1)^2$$

$m_e c^2$ = energia equivalente à massa de repouso do elétron, E_0

τ = $E / m_e c^2$ → razão entre a energia cinética do elétron e E_0

β = v / c

v = velocidade dos elétrons

c = velocidade da luz no vácuo

N_A = Número de Avogadro ($6.02252 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

r_e = raio do elétron → $e^2 / m_e c^2$ ($2.818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)

Z = número atômico

M_A = massa atômica do elemento A

I = energia de excitação média

Como pode ser visto na expressão 2.2, é necessário conhecer a correção do efeito da densidade (δ) e a energia de excitação média (I) para a correta determinação do poder de freamento por colisão mássico.

2.1.2.2 Poder de Freamento por Colisão Restrito Mássico :

Na dosimetria das radiações é comum querer-se conhecer a fração de energia cedida e que é absorvida localmente, por exemplo, na vizinhança do percurso do elétron. Para obter esta informação com segurança devem ser feitos cálculos de transporte que levem em conta a energia inicial do espectro dos elétrons, a distribuição angular dos elétrons secundários criados pela ionização, a penetração, a difusão e o freamento dos elétrons secundários. Na descrição da colisão elétron-elétron, após a interação, o elétron de maior energia cinética é definido, por convenção, como elétron primário e o outro é definido como elétron secundário. Por essa razão, a energia do elétron secundário é sempre menor que a metade da energia do elétron incidente. Em muitas situações apenas as perdas de energia que resultam em elétrons secundários com energias inferiores a um valor de corte Δ são de interesse. O poder de freamento por colisão restrito mássico L_{Δ} / ρ inclui apenas essas perdas de energia e é, por conseguinte, menor que o poder de freamento por colisão mássico não-restrito. Uma aplicação do poder de freamento por colisão mássico restrito ocorre na Teoria da Cavidade de BRAGG-GRAY, como formulado por SPENCER e ATTIX [10,20], na qual a energia de corte Δ caracteriza a dimensão da cavidade. Outra aplicação ocorre na simulação do percurso dos elétrons no material pelo método de Monte-Carlo [31,46,54], tratando as muitas interações, cada uma com pequena transferência de energia, utilizando o poder de freamento por colisão mássico restrito na aproximação de freamento contínuo (CSDA). O poder de freamento por colisão mássico restrito é calculado pela seguinte expressão :

$$F(\tau, \Delta) = -1 - \beta^2 + \ln \left\{ \frac{4\Delta(\tau - \Delta)}{\tau^2} \right\} + \frac{\tau}{\tau - \Delta} + \left\{ \frac{\frac{\Delta^2}{2} + (2\tau + 1) \ln \left(1 - \frac{\Delta}{\tau} \right)}{(\tau + 1)^2} \right\} \quad (2.3)$$

onde Δ , tanto como τ na equação 2.3, são utilizados como fração da energia do elétron.

2.1.2.3 Poder de Freamento por Radiação Mássico :

As interações radiativas dos elétrons resultam, frequentemente, em perdas de energia grandes, e os elétrons que sofreram tais perdas contribuem, principalmente na região de energias baixas, na distribuição de energia dos elétrons primários. A perda de energia média dos elétrons, devido a colisões radiativas, não pode ser dada por uma única fórmula que leve em conta todas as energias e a natureza dos materiais. Para ilustrar uma forma do poder de freamento por radiação mássico, é dada a expressão para energias altas :

$$\left(\frac{S}{\rho} \right)_{\text{rad}} = \frac{4r_e^2 \alpha}{\beta^2} \cdot N_A \cdot \frac{Z(Z+1)}{M_A} \cdot (\tau + 1) \cdot m_e c^2 \cdot \ln(183Z^{-1/3} + 1/18) \quad (2.4)$$

onde α é a constante de estrutura fina ($\alpha \cong 1/137$).

Pode-se evidenciar que o poder de freamento radiativo mássico aumenta quase linearmente com a energia cinética do elétron na região de MeV, enquanto que o poder de freamento por colisão mássico tem uma leve dependência logarítmica com a energia naquela região [15,20,21].

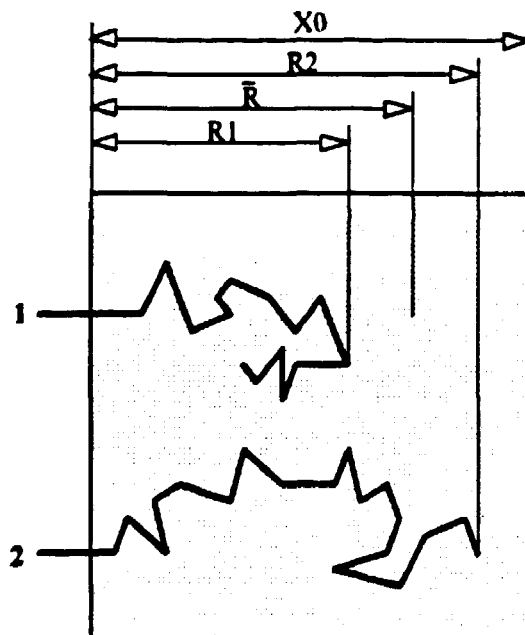
2.1.2.4 Alcance dos elétrons :

O percurso médio de um elétron de energia inicial E_0 pode ser definido integrando o inverso do seu poder de freamento total mássico; ou seja,

$$r_0 = \int_0^{E_0} \frac{dE}{\left(\frac{S(E)}{\rho}\right)_{\text{tot}}} \quad [\text{kg m}^{-2}] \quad (2.5)$$

Esta expressão está baseada na aproximação de freamento contínuo (CSDA), que representa o percurso que um elétron poderia fazer na passagem por um meio uniforme, se a sua taxa de perda de energia ao longo do percurso for sempre igual à taxa média de perda de energia. Na realidade, a taxa de perda de energia varia porém, este fato é ignorado na aproximação de freamento contínuo. Da mesma forma, deve ser notado que o alcance por CSDA representa o percurso dos elétrons (às vezes tortuoso) e não a profundidade de penetração na direção de incidência, como mostra a *figura 2.2* [15,20,21,27].

Figura 2.2 : Diagrama mostrando as possíveis trajetórias de dois elétrons com a mesma energia inicial em um absorvedor de espessura x_0 . Os alcances, CSDA, R_1 e R_2 (ou caminho total percorrido) seguem uma distribuição estatística e o alcance médio \bar{R} representa o valor médio da distribuição. Note-se que a profundidade de penetração é diferente do alcance.



2.2 DOSIMETRIA DE ELÉTRONS

2.2.1 DEFINIÇÕES

Dose absorvida e taxa de dose:

Em dosimetria de processos por irradiação a grandeza mais importante é a dose absorvida, D , a qual é definida como a energia média, $d\varepsilon$, depositada em um elemento de matéria, dividida pela massa da matéria, dm :

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad [\text{Gy}] \quad (2.6)$$

Esta definição é válida para a dose absorvida em um ponto do meio absorvedor da radiação, onde geralmente é feita uma média sobre a massa finita do material, que é obtida por um dosímetro calibrado em termos de energia depositada por unidade de massa em um dado material. A unidade de dose absorvida é o J kg^{-1} que tem o nome restrito de um dos pioneiros da física das radiações, medicina e biologia, L.H.GRAY, *gray* (Gy) ou múltiplos do Gy ($\text{kGy} = 10^3 \text{ Gy}$ ou $\text{MGy} = 10^6 \text{ Gy}$) e é sempre referida como dose absorvida em um material específico. A unidade especial de dose absorvida, *rad*, é definida como 100 erg g^{-1} ou $10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$, assim, 1 Gy é igual a 100 rad [19,20].

A dose absorvida por unidade de tempo é expressa como a taxa de dose absorvida \dot{D} :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [\text{Gy s}^{-1}] \quad (2.7)$$

Fluência e taxa de fluência :

O número de elétrons que incidem sobre uma dada secção de uma esfera, da , é descrito pela fluência, Φ :

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad [\text{m}^{-2}] \quad (2.8)$$

A taxa de fluência, ϕ , é definida por :

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da \cdot dt} \quad [\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (2.9)$$

Fluência de energia e taxa de fluência de energia :

A energia radiante dos elétrons, dR , incidente sobre uma dada secção de uma esfera, da , é descrita pela fluência de energia, Ψ :

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad [\text{J m}^{-2}] \quad (2.10)$$

A energia radiante, R , é definida como a energia dos elétrons emitida, transferida ou recebida. A unidade de R é o joule (J). Da mesma forma, a taxa de fluência de energia, ψ , é definida como :

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2R}{da \cdot dt} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (2.11)$$

Rendimento radioquímico :

Uma grandeza importante em dosimetria química é o rendimento radioquímico (*radiochemical yield*), $G(x)$, definido como o quociente entre a quantidade $n(x)$ de uma substância de uma determinada espécie x produzida, destruída ou alterada pela radiação, e a energia média cedida, ϵ , ao material irradiado.

$$G(x) = \frac{n(x)}{\epsilon} \quad [\text{mol J}^{-1}] \quad (2.12)$$

Alguns autores definem, o rendimento radioquímico como o valor de G (G-value), sendo "o número de moléculas produzidas, destruídas ou alteradas por 100 eV de energia absorvida" [15,19,20].

2.2.2 DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA

A dose absorvida em um ponto em um material específico pode ser medida pela utilização de um dosímetro calibrado . Quando o dosímetro é colocado no meio durante a irradiação, ele passa a constituir uma discontinuidade ou uma cavidade no meio, já que o dosímetro geralmente difere do meio com respeito ao número atômico, à densidade e às propriedades de absorção da radiação. A energia absorvida no dosímetro é, portanto, diferente da absorvida pelo meio não perturbado. A teoria da cavidade permite calcular a relação entre a dose medida na cavidade e a medida no meio. Para elétrons a dose absorvida no dosímetro ou em um ponto de referência em um dado meio pode ser determinada como o produto entre a fluência de elétrons, $\Phi(E)$, e o poder de freamento por colisão mássico, $S_{col}(E)/\rho$; assim a dose é:

$$D = \int_0^{E_{max}} \Phi(E) \cdot \frac{S_{col}(E)}{\rho} \cdot dE \quad (2.13)$$

Consequentemente, para cavidades ou dosímetros de pequenas dimensões e sistemas com propriedades semelhantes, onde a fluência no dosímetro colocado no meio e a fluência no meio não perturbado são iguais, a dose no meio, D_M , pode ser determinada pela equação 2.14.

$$D_M = D_C \cdot \frac{\left(\frac{S_{col}(\bar{E})}{\rho} \right)_M}{\left(\frac{S_{col}(\bar{E})}{\rho} \right)_C} \quad (2.14)$$

onde os subíndices M e C referem-se ao meio e à cavidade respectivamente e \bar{E} é a energia média do espectro de elétrons primários no ponto de medida do meio. Um dosímetro com espessura maior que o alcance dos elétrons nesse meio é totalmente

absorvedor e, nesse caso, a teoria da cavidade não se aplica. Se as suas massas são iguais, a dose média absorvida é igual em materiais absorvedores totalmente diferentes e irradiados com a mesma fluência, exceto por pequenas correções por diferenças no alcance de elétrons, retroespalhamento e produção de bremsstrahlung [15,60].

Para dosímetros de tamanho finito, a dose determinada deve ser referida a um ponto efetivo de medição P_{ef} , devido a possível existência de gradiente de dose no dosímetro. A localização do P_{ef} pode ser determinada experimentalmente pela medição da distribuição de dose no próprio dosímetro ou pode ser estimada pelo cálculo de transporte de elétrons pelo método de Monte-Carlo [20,31,54].

2.2.3 DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA EM MATERIAIS IRRADIADOS EM ACELERADORES DE ELÉTRONS

A determinação da dose absorvida em materiais irradiados por um feixe de elétrons gerado em um acelerador, baseada nos parâmetros operacionais do acelerador, é freqüentemente utilizada para se compara-la com a dose calculada a partir das medições experimentais, e fornece uma indicação razoável da distribuição da dose. A precisão no cálculo da dose absorvida depende da energia dos elétrons, da intensidade do feixe e da geometria da amostra [10]. No caso mais simples podemos considerar um feixe paralelo e monoenergético, com energia conhecida, que é completamente absorvido pelo material. A energia total absorvida é então obtida multiplicando-se a energia dos elétrons pela carga total depositada (desprezando perdas por retroespalhamento e bremsstrahlung). A precisão da dose média absorvida no material depende da precisão da medida da energia dos elétrons e da carga depositada. A distribuição da dose, em profundidade para as condições acima, pode ser calculada usando o método de Monte-Carlo [46,54]. Também podem ser utilizadas expressões analíticas para o cálculo do perfil de dose em profundidade em absorvedores multi-camadas.

Em muitas irradiações, em aceleradores de elétrons, o feixe é varrido ("scanned") na largura e sobre a superfície do material, que é transportado por um sistema de esteira. Os elétrons sofrem um considerável espalhamento (no ar) antes de atingirem o material; neste caso, devem ser consideradas as perdas na janela do acelerador e no ar, utilizando o poder de freamento total mássico em ambos os meios [26,63].

2.2.4 TIPOS DE DOSÍMETROS

Alguns laboratórios como o "UK National Physical Laboratory", na Inglaterra e o "US National Institute of Standards and Technology" nos Estados Unidos da América têm desenvolvido padrões de referência para dosimetria de doses altas tais como calorímetros e câmaras de ionização. Um *dosímetro de referência* é definido como um dosímetro de elevada qualidade metrológica que é calibrado contra um padrão de referência e, para ser utilizado, deve satisfazer critérios bem estabelecidos. Deve ter um sinal devido à radiação que possa ser medido com precisão, e este sinal deve ter uma relação funcional bem estabelecida com a dose absorvida. O calorímetro, a câmara de ionização e o dosímetro de sulfato férrico podem servir como dosímetro de referência se irradiados em condições tais que a resposta destes dosímetros não sofra a influência da taxa de dose [33,34,35,36].

O *dosímetro de transferência* é definido como aquele dosímetro que é suficientemente preciso e estável para que possa ser calibrado em relação a um padrão de referência ou um dosímetro de referência e ser transportado para uma instalação de irradiação para a avaliação apropriada da dose, ou para calibrar os dosímetros de rotina. O dosímetro de alanina, filmes radiocrômicos [56] e etanol clorobenzeno são exemplos de dosímetros de transferência.

O *dosímetro de rotina* é geralmente um padrão de trabalho que é usado rotineiramente na instalação de irradiação, mas deve ser frequentemente calibrado contra dosímetros de referência ou de transferência, pois não é estável o suficiente

para ser usado como dosímetro de transferência. O filme de triacetato de celulose e o polimetacrilato de metila são utilizados como dosímetros de rotina [32].

2.2.5 CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS

Alguns laboratórios possuem instalações e sistemas de medição que são usados para a determinação da dose absorvida em campos de fótons e elétrons em condições de dose e taxa de dose elevadas. O "US National Institute of Standards and Technology" (NIST) oferece um serviço de calibração de dosímetros utilizando um feixe contínuo monoenergético de elétrons com energias na região de 50 keV a 1,5 MeV e um feixe de elétrons pulsado com energias entre 1 e 4 MeV. A dose absorvida é determinada usando um calorímetro de grafite. No "UK National Physical Laboratory" (NPL) a calibração de dosímetros para doses altas é feita utilizando um acelerador linear de 10 MeV para gerar o feixe de elétrons e como dosímetros de referência são utilizados um calorímetro de grafite e dosímetros de dicromato de potássio [18,42,43,63].

2.2.6 DOSIMETRIA PARA CONTROLE DE PROCESSOS POR RADIAÇÃO

Como foi explicado na seção 2.1, em todos os processos por radiação, uma dosimetria realizada com precisão assegura que o tratamento por radiação requerido para o processo seja corretamente aplicado. Nos processos por radiação o controle dosimétrico é utilizado para garantir a qualidade do processo e do material irradiado [6,41].

A determinação da dose absorvida no material irradiado baseada apenas nos parâmetros operacionais ou cálculos teóricos não é recomendada. Neste caso, anomalias operacionais não detectadas podem causar, potencialmente, sérios

problemas. Só uma dosimetria acurada combinada com a atenção aos parâmetros operacionais assegura de que cada processo é realizado dentro das especificações.

A dosimetria tem três funções no controle de processos por radiação. A primeira diz respeito ao "comissionamento" ou autorização de funcionamento de uma nova instalação de irradiação, a segunda concerne à validação de um novo processo em uma instalação de irradiação estabelecida e a terceira é relativa à utilização da dosimetria para o controle de qualidade na operação de rotina do processo [9,33,45,65].

CAPÍTULO 3

CALORIMETRIA

3.1 INTRODUÇÃO

A utilização do calorímetro em dosimetria de feixe de elétrons representa um dos métodos físicos de dosimetria que se caracteriza por possuir uma série de vantagens, que o habilitam para ser utilizado em aplicações de irradiação de materiais com doses altas [3,6,48,53].

O calorímetro é considerado um dosímetro primário uma vez que a dose é determinada a partir da medição direta da energia depositada, não é necessária a utilização de fatores de conversão baseados na interpretação física dos processos de absorção de energia, nem a calibração em relação a um instrumento de medição da dose absorvida [53,59].

A maioria dos dosímetros químicos e de estado sólido requerem uma calibração em um campo de radiação conhecido, com a utilização de parâmetros dependentes da energia tais como o poder de freamento total mássico para elétrons, rendimento ("yield") de reação radioquímica, etc [44,50,67]. Estes sistemas dosimétricos fornecem uma resposta que, além da energia dos elétrons, dependem da temperatura e da taxa de dose. Em compensação, o calorímetro pode ser usado em um amplo intervalo de energia, e de taxa de dose e valores elevados de dose total absorvida [53]. De fato, a resposta de um calorímetro é geralmente otimizada na região de doses e taxas de dose altas devido ao aumento da relação sinal-ruído. Nestas condições de utilização, em feixes de elétrons de alta intensidade, é também possível simplificar o isolamento térmico necessário para reduzir as perdas de calor e simplificar o sistema eletrônico [40,42,43,62].

Por outro lado, o calorímetro apresenta também algumas desvantagens e limitações, por exemplo, sua sensibilidade é insuficiente para a determinação da dose absorvida a nível de radioproteção e também, certos tipos de processos por radiação podem provocar a perda de uma parte da energia que deveria ser medida pelo calorímetro, ou poderia, ainda, receber energia de outras fontes, que não o campo de radiação [10,16,30,42].

O princípio de operação de um calorímetro é simples. Mede-se a quantidade total de energia que é depositada na forma de calor em uma massa termicamente isolada. Esta medição de energia por unidade de massa fornece diretamente a dose absorvida.

A quantidade de calor depositada na massa isolada termicamente, ou absorvedor, é geralmente medida pelo conseqüente aumento de temperatura por meio de um pequeno termopar ou um termistor. A existência de sensores de alta precisão que permitem medir diferenças de temperatura da ordem de 10^{-4} °C tem possibilitado a medição de taxas de dose da ordem de 10^{-3} Gy s⁻¹ [2,3,7,29]. A calibração, freqüentemente, é feita com um aquecedor elétrico localizado no interior do absorvedor que libera uma quantidade de energia conhecida e controlada.

Muitos calorímetros são construídos especificamente para uma determinada aplicação, tal como a calibração de campos de radiação gama ou de elétrons, ou para uso rotineiro em feixes de elétrons de intensidade e energia elevadas.

Os materiais com os quais os calorímetros são construídos são: metais, elementos sólidos leves (grafite, alumínio), plásticos e água. As formas são também diversas, com o intuito de simular a geometria do objeto onde será feita a determinação da dose absorvida [19,22,30,47].

3.2 CONSTITUIÇÃO DO CALORÍMETRO

O calorímetro para utilização em dosimetria pode ser definido como um equipamento que mede a deposição de energia radiante [1,2,5,8], supondo que a quantidade total de energia é convertida em calor. Em geral, um calorímetro é formado por três partes: um elemento central ou núcleo, um meio intermediário que rodeia o núcleo e uma parede externa ou carcaça. A absorção de energia é realizada, preferencialmente, pelo núcleo.

O meio intermediário atua como trocador de calor entre o núcleo e a carcaça, devendo ter propriedades de isolante térmico ou condutividade térmica baixa. A carcaça atua como interface com o ambiente e, dependendo do método calorimétrico aplicado nas medidas, sua temperatura pode permanecer constante dentro de um pequeno intervalo ou pode variar controladamente seguindo uma curva previamente definida [33,48,53]. É, então, a parte do sistema calorimétrico que troca energia diretamente com o núcleo através do meio intermediário.

Uma medida calorimétrica só fornece uma verdadeira medida da dose absorvida se toda a energia absorvida pelo núcleo é transformada em calor, o que nem sempre acontece, particularmente, quando são utilizados sistemas líquidos que são muito mais sensíveis à indução de mudanças químicas ou físicas do que os sólidos [59]. De fato, enquanto a maior parte da energia absorvida em um sistema é transformada em calor, uma outra parte poderá causar mudanças químicas ou físicas. O efeito líquido da mudança química pode ser de natureza endotérmica ou exotérmica, e é então possível que a quantidade do calor medida no núcleo seja diferente da quantidade total de energia absorvida. Tal diferença pode, obviamente, causar um erro na determinação da dose [53].

3.3 MÉTODOS DE MEDIDAS CALORIMÉTRICAS

Dois importantes problemas envolvem as medidas em calorimetria:

- a) Qualquer efeito térmico observado em um sistema calorimétrico é o resultado de dois processos; a variação da energia térmica no núcleo (a quantidade a ser medida) e a troca de calor entre o núcleo e a carcaça. O resultado deste último efeito pode ser desconsiderado mas, sob certas condições, poderá ser importante.
- b) O efeito térmico no processo calorimétrico de calibração (conhecido) e medição (desconhecido) devem ser comparáveis entre si e independentes da fonte de energia.

Em função do modo de troca de calor entre o núcleo e a carcaça pode-se classificar os métodos calorimétricos em : *isotérmico, adiabático, fluxo de calor e diferencial* [6,48].

3.3.1 CALORIMETRIA ISOTÉRMICA

A temperatura do núcleo permanece constante durante a determinação da dose. O fenômeno medido é a transformação de fase (sólido para líquido ou líquido para gás) induzida pelo calor gerado no núcleo. A temperatura de trabalho do calorímetro é o ponto de fusão ou ebulição do material do núcleo [53].

3.3.2 CALORIMETRIA ADIABÁTICA

A troca de calor entre o núcleo e a carcaça é mantida em um nível mínimo, por meio de um cuidadoso controle da temperatura da carcaça. A taxa de aumento da temperatura no núcleo, a capacidade térmica do núcleo e a velocidade de deposição de energia são constantes. Já que nem sempre é possível realizar medidas experimentais em condições adiabáticas, um número grande de calorímetros são

projetados para trabalhar em condições denominadas *quase-adiabáticas*. Neste caso, as condições experimentais são ajustadas pela aplicação de correções simples, matemáticas ou gráficas, de forma a permitir a utilização de derivações válidas para condições adiabáticas. Este método tem sido largamente utilizado em dosimetria [6,48,53].

3.3.3 CALORIMETRIA POR FLUXO DE CALOR

O fluxo de calor entre o núcleo e a carcaça é facilitado e experimentalmente controlado pela escolha do meio de transferência de calor. A temperatura da carcaça é mantida constante durante a medida. Neste caso, enquanto a velocidade de deposição de energia no núcleo é constante, a taxa de variação da temperatura no mesmo núcleo não o é. A taxa de aumento da temperatura diminui em função do tempo, chegando a zero quando o equilíbrio térmico é estabelecido. Neste momento, a velocidade de energia depositada no núcleo é igual à taxa de perdas de calor. No equilíbrio, a diferença de temperatura entre o núcleo e a carcaça é diretamente proporcional à taxa de deposição de energia ou à taxa de dose absorvida pelo núcleo [6,53].

3.3.4 CALORIMETRIA DIFERENCIAL

Este método é, em princípio, equivalente ao de fluxo de calor onde, em vez de um único núcleo, são utilizados dois ou mais. Um deles funciona como referência e os outros da forma convencional. Todos os núcleos estão inseridos no mesmo meio intermediário e todos recebem a mesma quantidade de energia em um campo de radiação homogêneo e uniforme. Neste sistema é possível diminuir ou eliminar os efeitos colaterais que influenciam a temperatura do núcleo e simplificar o controle de temperatura da carcaça [53].

3.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO NÚCLEO EM FUNÇÃO DO TEMPO EM DIFERENTES MÉTODOS CALORIMÉTRICOS

Em calorímetros que operam pelo método adiabático ou por fluxo de calor a temperatura do núcleo é medida em função do tempo, nas seguintes condições:

- a) a geração de calor no núcleo é constante;
- b) o núcleo é bom condutor de calor e possui uma distribuição homogênea de temperatura;
- c) o núcleo é rodeado por um meio intermediário com condutividade térmica baixa e constante no intervalo de temperatura de interesse;
- d) o meio condutor de calor está confinado em uma carcaça com capacidade térmica alta.

Uma expressão geral simplificada da temperatura em função do tempo, que atende as condições descritas acima, é dada pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{mc} - K(T - T_0) \quad (3.1)$$

onde :

T = temperatura do núcleo ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 = temperatura da carcaça ($^{\circ}\text{C}$);

W = taxa de aquecimento do núcleo (cal s^{-1});

K = constante do sistema para perdas por calor (s^{-1});

mc = capacidade térmica do núcleo ($\text{cal } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

t = tempo (s).

O termo W/mc refere-se ao aquecimento do núcleo pela variação da energia interna (absorção de energia durante a irradiação ou energia elétrica na calibração) e o

segundo termo à troca de calor entre o núcleo e o ambiente [40,53]. Para T_0 constante, integrando a equação 3.1 resulta em :

$$T = T' \cdot e^{-Kt} + T_0(1 - e^{-Kt}) + \left(\frac{W}{Kmc}\right) \cdot (1 - e^{-Kt}) \quad (3.2)$$

onde T' é a temperatura para $t = 0$.

As equações 3.1 e 3.2 representam a base da dosimetria por calorimetria .

3.4.1 CALORÍMETRO ADIABÁTICO

Na condição adiabática a temperatura da carcaça é controlada de modo a acompanhar o aumento de temperatura do núcleo não havendo troca de calor entre o núcleo e a carcaça[1], o que significa que o termo $K(T-T_0)$ da equação 3.1 é zero.

A taxa de variação da temperatura do núcleo é dada pela equação:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{mc} \quad (3.3)$$

A taxa de variação da temperatura é diretamente proporcional à velocidade de aquecimento W , ou seja, à dose absorvida [53]. O fator de proporcionalidade $1/mc$ é determinado a partir da massa e do calor específico do núcleo, ou por calibração elétrica. A curva de temperatura do núcleo em função do tempo apresenta um comportamento linear como mostra a figura 3.1 .

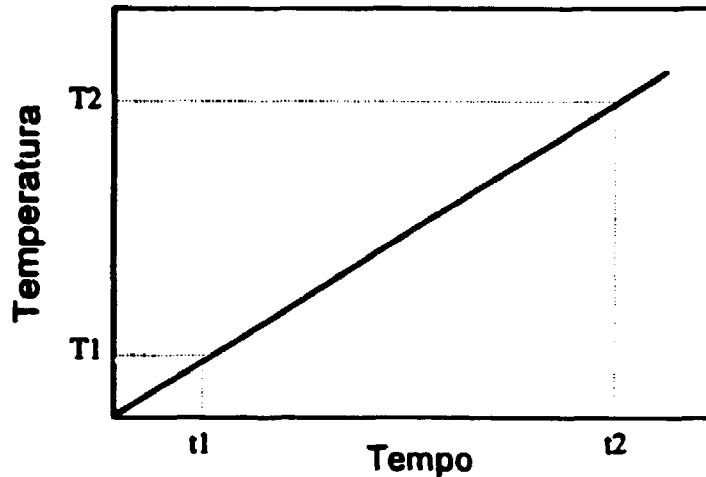


Figura 3.1 : Variação da temperatura do núcleo em função do tempo no regime adiabático.

Este método é conveniente e rápido para a determinação de taxas de dose absorvida elevadas. Os gradientes de temperatura no núcleo são mínimos e não há uma troca de calor mensurável entre o núcleo e a carcaça [6,48].

3.4.2 CALORÍMETRO QUASE-ADIABÁTICO

É conveniente utilizar este método quando a absorção de energia ocorre em um curto intervalo de tempo e quando a temperatura do núcleo é próxima da temperatura ambiente T_0 (antes e após o aquecimento) [7,33]. A troca de calor pode, sob essas condições, ser mantida dentro dos limites próximos de uma condição adiabática. A forma da curva de temperatura do núcleo em função do tempo é mostrada na *figura 3.2* que indica os três períodos de tempo I, II, e III. [53].

Nos períodos antes e após o aquecimento (I e III) a variação de temperatura é devida à diferença de temperatura entre o núcleo e a carcaça. Durante o período de deposição de energia (II), que ocorre no intervalo de tempo $t_b - t_a$, a energia $W \Delta t$ é depositada, resultando no incremento de temperatura $\Delta T = T_b - T_a$. Se extrapolarmos a curva de temperatura nos períodos I e III em direção ao período II e, supondo que a quantidade total de energia é depositada instantaneamente no tempo t_x ,

causando o aumento de temperatura de Ta' a Tb' , veremos que a diferença de temperatura $Tb' - Ta'$ corresponde à verdadeira condição adiabática. A escolha de tx é feita de modo que as áreas $TaTa'X$ e $TbTb'X$ sejam iguais [6].

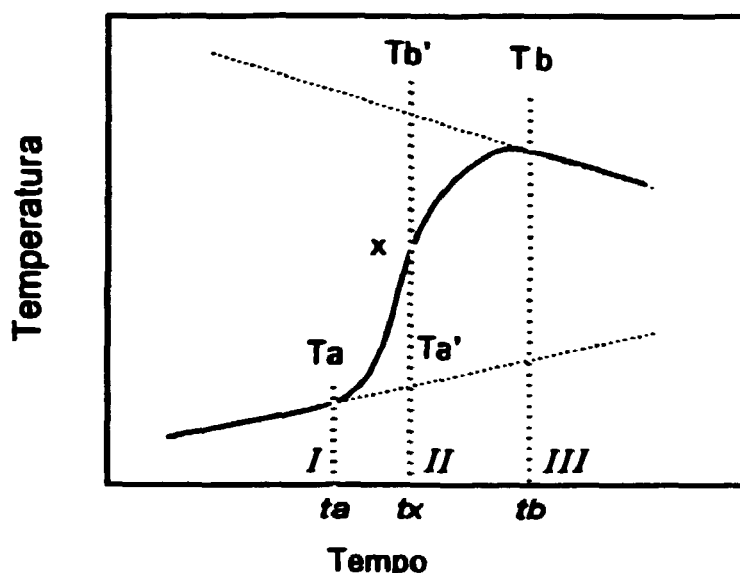


Figura 3.2 : Variação da temperatura do núcleo em função do tempo no regime quase-adiabático.

3.4.3 CALORÍMETRO DE FLUXO DE CALOR

Neste sistema a temperatura do núcleo, T , é ajustada no início da medida para ser mais baixa que a temperatura T_0 da carcaça, que é mantida constante. O núcleo é aquecido pela deposição de energia e pelo fluxo de calor da carcaça em direção ao núcleo quando $T < T_0$. Quando $T > T_0$ o fluxo de calor da carcaça em direção ao núcleo é revertido, e aumenta com o incremento de $T - T_0$. Após algum tempo, a temperatura do núcleo atinge um valor de equilíbrio Te no qual a taxa de perda de calor é igual a taxa de absorção de energia [53] . Este processo é representado na *figura 3.3*.

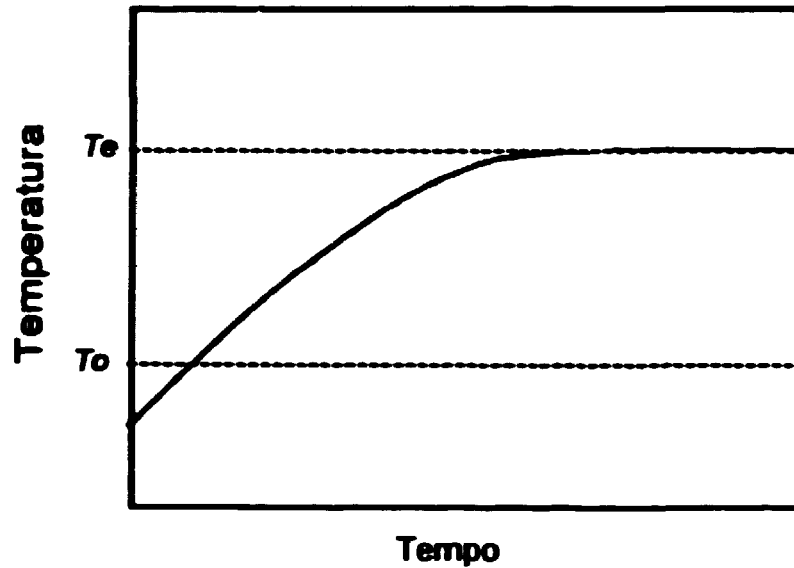


Figura 3.3 : Variação da temperatura do núcleo em função do tempo, no regime de fluxo de calor.

O estado de equilíbrio é descrito pela equação :

$$W = Kmc (T_e - T_0) \quad (3.4)$$

O fator de proporcionalidade Kmc é determinado por uma simples calibração que mede $T_e - T_0$ correspondente a uma quantidade conhecida de energia depositada [6,18].

Uma modificação interessante na medição de fluxo de calor é o método do ciclo térmico. Uma curva típica da variação da temperatura em função do tempo para este método é mostrada na *figura 3.4*. Neste método dois limites de temperatura, $T1$ e $T2$, são escolhidos de modo que $T2 > T1 > T_0$. A fonte de aquecimento (radiação ou energia elétrica) é ligada quando a temperatura do núcleo é menor que $T1$ e desligada quando atinge $T2$ e assim sucessivamente. Os períodos de tempo, termicamente ativo $t1$ e termicamente inativo $t2$, são mostrados na *figura 3.4*.

A taxa de aumento de energia no núcleo é dada por :

$$W = mc \cdot (T_2 - T_1) \cdot \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (3.5)$$

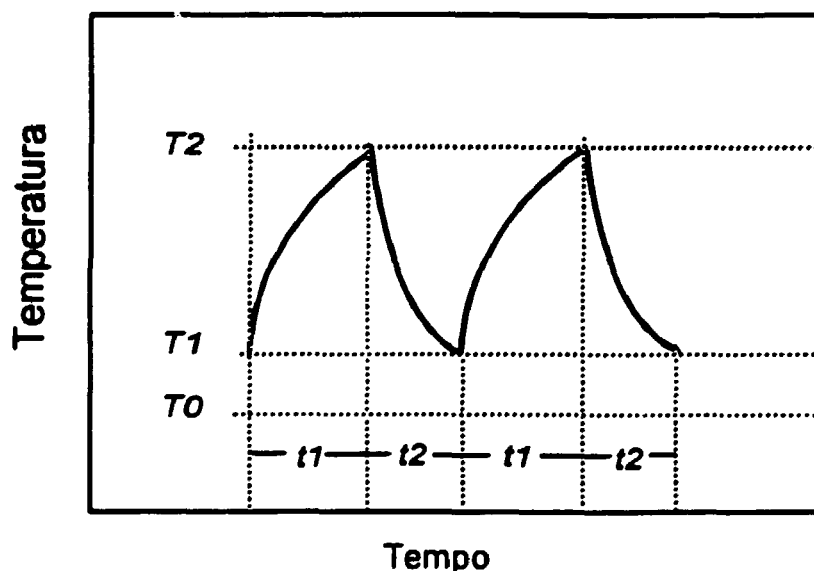


Figura 3.4 : Método do ciclo térmico para determinação da temperatura de equilíbrio sob as condições de fluxo térmico. Variação da temperatura do núcleo em função do tempo.

Este método, em princípio, pode ser aplicado em todos os casos onde seja possível ligar ou desligar instantaneamente a fonte de emissão de energia [53].

3.4.4 CALORÍMETRO DIFERENCIAL

A curva de temperatura obtida com este método é do mesmo tipo que a mostrada na *figura 3.3*, onde em vez de um núcleo pelo menos dois núcleos são utilizados.

3.5 CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO

O calorímetro é utilizado para determinar a dose absorvida, porém, o sinal medido durante a irradiação pode ser corrente, tensão ou aumento de temperatura.

Os fatores de calibração que podem ser usados para converter o sinal medido em dose absorvida podem ser obtidos de várias maneiras. O método utilizado para calibrar um calorímetro depende principalmente de sua aplicação e do tipo de calorímetro. Se um calorímetro vai ser utilizado como um dosímetro de transferência ou de rotina não é necessário realizar uma calibração absoluta. O calorímetro pode ser exposto a um campo de radiação conhecido ou pode ser irradiado em um meio previamente ocupado por um dosímetro secundário.

Outro método de calibração é baseado na medição do aumento da temperatura durante a irradiação e no cálculo da energia depositada por unidade de massa (dose absorvida) no núcleo do calorímetro, a partir do conhecimento da sua capacidade térmica específica [10,18,33]:

$$D = \frac{E}{m} = C_t \Delta T \quad (3.6)$$

onde, E = energia depositada;

m = massa do núcleo;

C_t = capacidade térmica do núcleo;

ΔT = variação de temperatura medida no núcleo.

Este método de calibração requer que a massa do núcleo e o aumento de temperatura sejam medidos com precisão e que a expressão que relaciona a capacidade térmica em função da temperatura seja conhecida. Este método é simples e o projeto do calorímetro é simplificado, já que não é necessário um aquecedor no núcleo [40].

Um terceiro método de calibração, que é freqüentemente utilizado, requer um aquecedor elétrico no interior do núcleo. A resistência elétrica do aquecedor pode ser medida com precisão, porém, devem ser realizadas correções para levar em conta a resistência dos cabos e conexões. A corrente elétrica que passa através da resistência deve ser cuidadosamente medida. É suposto que a energia elétrica depositada por unidade de massa é equivalente à energia depositada durante a irradiação. Isto requer que o padrão de deposição de calor e as perdas de calor durante a calibração sejam equivalentes às que ocorrem durante a irradiação [7,42,53].

A dose devida à deposição de energia elétrica pode ser calculada a partir da seguinte expressão:

$$D = \frac{E}{m} = \frac{I^2 R t}{m} = \Delta T \cdot C_c \quad (3.7)$$

onde, D , E e m foram definidas na equação 3.6 e

I = corrente elétrica aplicada;

R = resistência elétrica do aquecedor no interior do núcleo;

t = tempo durante o qual foi aplicada a corrente elétrica.

Todas estas grandezas devem ser determinadas com extrema precisão por instrumentos calibrados contra padrões da mais alta qualidade metrológica possível.

3.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Os dois sensores mais utilizados para detecção e medição de variações de temperatura induzidas pela radiação em calorímetros são o termopar e o termistor. Existem outros sensores capazes de detectar pequenas variações de temperatura como o termômetro de resistência de platina, o diodo de silício e a resistência de carbono, porém não são de dimensões reduzidas, como o termopar e o termistor, para serem utilizados em calorímetros para a determinação da dose absorvida [6,53].

A escolha do tipo de sensor a ser usado em um determinado tipo de calorímetro resulta de um compromisso entre sensibilidade e simplicidade de projeto. Um termopar é um sensor simples que consiste na junção de dois metais ou duas ligas. Apresenta as vantagens de ter tamanho reduzido, ser comercialmente disponível para uma ampla faixa de aplicações, não gerar calor adicional no núcleo e, para cada tipo de termopar, existe uma relação bem definida entre a tensão medida e a temperatura na junção.

Para valores elevados de dose absorvida a sensibilidade do termopar pode ser suficiente. A variação de temperatura típica é de até 10 K, e a tensão produzida por um termopar do tipo ferro-constantan ou cobre-constantan é da ordem de 40-60 $\mu\text{V K}^{-1}$. A pequena tensão produzida pode ser medida por modernos voltímetros digitais de alta sensibilidade, porém a medição está sujeita a ruído proveniente de diversas fontes [48].

O termistor é geralmente mais sensível à temperatura que o termopar, sendo o sensor mais utilizado em calorímetros .

3.6.1 TERMISTOR

O termistor foi desenvolvido como um substituto econômico do termômetro de resistência de platina na medição e controle industrial de temperatura. Suas

propriedades principais são : baixo custo, pequenas dimensões e elevada sensibilidade.

Os primeiros tipos de termistores foram fabricados usando óxidos de Mn, Ni e Co, os quais eram triturados e misturados em proporções adequadas com aglomerantes, prensados na forma desejada e finalmente sinterizados.

Comparados com outros tipos de sensores de temperatura resistivos como os termômetros de resistência (Cu, Ni, Pt, W) que possuem um coeficiente de temperatura pequeno, positivo e uma variação de resistividade de $0,4\% \text{ K}^{-1}$, o termistor possui um coeficiente de temperatura negativo de valor elevado e uma variação da resistividade da ordem de $4\% \text{ K}^{-1}$ ou seja, 10 vezes mais sensível que o termômetro de resistência. Enquanto os outros sensores resistivos apresentam uma resposta linear, o termistor é totalmente não-linear. A resistência elétrica em função da temperatura é da forma:

$$R = R_0 \cdot e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3.8)$$

onde, R = resistência à temperatura T , ohm;

R_0 = resistência à temperatura T_0 , ohm;

β = constante característica do material, K;

T, T_0 = temperatura absoluta, K.

A temperatura de referência T_0 é geralmente 298 K (25 °C), enquanto que β é da ordem de 4000. Computando $(dR/dT)/R$ é encontrado o coeficiente de temperatura da resistência dado por $-\beta/T^2$ (ohm/ohm-°C). Para $\beta = 4000$, o coeficiente de temperatura à temperatura ambiente (25 °C) é igual a -0,045, comparado com o valor de 0,0036 para uma resistência de platina nas mesmas condições. A relação resistência / temperatura varia com o tipo particular de material utilizado no termistor e com a configuração do elemento resistivo [48].

A figura 3.5 mostra a resposta de uma resistência de Pt e do termistor em função da temperatura.

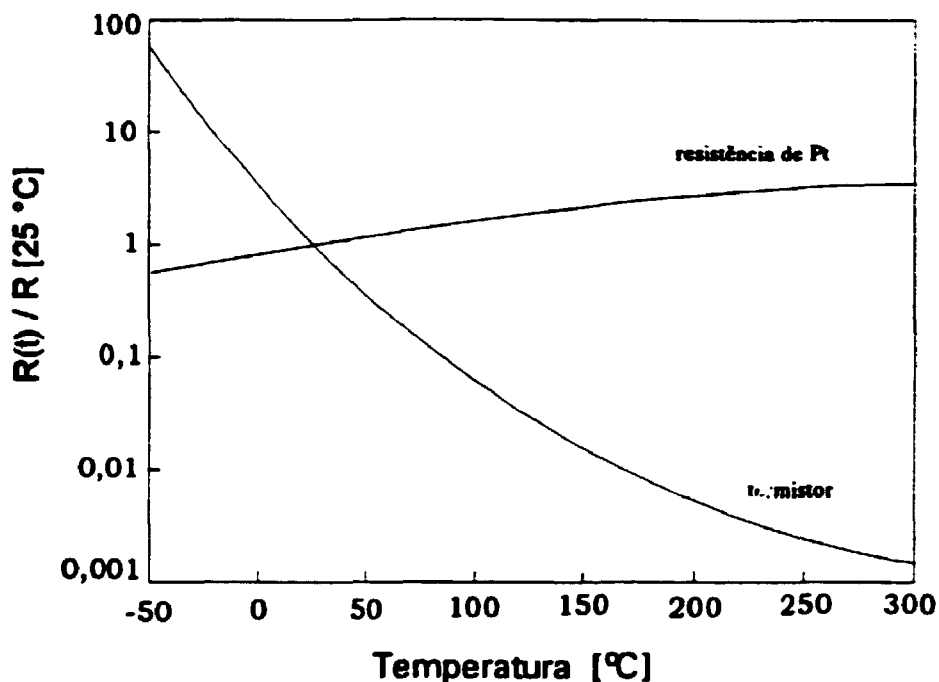


Figura 3.5 : Comparação da curva resistência x temperatura, para um termistor típico e uma resistência de Pt. Ambas as curvas foram normalizadas para a unidade a 25 °C.

A relação entre a resistência [6,7] e a temperatura pode ser determinada experimentalmente contra um padrão de temperatura , e resulta geralmente em uma expressão do tipo:

$$\frac{1}{T} = A + B(\log R) + C(\log R)^2 + D(\log R)^3 \quad (3.9)$$

onde , T = temperatura, °C ;

R = resistência, ohm ;

A, B, C e D = constantes obtidas da regressão dos dados experimentais.

3.7 EFEITOS RADIOQUÍMICOS NO NÚCLEO DO CALORÍMETRO

Quando certos compostos são irradiados uma pequena quantidade de energia depositada pode resultar em reações químicas do tipo exotérmica ou endotérmica. Para medir com precisão a quantidade de energia depositada pela radiação no núcleo do calorímetro é necessário conhecer a magnitude do calor perdido ou ganho em consequência de reações químicas, para que sejam feitas as correções necessárias.

MILVY et. al. [44] foi um dos primeiros a reportar uma reação química endotérmica que ocorria em um calorímetro construído em plástico equivalente a tecido biológico quando da irradiação com raios gama provenientes de uma fonte de ^{60}Co , onde aproximadamente 3% da energia depositada não aparecia na forma de calor. BEWLEY [2] reportou que irradiando um calorímetro construído em plástico inicialmente obteve resultados 10% acima do esperado, e após uma dose acumulada de 1 kGy, gerada por irradiação com raios-X de 7 MeV, a dose obtida chegou a ser de 2 a 5% mais baixa que a determinada com uma câmara de ionização.

Essas experiências demonstraram que a reação radioquímica depende da dose acumulada. A presença de oxigênio dissolvido no plástico e o seu consumo pela reação radioquímica foi sugerida como a causa da reação exotérmica inicial. Na água utilizada como núcleo de um calorímetro ocorre também uma reação exotérmica. DOMEM [6] observou um acréscimo de 3% na produção de calor, para doses até 10 Gy.

CAPÍTULO 4

ACELERADORES DE ELÉTRONS

4.1 INTRODUÇÃO

Centenas de aceleradores de elétrons são utilizados para o processamento por radiação de muitos materiais e para pesquisa e desenvolvimento em diversos laboratórios e centros de pesquisa. A maior potência atualmente em uso entre os aceleradores industriais de elétrons é da ordem de 200 kW, equivalente a uma fonte de ^{60}Co com 5×10^{17} Bq (13,4 MCi) de atividade.

A principal aplicação dos aceleradores é a modificação de polímeros, tal como a reticulação do polietileno como isolante de condutores elétricos, e a polimerização de camadas finas de monômeros em superfícies de papel, plástico, madeira e metais. Estes processos necessitam de doses entre 10 e 100 kGy para polimerização e entre 100 e 200 kGy para reticulação. Os aceleradores são também utilizados para esterilização e muitas outras aplicações [5,23,25,33].

4.2 ACCELERADORES DE ENERGIA BAIXA

A grande maioria dos processos industriais emprega aceleradores de gradiente de potencial, que são construídos para energias compreendidas entre 150 keV e 5 MeV . Uma tensão constante é usada para acelerar os elétrons emitidos por um filamento aquecido na região de potencial mais elevado, resultando em um feixe de elétrons constante. Para energias abaixo de 0,3 MeV é possível acelerar elétrons emitidos por um filamento longo mantendo-os

confinados a uma região do espaço de forma a obter uma cortina de elétrons, como mostrado na *figura 4.1* .

Para atender às diferentes dimensões dos materiais a serem irradiados, o feixe de elétrons abrange uma largura entre 30 e 300 cm. Isto é conseguido por varredura magnética ou pela utilização do filamento longo. Para energias acima de 350 keV o confinamento da cortina é precário e se utiliza uma fonte aproximadamente puntual de elétrons, que são focalizados e acelerados no centro de um tubo com o gradiente de potencial, obtendo-se então um feixe cilíndrico de elétrons. O feixe pode ser movimentado por um campo magnético produzido por uma bobina que envolve o tubo acelerador, permitindo, desta forma, a varredura sobre uma área de irradiação retangular, como ilustrado na *figura 4.2* . A taxa média de dose absorvida no produto pode atingir 10^6 Gy s^{-1} [33].

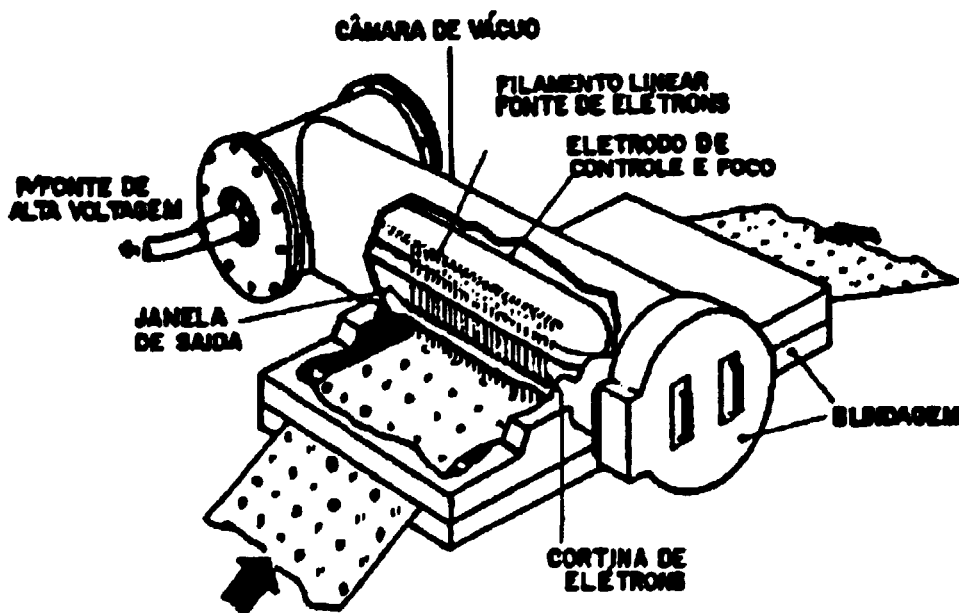


Figura 4.1 : Acelerador de elétrons tipo cortina

Toda a região de produção e aceleração dos elétrons deve ser mantida em alto vácuo para permitir sua focalização e aceleração em direção à janela de saída. A janela é constituída por uma folha fina de metal de alta resistência mecânica

para poder suportar a diferença de pressão entre o interior (vácuo) e o exterior (pressão atmosférica), possuindo uma absorção de energia dos elétrons baixa. O titânio metálico com espessura de 30 a 40 μm é geralmente empregado como janela de saída.

Em relação à geração de alta tensão, os aceleradores tipo cortina (até 300 kV) empregam transformadores que geram alta tensão (em corrente alternada), que após a retificação, alimentam o acelerador [5].

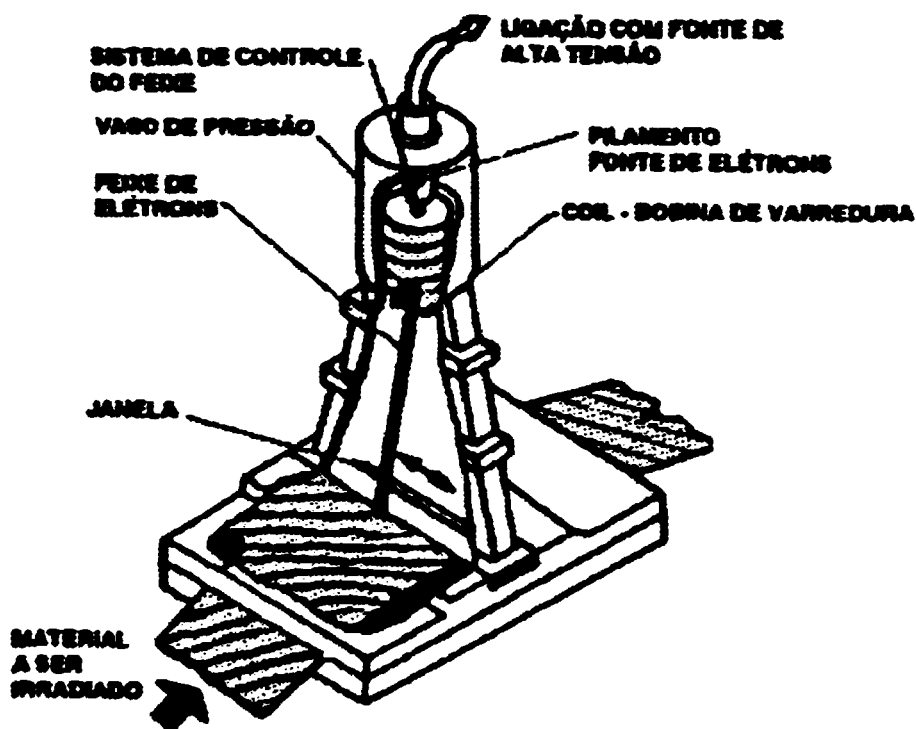


Figura 4.2 : Acelerador de elétrons de energia baixa com varredura do feixe.

Acima de 300 kV o melhor desempenho é obtido usando sistemas capacitivos que energizam circuitos retificadores multi estágios, obtendo, assim tensões elevadas, sob regime de corrente contínua, a partir de baixa tensão em regime de corrente alternada. O acelerador tipo Dynamitron da Radiation

Dynamics esquematizado na *figura 4.3* emprega este princípio, oferecendo máquinas com energia máxima de 4,5 MeV e potências de até 150 kW [4,5,23,49].

Alguns dos aceleradores que emitem um feixe contínuo de elétrons podem ser pulsados, para aplicações especiais.

Na região de energias baixas os aceleradores pulsados são relativamente simples, fornecem pulsos de elétrons com frequências de 100 a 200 Hz, com uma largura de pulso da ordem de 100 μ s. A tensão de aceleração é fornecida como pulsos de tensão ou como um campo eletromagnético modulado entre 100 e 200 MHz. A energia dos elétrons, na saída, está no intervalo entre 0.5 e 2 MeV [5,10].

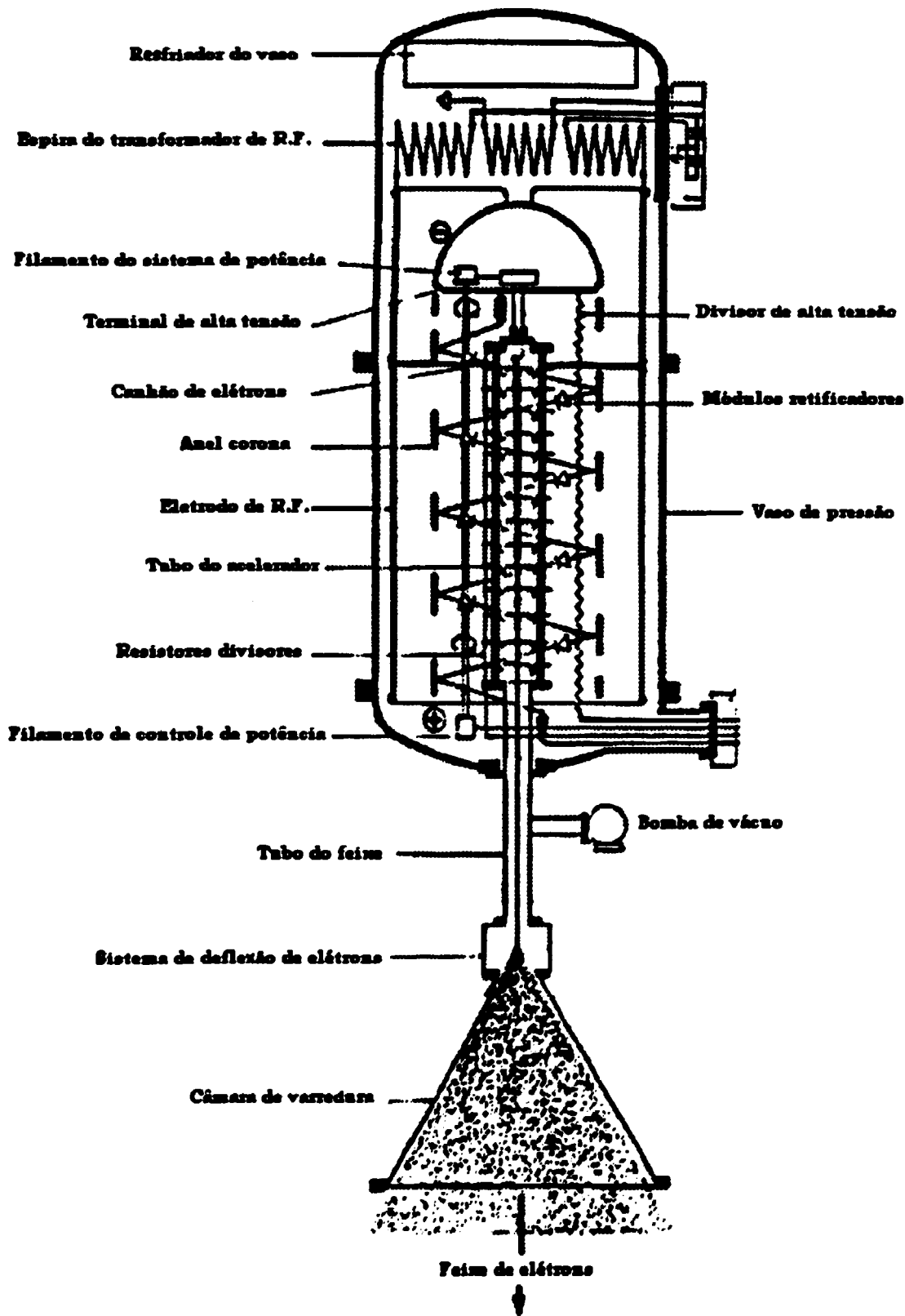


Figura 4.3 : Acelerador de elétrons tipo Dynamitron.

4.3 ACELERADORES DE ENERGIA ALTA

Para energias acima de 5 MeV empregam-se aceleradores do tipo LINAC ("linear accelerator") onde os elétrons são excitados por microondas que utilizam campos eletromagnéticos alternados em frequências altas, usualmente 1 ou 3 GHz. A propagação das microondas em um tubo com cavidades ressonantes carrega o elétron em fase com a propagação do campo eletromagnético.

Para processamento de materiais por radiação, a energia máxima dos elétrons utilizada é normalmente 10 MeV. Este valor corresponde ao limiar de energia acima do qual podem ocorrer reações nucleares indesejadas entre os elétrons e os núcleos do material irradiado.

O feixe obtido é pulsado com potência de pico elevada e a largura do pulso pode variar de microsegundos a nanosegundos. A potência média dos aceleradores atuais de energia alta é de 5 a 10 kW.

Os elétrons são emitidos a uma taxa de algumas centenas de pulsos por segundo para aplicações industriais, mas pulsos únicos podem também ser gerados. A taxa de dose média é geralmente mais baixa em relação aos aceleradores de corrente constante. O pico de dose pode, entretanto, ser mais elevado que em aceleradores de energia baixa, podendo atingir até 10^{10} Gy s⁻¹ [5].

4.4 O ACELERADOR DE ELÉTRONS DO IPEN CNEN/SP

Desde 1978 encontra-se operacional uma instalação de irradiação com um acelerador de elétrons destinada ao processamento de produtos industriais assim como à pesquisa e ao desenvolvimento de novos produtos irradiados, semelhante à mostrada na *figura 4.4*.

As características principais da instalação são:

- a) **Acelerador de elétrons tipo Dynamitron fabricado pela Radiation Dynamics Inc., USA, com os seguintes parâmetros :**
Energia dos elétrons : Entre 0,5 e 1,5 MeV selecionável.
Corrente : Entre 0 e 25 mA, selecionável.
Área de irradiação : diâmetro do feixe = 2,5 cm a 10 cm da janela, a largura de varredura é ajustável entre 60 e 120 cm.

- b) **Câmara de irradiação construída em concreto pesado com $2,8 \text{ g cm}^{-3}$ de densidade, calculada para conter feixes de elétrons de até 1,5 MeV de energia e 75 kW de potência, portanto o dobro da potência do feixe gerado atualmente.**

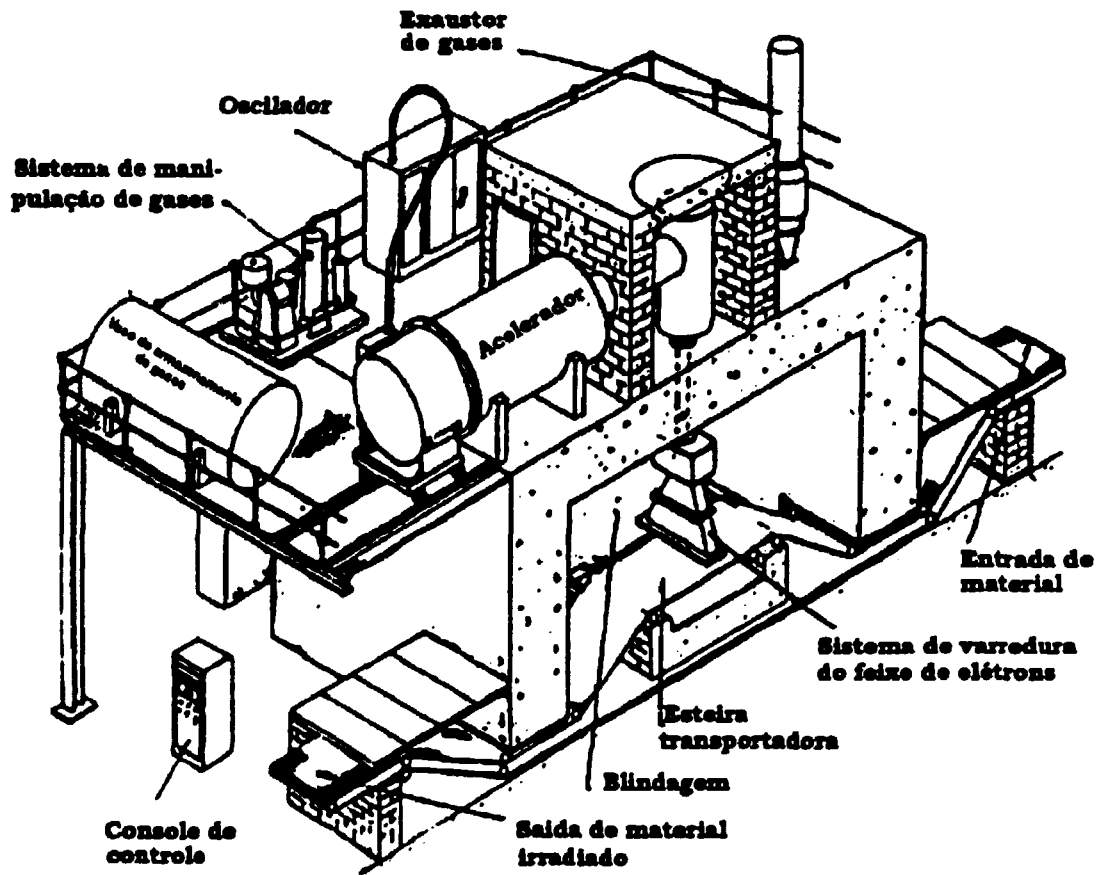


Figura 4.4 : Diagrama esquemático da instalação de irradiação do IPEN com o acelerador de elétrons tipo Dynamitron.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA CALORIMÉTRICO

5.1 INTRODUÇÃO

No capítulo 3 foram descritos os diferentes métodos de medidas calorimétricas, a variação da temperatura do núcleo em função do tempo e a calibração do calorímetro, condições nas quais se baseia a metodologia aplicada aos calorímetros atualmente em uso. Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema calorimétrico e de uma metodologia avançada de medida que resulte em uma maior precisão e exatidão na determinação da dose absorvida e que facilite a calibração e a operação do sistema. Dessa forma, o trabalho foi orientado no desenvolvimento dos seguintes tópicos:

- a) Definição dos parâmetros iniciais de projeto, dos materiais e dos equipamentos.
- b) Determinação do ponto ótimo para a medição da temperatura no núcleo.
- c) Desenvolvimento de uma metodologia de calibração do sensor de temperatura.
- d) Determinação de uma função analítica que permita o cálculo da capacidade térmica do núcleo do calorímetro em função da temperatura.
- e) Desenvolvimento de um programa de computação (*software*) para automatizar a calibração e a operação do sistema.

5.2 PARÂMETROS INICIAIS DE PROJETO

Inicialmente, foi definido o sistema calorimétrico composto por :

- a) calorímetro de absorção total com núcleo e anel de grafite;
- b) termistor como sensor de temperatura e aquecedor elétrico para calibração;
- c) fonte de potência elétrica para o aquecedor, medidores de resistência, corrente, tensão e tempo;
- d) microcomputador e interfaces associadas operados por um *software* específico para calibração e operação automática do sistema.

A *figura 5.1* mostra um diagrama esquemático do sistema.

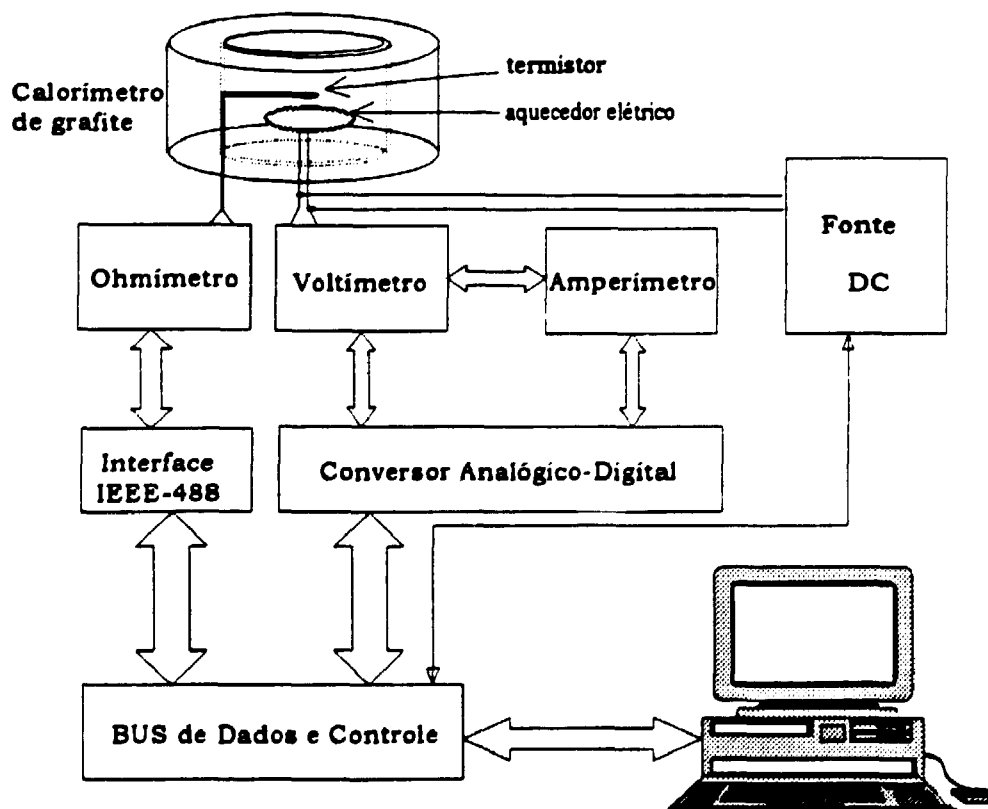


Figura 5.1 : Diagrama esquemático do sistema calorimétrico.

Em função das características operacionais do acelerador de elétrons do IPEN, descritas no capítulo 4, e do intervalo de dose absorvida utilizado foram propostas as seguintes especificações iniciais para o sistema calorimétrico :

- Método calorimétrico : Quase-adiabático
- Tipo : Absorção total
- Material do núcleo : Grafite
- Intervalo de medição : 0,1 - 30 kGy
- Calibração : Automática por aquecimento elétrico
- Operação : Automática

O método calorimétrico mais adequado para as condições de operação do acelerador de elétrons é o quase-adiabático, onde a absorção de energia é realizada em um curto intervalo de tempo, sendo a temperatura do núcleo próxima da temperatura do ambiente. Neste caso, a troca de calor entre o núcleo e a carcaça é mínima podendo ser mantida dentro dos limites próximos de uma condição adiabática, permitindo a utilização de derivações válidas para esta condição (equação 3.3).

A escolha do grafite deve-se à ausência de atividade radioquímica nesse material, não ocorrendo, portanto, reações exotérmicas ou endotérmicas na interação com o feixe de elétrons, o que garante que toda a energia depositada pelos elétrons é convertida diretamente em calor. Seu coeficiente de difusividade térmica elevado proporciona um rápido equilíbrio térmico do núcleo e a capacidade térmica baixa permite uma maior sensibilidade, uma vez que é necessária uma menor quantidade de energia para elevar a temperatura.

Para atender às especificações do sistema calorimétrico proposto, alguns dos parâmetros de projeto foram definidos inicialmente e os outros determinados de forma analítica ou experimental.

Os parâmetros de projeto definidos no início foram:

- a) **Núcleo**
 material : grafite "Stackpole", grau 2020 (99,83% de pureza),
 densidade $1,77 \text{ g/cm}^3$
 dimensões : diâmetro = 66 mm, altura = 10 mm
- b) **Anel**
 material : id. núcleo
 dimensões : diâmetro interno = 68 mm, altura = 10 mm
 diâmetro externo = 94,8 mm
- c) **Janela** : poliéster duplamente metalizado ($0,8 \text{ mg/cm}^2$)
- d) **Isolante** : poliestireno expandido
- e) **Carcaça** : aço inox ANSI 304

As dimensões do núcleo e do anel são tais que, além de possuírem a mesma altura, as áreas expostas ao feixe de elétrons devem ser iguais para garantir que a energia absorvida por unidade de área seja a mesma; isto é obtido por meio da escolha adequada de r_1 , r_2 e r_3 . Conseqüentemente, também a temperatura será a mesma, o que possibilita a condição de regime quase-adiabático. A figura 5.2 mostra esta condição onde a área do núcleo (A1) é igual à área do anel (A2).

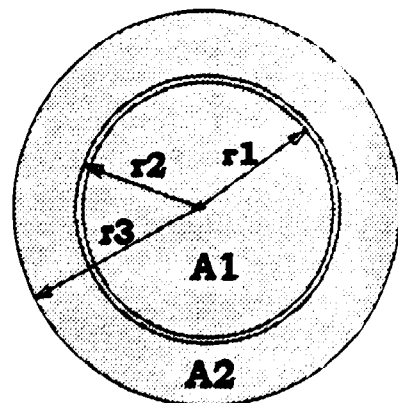


Figura 5.2: Relação das áreas do núcleo e do anel.

Definido o calorímetro como sendo de absorção total, a altura do núcleo, *igual à espessura*, deve ser maior que o alcance dos elétrons de 1,5 MeV no grafite, que é 5.1 mm. Do ponto de vista da sensibilidade do calorímetro, a espessura do núcleo deve ser igual ao alcance, para obter a máxima sensibilidade, porém dada a baixa resistência mecânica do grafite, a espessura foi aumentada para 10 mm, implicando em perda de sensibilidade, que será compensada com um aumento da sensibilidade do sistema de medição de temperatura.

A janela de $0,8 \text{ mg/cm}^2$ permite a passagem do feixe de elétrons com um mínimo de absorção (inferior a 0,05%) e, ao mesmo tempo, mantém confinado o ar no interior do calorímetro, evitando perdas de calor por convecção para o ambiente externo. As perdas de calor por radiação do núcleo e do anel para o ambiente externo, embora mínimas, devido a temperatura ser próxima de 310 K, são evitadas pela camada de alumínio sobre o poliéster, que age como refletor.

O poliestireno expandido utilizado como isolante térmico minimiza as perdas de calor por condução do núcleo e do anel para a carcaça.

A carcaça de aço inoxidável minimiza a corrosão devida à elevada concentração de ozônio gerado na irradiação do ar, sustenta mecanicamente todo o conjunto e está permanentemente em equilíbrio térmico com o ambiente externo.

5.3 DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO SENSOR DE TEMPERATURA NO NÚCLEO DO CALORÍMETRO

5.3.1 PROPOSIÇÃO DO PROBLEMA

Como foi dito anteriormente, o método quase-adiabático permite a utilização de derivações válidas para condições adiabáticas desde que a temperatura no ponto de medida seja próxima da temperatura externa e a troca de calor entre o núcleo e a carcaça seja mínima. Neste caso, o incremento de energia depositado no núcleo pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$dE = m C_t(T) dT \quad (5.1)$$

De onde a energia total depositada resulta:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} m C_t(T) dT \quad (5.2)$$

Em termos de energia absorvida por unidade de massa, que equivale à definição de dose absorvida, a equação 5.2 pode ser escrita como:

$$D = \frac{E}{m} = \int_{T_1}^{T_2} C_t(T) dT \quad (5.3)$$

A equação 5.3 representa, então, a base para o cálculo da dose absorvida no núcleo do calorímetro, válida para uma condição quase-adiabática. Interpretando a equação 5.3 podemos verificar que é necessário, apenas, determinar os limites de integração, isto é, T1 e T2 e a capacidade térmica $C_t(T)$.

A temperatura do núcleo do calorímetro no tempo $t = 0$, antes de iniciada a irradiação, ou seja, antes da deposição de energia pelo feixe de elétrons, é T1.

Neste instante, a temperatura em qualquer elemento de volume do núcleo é constante e igual à temperatura de equilíbrio térmico do núcleo. Portanto, nesta condição a medição de temperatura poderá ser efetuada em qualquer local do núcleo.

A temperatura que o núcleo deverá atingir após a irradiação ou seja, após a deposição de energia pelo feixe de elétrons, é T_2 . Deve ser constante e igual à temperatura de equilíbrio térmico do núcleo. Neste caso, é de fundamental importância a escolha do ponto onde será realizada a medição de temperatura, sobretudo, se considerarmos que a deposição de energia no núcleo durante a irradiação não é homogênea. De fato, se o feixe de elétrons incide normalmente sobre a superfície do núcleo, a distribuição de energia em função da profundidade no núcleo será uma função que depende principalmente da energia dos elétrons e da natureza do núcleo (Z , A e ρ). Assim, o perfil de temperatura no núcleo, após a irradiação, não é constante em função da profundidade; logo, é necessário escolher um ponto ótimo no núcleo onde a temperatura medida seja equivalente à temperatura de equilíbrio do mesmo. É importante também garantir que o tempo decorrido entre o fim da irradiação e a medição da temperatura seja mínimo, para evitar a troca de calor entre o núcleo e a carcaça, garantindo assim a condição quase-adiabática.

A solução geralmente adotada, na maioria dos calorímetros, consiste em medir e registrar o aumento da temperatura em um ponto qualquer do núcleo, posteriormente é realizada uma extrapolação gráfica para determinar T_2 , como descrito na seção 3.4.2.

Neste trabalho é proposta uma metodologia diferente, que consiste em posicionar o sensor de temperatura a uma profundidade no núcleo tal que a temperatura após a irradiação seja invariante no tempo e igual à temperatura de equilíbrio térmico do núcleo. Esta localização peculiar permite a medição da temperatura imediatamente após a irradiação.

Finalmente $C_f(T)$ é a capacidade térmica do núcleo em função da temperatura, que será determinada na calibração.

5.3.2 DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA DOSE ABSORVIDA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE NO NÚCLEO DO CALORÍMETRO

A determinação da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite do calorímetro é função da energia dos elétrons, do número atômico Z , da massa atômica A e da densidade do núcleo. Um tratamento estritamente analítico, derivado das relações de interação dos elétrons com a matéria, não é utilizado na prática para o cálculo da distribuição da dose no núcleo. Entretanto, o emprego de métodos baseados em cálculos numéricos, sejam estatísticos como o método de Monte Carlo ou determinísticos, é amplamente utilizado. Neste trabalho foi utilizado o programa EDMULT (determinístico) e o programa EGS4 (Monte Carlo). Para validar os resultados obtidos com os programas acima mencionados foi realizada uma determinação experimental da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite.

5.3.2.1 Determinação da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite pelo programa EDMULT

O programa EDMULT, de autoria de TABATA e ITO [60], desenvolvido no Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, calcula a distribuição da dose absorvida em função da profundidade gerada por um feixe plano paralelo de elétrons incidindo normalmente sobre um absorvedor de até 3 camadas. A informação entregue pelo EDMULT é a deposição de energia diferencial e integral produzida por um feixe de elétrons em função da profundidade do absorvedor.

O método empregado para a solução numérica está baseado no algoritmo originalmente desenvolvido por KOBETICH e KATZ [24]. O programa foi utilizado para calcular a deposição de energia no sistema multicamada composto pela janela de Ti de saída dos elétrons do acelerador, a camada de ar interposta entre a janela e o núcleo de grafite propriamente dito como esquematizado na *figura 5.3*.

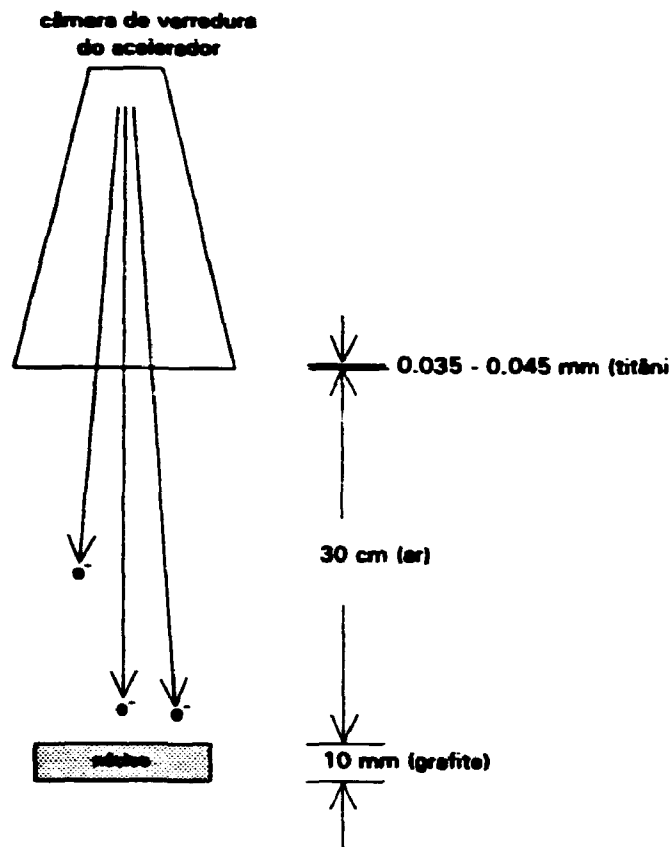


Figura 5.3 : Diagrama esquemático da irradiação do núcleo de grafite.

Os dados de entrada do programa foram:

Energia dos elétrons : 1,5 MeV

Camada	Z	A	Espessura (g/cm ²)	
1	22,0	47,9	2,025E-02	(titânio)
2	7,2	14,4	3,800E-02	(ar)
3	6,0	12,0	infinita*	(grafite)

(*) O programa EDMULT aceita três camadas sendo que a última é denominada, pelos autores do programa, de infinita por ser maior que o alcance. Na entrada de dados não é atribuída a esta camada um valor finito de espessura.

Para o cálculo da deposição diferencial de energia em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ foi utilizado um incremento de massa superficial de $0,0002 \text{ g/cm}^2$. Os resultados fornecidos pelo programa, na forma de tabela de resultados, foram graficados e são mostrados nas figuras que seguem:

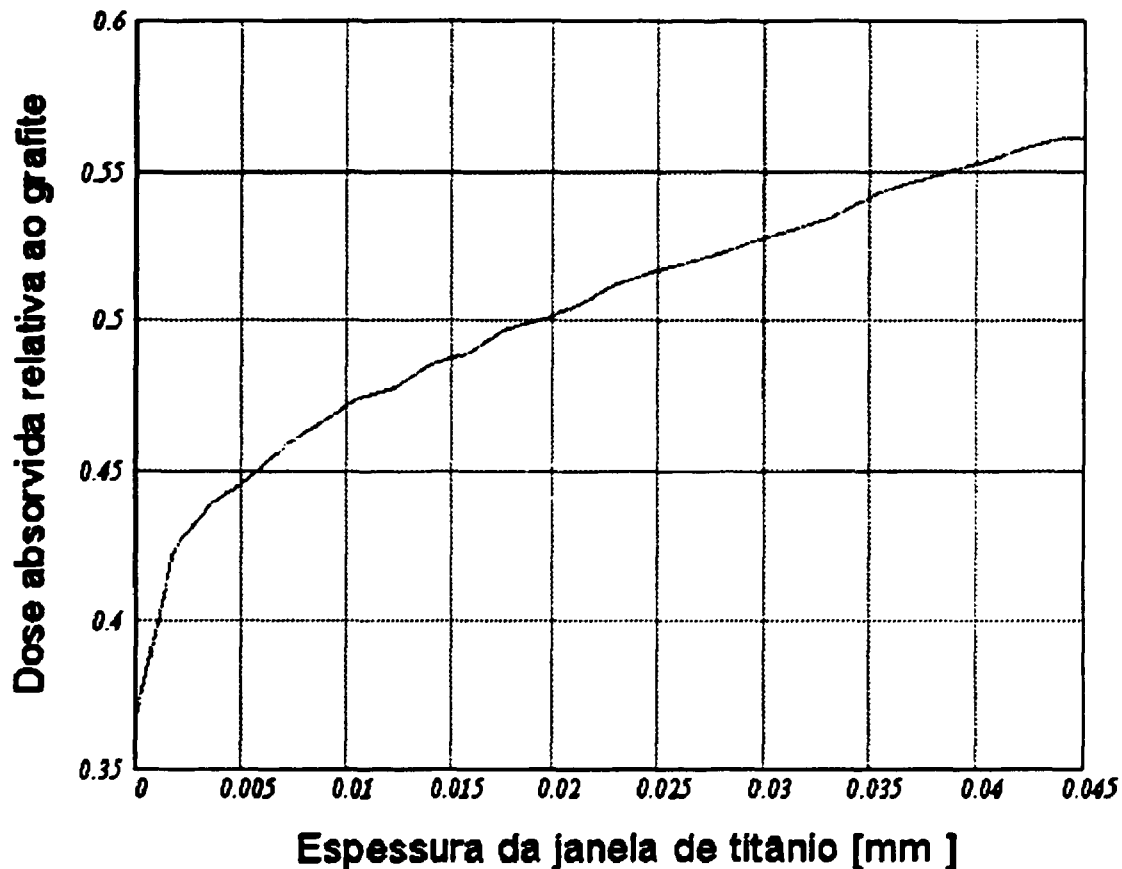


Figura 5.4 : Distribuição da dose absorvida na janela de titânio.

Na figura 5.4 pode ser observado que a dose absorvida, relativa à dose máxima no grafite, aumenta em função da espessura da janela de titânio. Integrando a energia diferencial fornecida pelo programa EDMULT foi calculada a fração da dose absorvida na janela, resultando em 0,01929 da dose total.

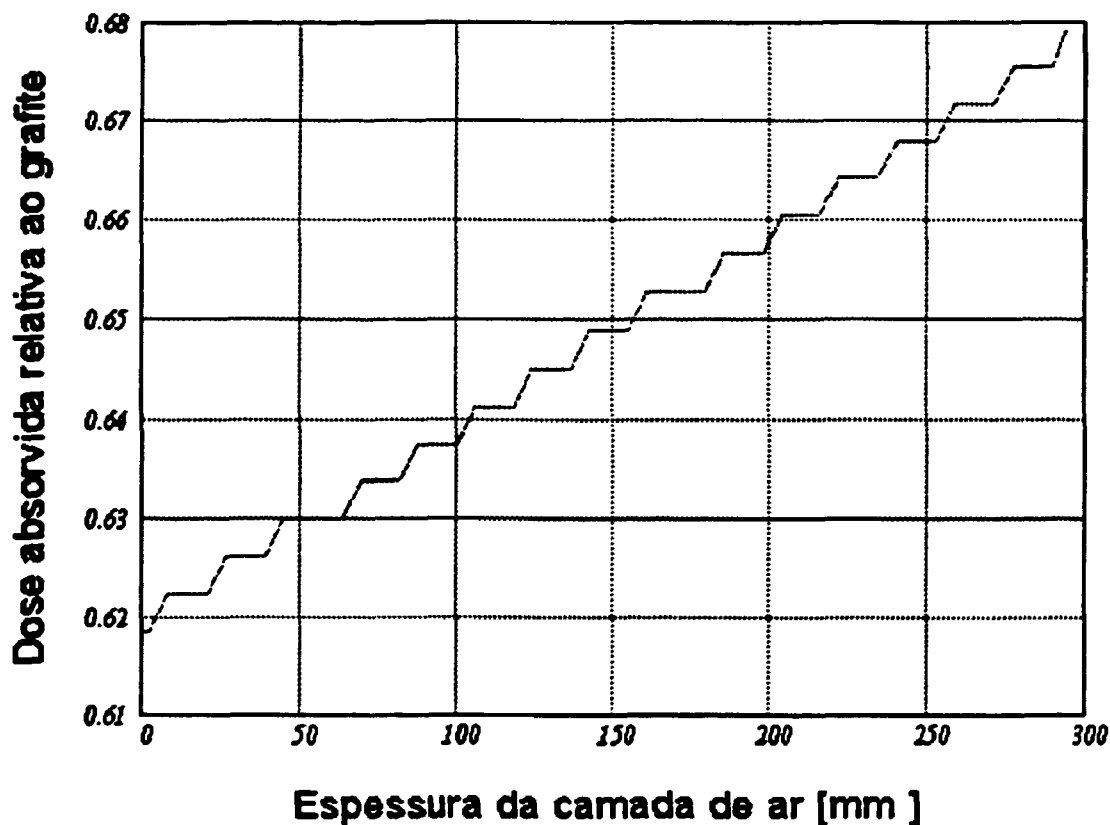


Figura 5.5 : Distribuição da dose absorvida no ar.

Na camada de 300 mm de ar a dose absorvida, relativa à dose máxima no grafite, também aumenta em função da espessura. A aparente discontinuidade no gráfico da *figura 5.5* deve-se ao fato que o programa atribui uma dose constante a um intervalo de espessura igual ao incremento de espessura, que em nosso caso foi $0,0002 \text{ g/cm}^2$. A densidade do ar utilizada foi de $0,0001293 \text{ g/cm}^3$; assim, o incremento utilizado equivale a 15,5 mm de ar, o que corresponde ao mostrado na *figura 5.5*.

Da mesma forma que para o titânio, foi calculada a fração de dose absorvida no ar resultando em 0,0461 da dose total.

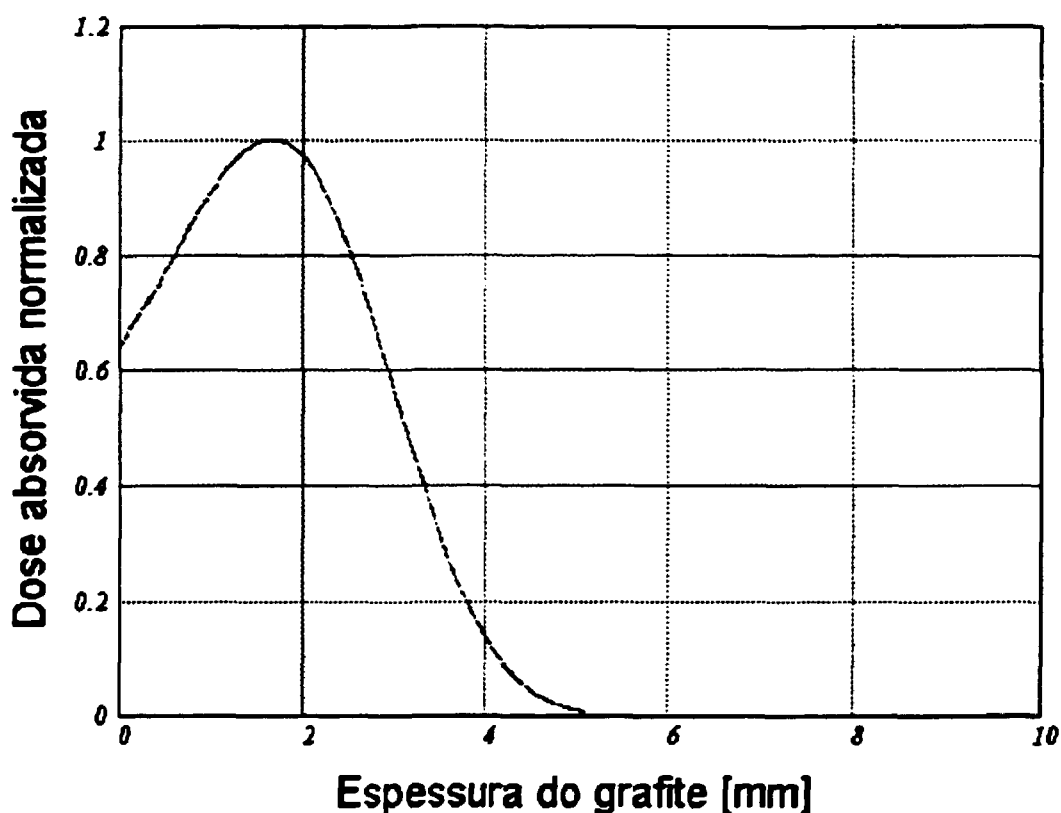


Figura 5.6 : Distribuição da dose absorvida no grafite.

A dose absorvida normalizada no grafite em função da espessura, mostrada na *figura 5.6*, aumenta até atingir um máximo em 1,7 mm; a partir desse valor diminui até chegar a zero em 5,1 mm. Esta espessura corresponde ao alcance dos elétrons de 1,5 MeV no grafite. A fração de dose absorvida no grafite resulta em 0,9346 da dose total.

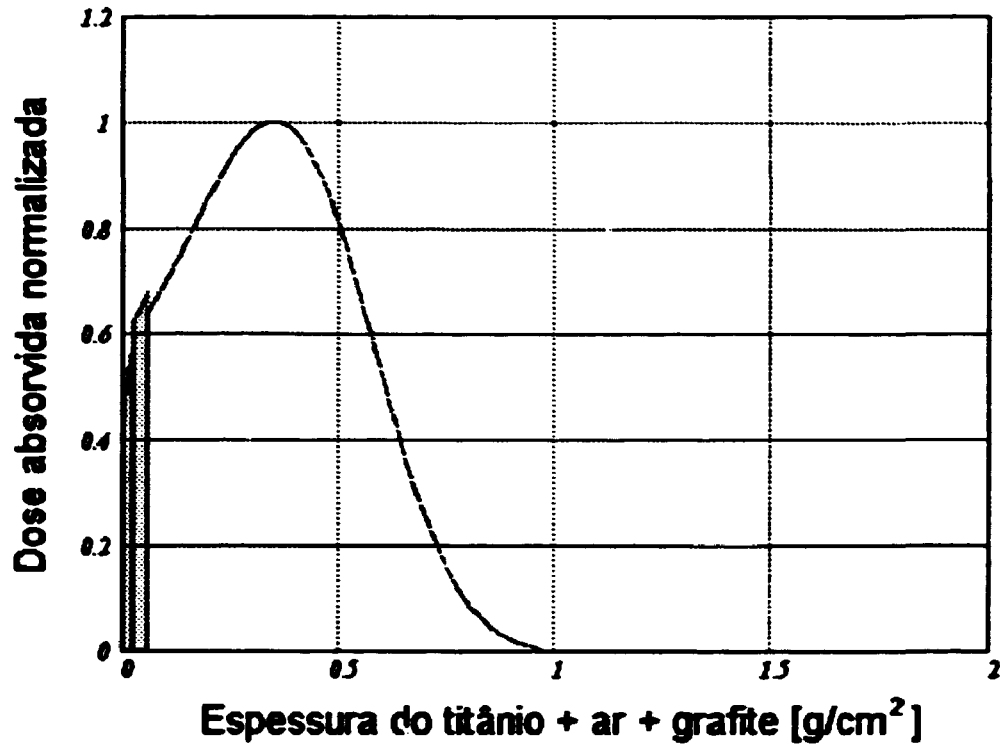


Figura 5.7 : Distribuição da dose absorvida no titânio + ar + grafite

No gráfico da *figura 5.7* pode ser visualizada a fração da dose absorvida por cada um dos três absorvedores, onde cada fração equivale à área sob a curva de distribuição da dose absorvida. A primeira região corresponde ao titânio, a segunda ao ar e a última ao grafite.

5.3.2.2 Determinação da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite pelo programa EGS4

O programa EGS4 de autoria de W. R. NELSON, H. HIRAYAMA e D. W. O. ROGERS [31,46] , desenvolvido no Stanford Linear Accelerator Center, é um conjunto de programas para a simulação, pelo método de Monte Carlo, do transporte de elétrons e fótons em um meio de geometria arbitrária para partículas com energias na região de keV a TeV.

Os dados de entrada são os mesmos que os utilizados anteriormente no programa EDMULT, e o resultado para o núcleo de grafite é mostrado na *figura 5.8*.

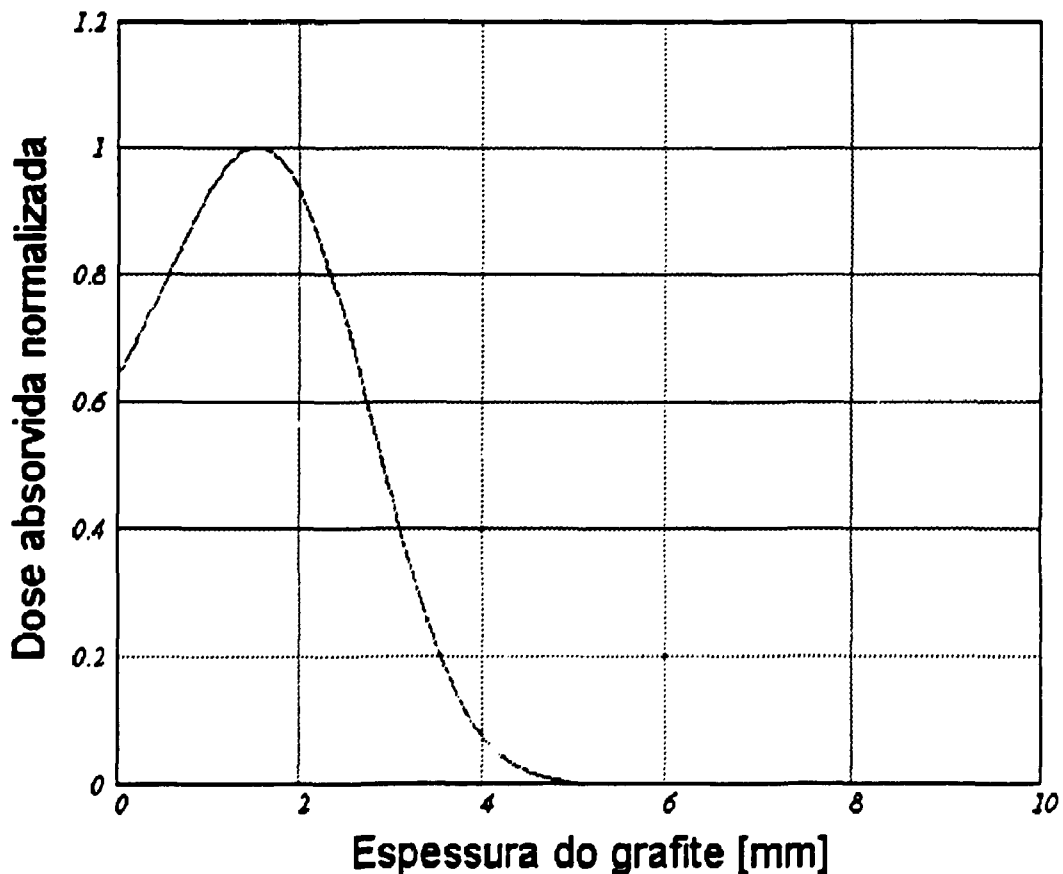


Figura 5.8 : Distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite calculada pelo programa EGS4.

5.3.2.3 Determinação experimental da distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite

Com o objetivo de validar os resultados obtidos para a distribuição da dose absorvida no grafite, nas condições de irradiação do acelerador de elétrons do IPEN, a partir dos cálculos realizados com os programas EDMULT e EGS4, foi determinada experimentalmente a distribuição da dose absorvida no núcleo de grafite. Para isto, foi utilizado como absorvedor um bloco de grafite de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, cortado ao meio na diagonal e, para a determinação da dose absorvida foram posicionados ao longo do corte diagonal do bloco seis dosímetros de filmes triacetato de celulose (CTA). A *figura 5.9* descreve esquematicamente o sistema para a determinação experimental da distribuição de dose absorvida no núcleo.

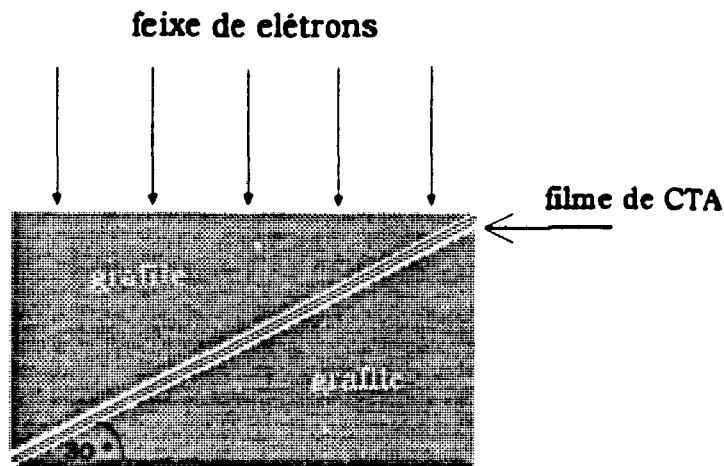


Figura 5.9 : Conjunto bloco de grafite-filme dosimétrico.

Irradiação

A irradiação foi realizada no acelerador de elétrons nas seguintes condições:

- Energia	: 1,5 MeV
- Corrente do feixe	: 15 mA
- Velocidade horizontal do bloco	: 3,36 m/min
- Largura do feixe	: 2,54 cm
- Taxa de dose	: 60 kGy/s
- Dose total absorvida por passada	: 27 kGy

Em função do intervalo de utilização do filme de CTA o conjunto bloco de grafite-filme dosimétrico foi irradiado com dez passadas, para obter-se uma dose absorvida total de 270 kGy.

Leitura dos dosímetros

Para permitir a determinação da dose absorvida em função da espessura do grafite a cada 0,5 mm foi utilizado um porta-amostras especialmente construído para possibilitar a leitura do filme através de uma fenda de 1mm, que equivale a uma espessura de 0,5 mm no grafite ($1 \text{ mm} \times \text{sen } 30^\circ$). Para a leitura dos seis dosímetros de CTA foi utilizado o espectrofotômetro Hitachi modelo 100-40 com comprimento de onda de 295 nm (máximo de absorvância). Para efeito de estabilização as leituras foram realizadas 24 horas após a irradiação. A conversão das leituras de absorvância em dose foi efetuada utilizando a curva de calibração para elétrons obtida pelo IPEN/GE para o filme de CTA e o mesmo espectrofotômetro, mostrada na *figura 5.10*.

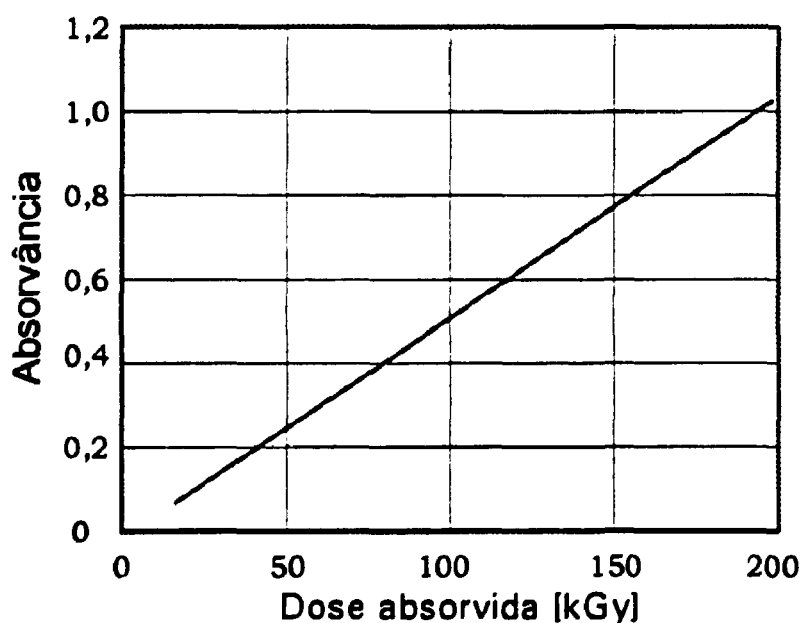


Figura 5.10 : Curva de calibração do filme CTA-FUJI , 295 nm.(IPEN/GE)

A figura 5.11 mostra os resultados obtidos na determinação da dose absorvida no grafite (normalizada) em função da espessura no grafite pelos três métodos adotados: cálculo com o programa EDMULT (linha contínua), cálculo com o programa EGS4 (linha tracejada), e as medidas experimentais (\oplus).

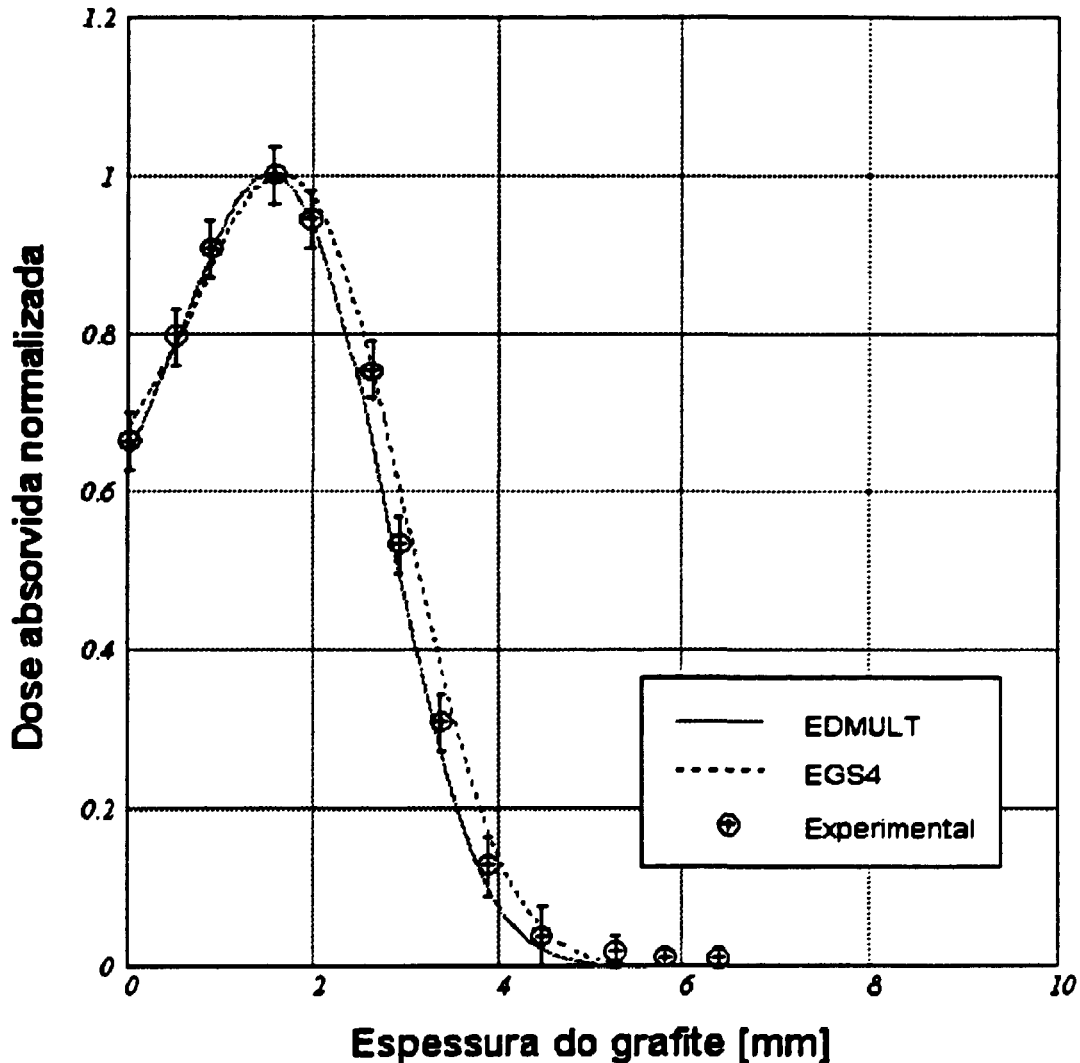


Figura 5.11 : Distribuição da dose absorvida em função da profundidade em grafite de densidade $1,77 \text{ g/cm}^3$, para elétrons de $1,5 \text{ MeV}$.

Comparando os resultados obtidos na determinação experimental da distribuição da dose absorvida no grafite com os calculados pelos programas EDMULT e EGS4 pode-se concluir que há uma boa concordância entre todas as determinações. Conseqüentemente, os resultados fornecidos pelo programa EDMULT

e EGS4 são válidos para a determinação dos parâmetros de projeto do núcleo do calorímetro.

5.3.3 DETERMINAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO SENSOR DE TEMPERATURA NO NÚCLEO

O calorímetro foi irradiado sobre uma bandeja que se desloca a uma velocidade constante de 3,36 m/min. A largura do feixe de elétrons na superfície do calorímetro é 2,54 cm. Portanto, cada elemento de massa do calorímetro foi irradiado durante um tempo de 0,45 s. Ao final do tempo de irradiação, a distribuição da temperatura em função da espessura, a seguir denominada *profundidade*, é igual à distribuição da dose absorvida em função da profundidade no núcleo de grafite calculada na seção anterior. Tendo como objetivo o posicionamento do sensor de temperatura em uma profundidade onde a temperatura após a irradiação seja invariante no tempo e igual à temperatura de equilíbrio térmico do núcleo foi estudada a evolução no tempo do perfil de temperatura no núcleo, utilizando um programa especialmente desenvolvido baseado no método numérico de Schmidt.

5.3.3.1 Método numérico de Schmidt

A evolução no tempo do perfil de temperatura no núcleo de grafite configura uma situação clássica de condução de calor em regime transitório. Todavia, por causa da geometria de irradiação do núcleo e sabendo que a temperatura inicial é função apenas da profundidade, o cálculo será feito em uma dimensão.

O método numérico de Schmidt [17] proporciona uma solução simples a muitos problemas de condução de calor em transientes. O meio é dividido em camadas adjacentes de espessura Δx de modo que a temperatura em qualquer camada, depois do intervalo de tempo Δt , seja a média aritmética das temperaturas das camadas adjacentes no início do intervalo de tempo. A *figura 5.12* é um exemplo de

um perfil de temperatura dividido em duas camadas, mostrando a determinação gráfica da temperatura Q' .

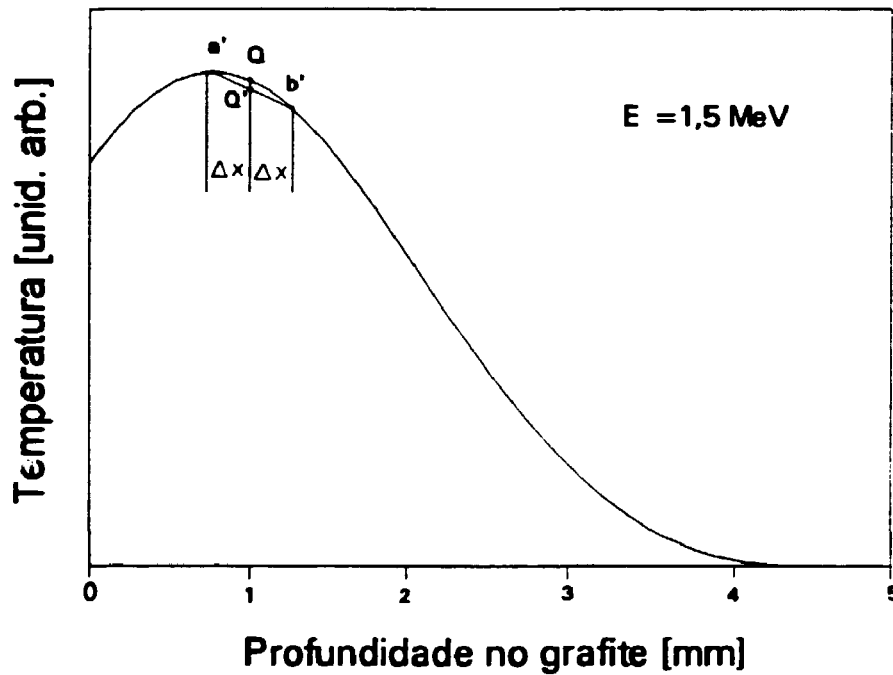


Figura 5.12: Aplicação gráfica do método de Schmidt

Na figura 5.12 as camadas são separadas por planos que passam pelos pontos a' , Q e b' , os quais representam respectivamente as temperaturas iniciais $T_{a'}$, T_Q e $T_{b'}$. O gradiente de temperatura aproximado na camada $\{a'-Q\}$ é $(T_Q - T_{a'}) / \Delta x$ e na camada $\{Q-b'\}$ é $(T_Q - T_{b'}) / \Delta x$. No tempo Δt o fluxo de calor por unidade de área do plano Q para o plano a' é $k \Delta t (T_Q - T_{a'}) / \Delta x$ e $k \Delta t (T_Q - T_{b'}) / \Delta x$ em direção ao plano b' . A soma do calor que sai em direção ao plano a' com o calor que sai em direção ao plano b' é igual à perda de calor do plano Q como mostra a expressão :

$$c \rho \Delta x (T_Q - T_{Q'}) = \frac{k \Delta t (T_Q - T_{a'})}{\Delta x} + \frac{k \Delta t (T_Q - T_{b'})}{\Delta x} \quad (5.4)$$

Simplificando temos :

$$(T_Q - T_{Q'}) \frac{(\Delta x)^2}{2 \alpha \Delta t} = T_Q - \frac{T_a + T_b}{2} \quad (5.5)$$

Se Δx e Δt são escolhidos [6] tais que,

$$\frac{(\Delta x)^2}{2 \alpha \Delta t} = 1 \quad (5.6)$$

então,

$$T_{Q'} = \frac{(T_a + T_b)}{2} \quad (5.7)$$

também,

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (5.8)$$

onde: α , difusividade térmica [cm²/s]

k , condutividade térmica [J/s cm K]

c , calor específico [J/g K]

ρ , densidade [g/cm³]

Para o grafite utilizado os valores das grandezas acima descritas são:

$$\alpha = 0,494 \text{ [cm}^2\text{/s]} , \quad k = 0,63 \text{ [J/s cm K]}$$

$$c = 0,72 \text{ [J/g K]} , \quad \rho = 1,77 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Com estes dados e utilizando a equação 5.7 foi desenvolvido o programa VARTEMP que permite o cálculo e a visualização da variação do perfil de temperatura ou a distribuição de temperatura no núcleo em função do tempo . A listagem do programa encontra-se no *apêndice 1*. Os parâmetros de entrada do programa foram a distribuição da dose absorvida (equivalente ao perfil de temperatura) obtida pelo programa EDMULT e a densidade, calor específico,

condutividade e difusividade térmica do grafite. Para otimizar o tempo de cálculo Δx foi fixado em 0,135 mm e utilizando a equação 5.6 Δt resultou em 0,000184 s. Isto significa que a espessura do núcleo de grafite de 10 mm foi dividida em 74 camadas. Para obter uma variação percentual máxima de 0,05 % entre as temperaturas da face superior e inferior do núcleo o programa VARTEMP realizou 9700 iterações, onde cada iteração recalcula a temperatura nas 74 camadas Δx .

A figura 5.13 mostra o gráfico gerado pelo programa VARTEMP , onde é mostrada a variação da temperatura em função do tempo. A linha contínua indica o perfil de temperatura para $t = 0$ s após a irradiação. A linha tracejada mostra o perfil de temperatura para $t = 1,7$ s após a irradiação.

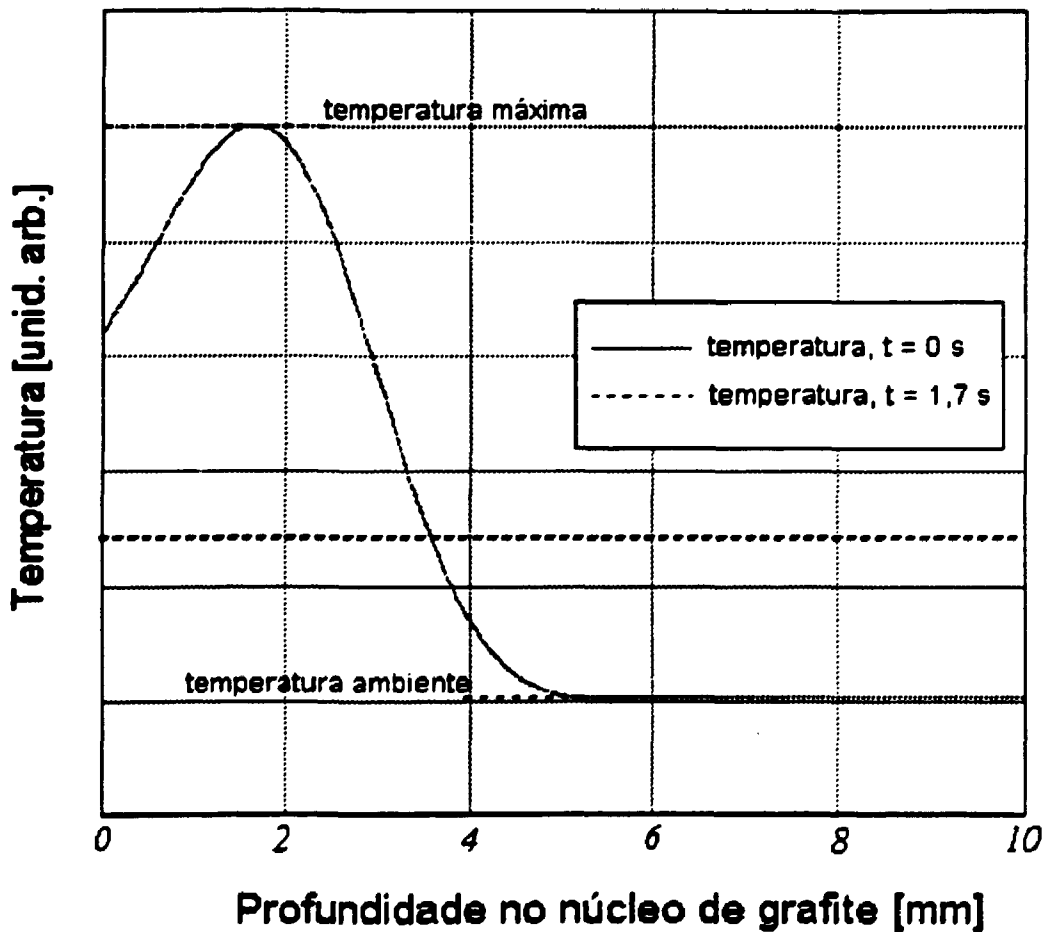


Figura 5.13 : Perfil de variação da temperatura em função da profundidade e do tempo, em grafite irradiado com elétrons de 1,5 MeV, calculado pelo método de Schmidt.

A *figura 5.14* mostra o termograma gerado pelo programa VARTEMP , onde é mostrado o perfil de temperatura no interior do núcleo em função do tempo após a irradiação, variando de $t = 0$ a $t = 1,12$ s.

VARIAÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DO TEMPO

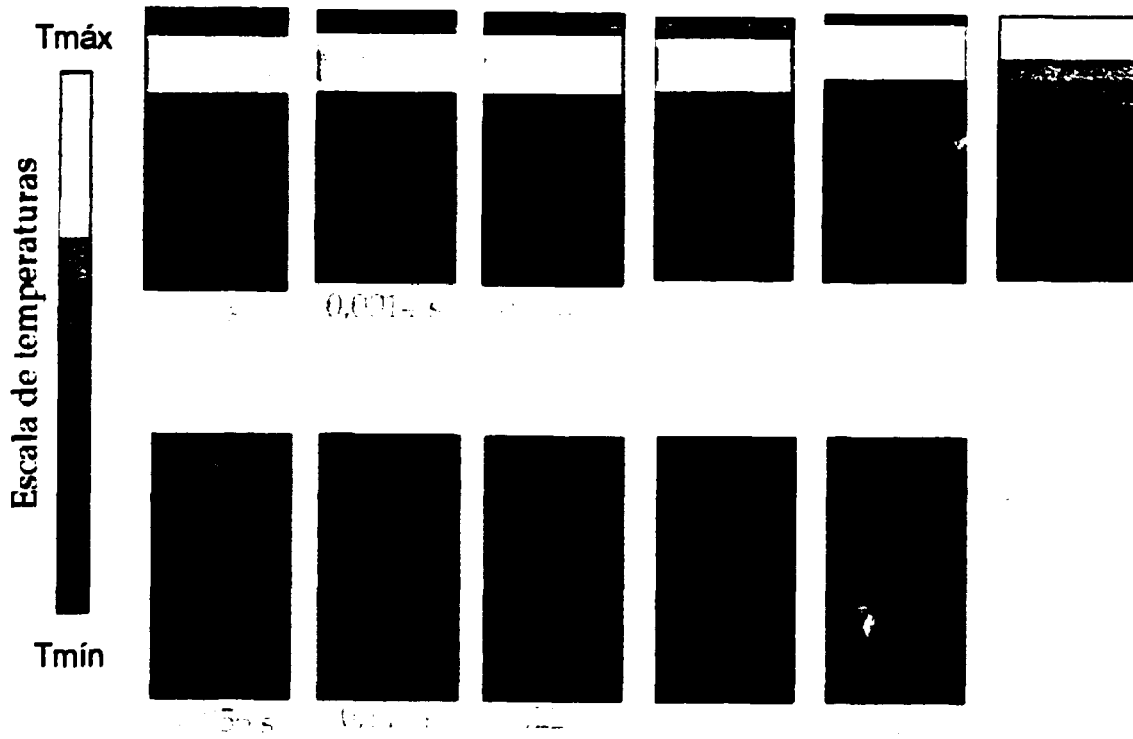


Figura 5.14 : Termograma do núcleo em função do tempo gerado pelo programa VARTEMP.

A *figura 5.15* mostra um gráfico 3D a partir dos resultados do programa VARTEMP, onde é observada a temperatura no núcleo em função da profundidade e do tempo após a irradiação. A *figura 5.13* equivale a uma projeção no eixo do tempo desta figura.

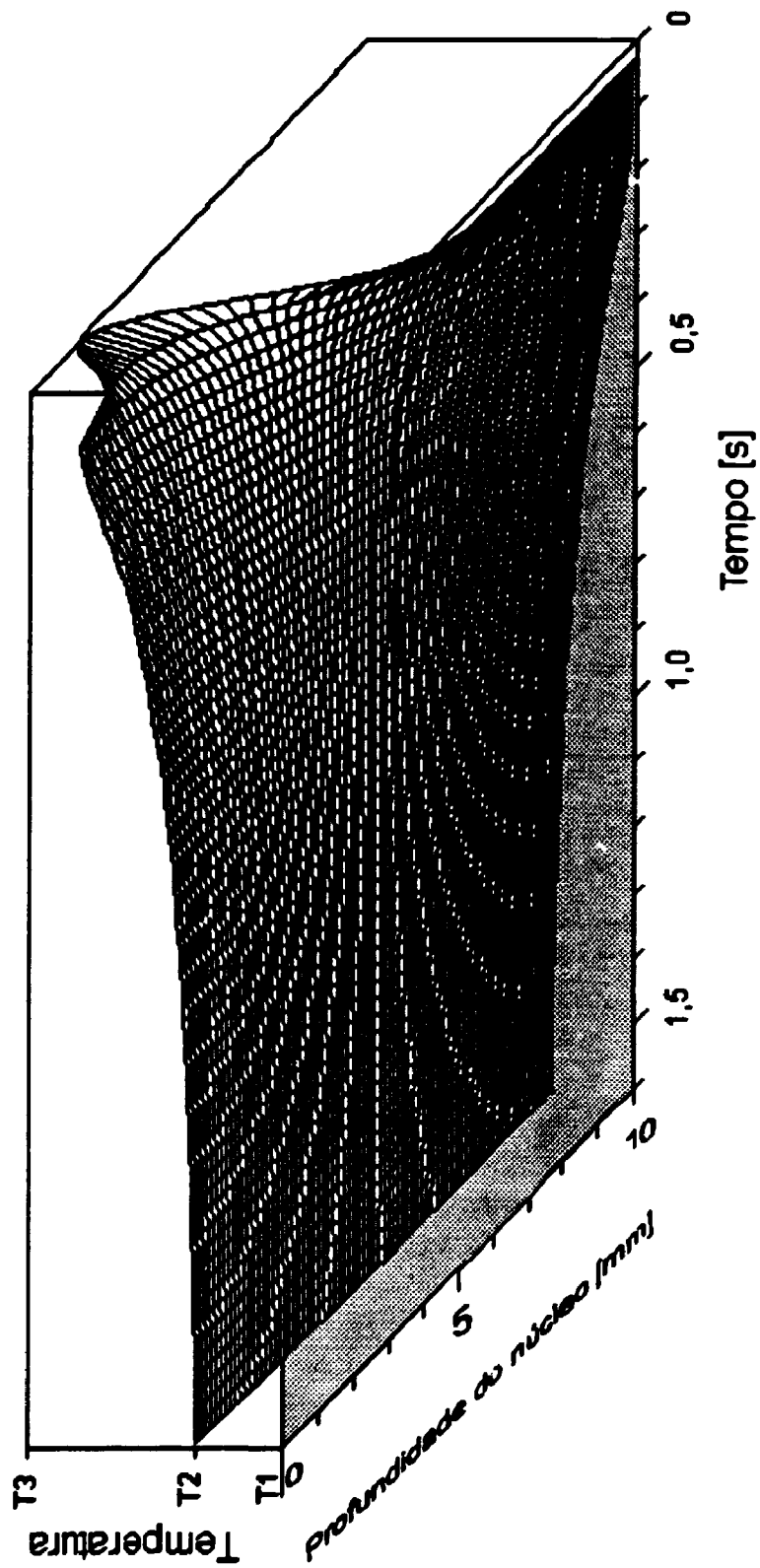


Figura 5.15 : Temperatura do núcleo em função da profundidade e do tempo após a irradiação .

Finalmente a *figura 5.16* mostra a variação percentual de temperatura entre a face superior e inferior do núcleo, em função do tempo após a irradiação.

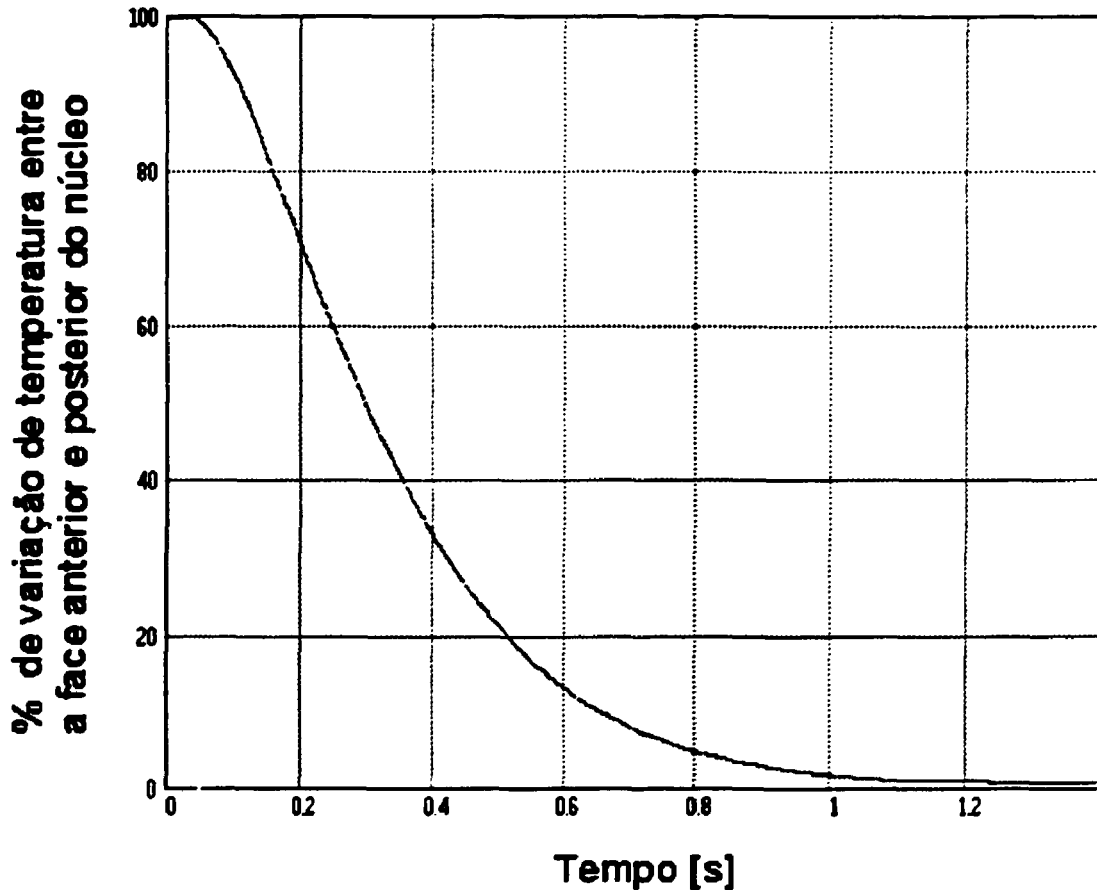


Figura 5.16 : Variação percentual de temperatura entre as faces do núcleo em função do tempo após a irradiação.

Pela análise dos resultados obtidos, mostrados nas figuras 5.13 a 5.16, baseados no perfil de temperatura inicial e a evolução do perfil de temperatura em função do tempo após a irradiação, determinou-se o ponto ótimo para a localização do sensor de temperatura a 3,8 mm da superfície do núcleo de grafite. Nesta profundidade, a temperatura após a irradiação é invariante no tempo e igual à temperatura de equilíbrio térmico do núcleo.

5.3.4 CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO

Com base nos parâmetros iniciais de projeto, os materiais definidos na seção 5.2, e a profundidade ótima no núcleo onde será localizado o termistor, determinada na seção anterior, foi construído o calorímetro segundo o projeto incluído no *apêndice 2*. A *figura 5.17* mostra um desenho esquemático em corte do calorímetro construído.

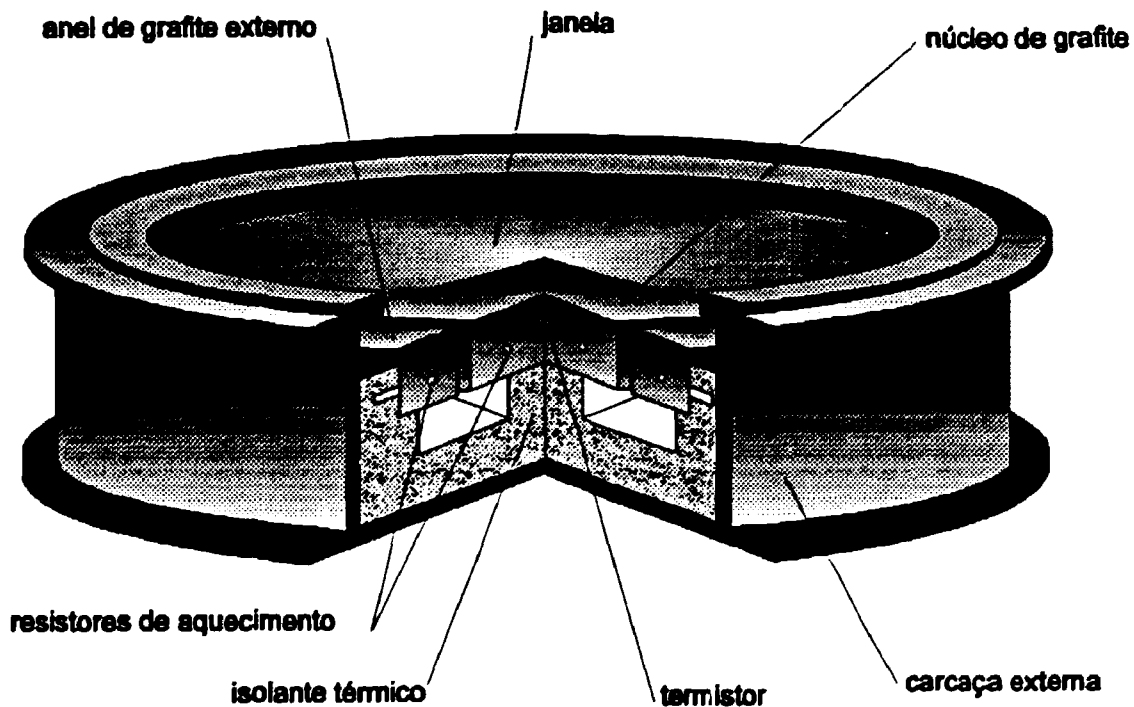


Figura 5.17 : Desenho esquemático do calorímetro.

Durante a montagem e os testes iniciais do calorímetro foi verificado que a janela de poliéster duplamente metalizado de $0,8 \text{ mg/cm}^2$ não suporta a pressão do fluxo de ar de resfriamento da janela do acelerador. Em consequência, foi utilizada, com resultados satisfatórios, uma janela de titânio de $0,0193 \text{ mm}$ de espessura (igual à janela do acelerador). A fração da dose absorvida por esta janela foi calculada na seção 5.3.2.1 e introduzida no programa de operação do calorímetro em substituição ao valor da fração de dose absorvida para a janela de poliéster.

5.4 CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA

Como foi discutido na seção 3.6, os dois sensores mais utilizados para detecção e medição das variações de temperatura induzidas pela radiação são o termopar e o termistor. Sendo o termistor mais sensível à variação de temperatura que o termopar, é o sensor mais utilizado em calorímetros. Suas propriedades principais são : pequenas dimensões e sensibilidade elevada. Por estas razões foi o sensor de temperatura escolhido para utilização no calorímetro em desenvolvimento. Entre as diversas opções de termistores disponíveis no mercado foi escolhido o modelo SDT 1000 fabricado pela SANYO cujas especificações são as seguintes:

Temperatura de operação	:	-20 a 70 °C
Resistência elétrica a 25 °C	:	10.000 ohm
Gradiente "K" , R25/R50	:	3,2
Constante "B"	:	4470
Dimensões	:	φ5 mm x 2,5 mm

Para determinar experimentalmente a relação entre a resistência elétrica do termistor e a temperatura, foi desenvolvida uma metodologia específica de calibração. Assim, previamente, foi calibrado um termômetro de resistência de níquel (Ni-100) contra um padrão de referência constituído por um termômetro de resistência de platina (Pt-100) . O termistor e o termômetro de Ni-100 calibrado foram submersos em óleo de silicone contido em um reservatório de vidro dentro de um banho de água termostaticado. Nesta condição a temperatura do óleo de silicone, inicialmente a 288 K, foi aumentada sob permanente agitação até 338 K. A velocidade de aquecimento foi 1 K/min. Durante o aquecimento foram feitas leituras da resistência elétrica do termistor e do termômetro de Ni-100 a cada 2 s.

Os equipamentos utilizados para as leituras de resistência elétrica foram dois eletrômetros Keithley modelos 617 e 619 ligados a um sistema de aquisição de

dados formado por um microcomputador PC e uma interface IEEE-488, como mostrado na figura 5.16.

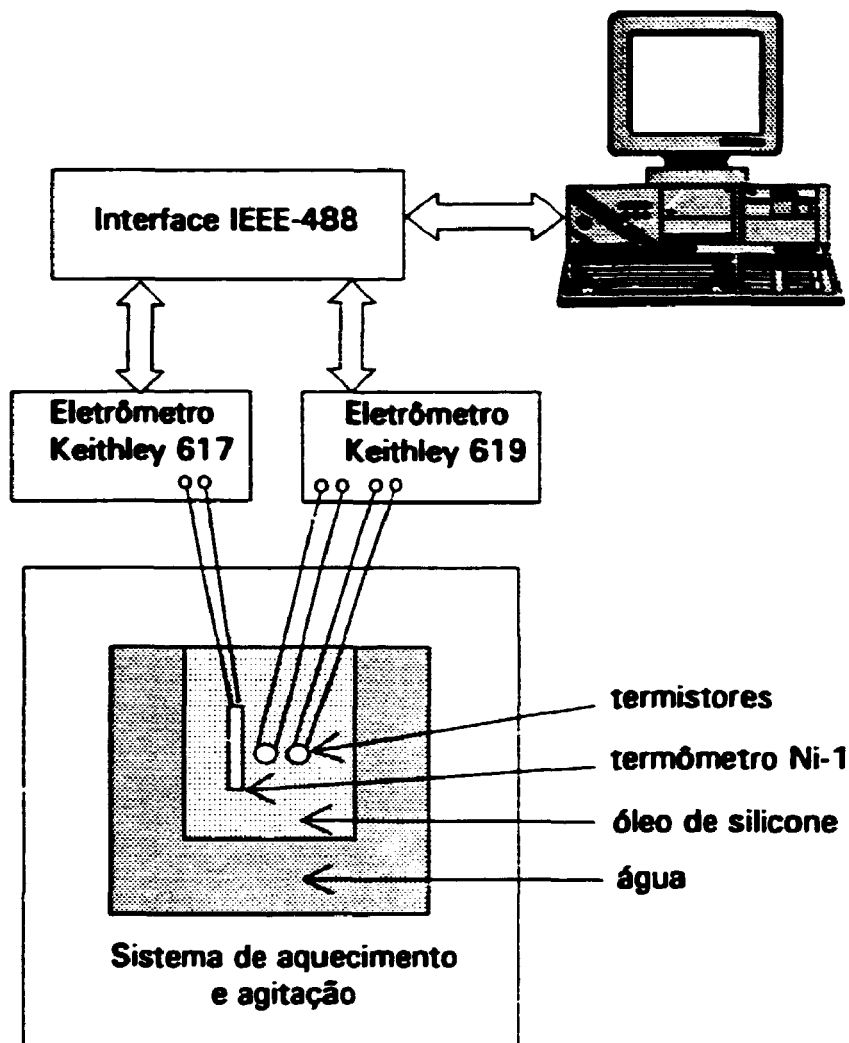


Figura 5.16 : Diagrama esquemático do sistema de calibração do termistor.

As medidas de resistência elétrica do termômetro de Ni-100 e do termistor, no intervalo de variação de temperatura, foram adquiridas em tempo real, transformando a leitura do termômetro de Ni-100 (resistência) em temperatura para monitoração "on-line" na tela dos dados adquiridos e arquivo no disco rígido para posterior processamento. O programa CALTERM, desenvolvido especialmente neste trabalho para automatizar a aquisição dos dados relativos à calibração do termistor, está listado no apêndice 3.

Os aproximadamente 1500 pares de dados foram processados posteriormente em uma regressão de grau 4 utilizando o programa *MATHCAD for Windows*. A correlação dos dados de calibração realizada com este programa é mostrada no apêndice 4.

Assim, foi obtida uma expressão do tipo :

$$\frac{1}{T} = A + B(\log R) + C(\log R)^2 + D(\log R)^3 + E(\log R)^4 \quad (5.10)$$

onde , T = temperatura, K ;

R = resistência elétrica, ohm ;

A ,B, C, D, e E = constantes obtidas da regressão de grau 4 dos dados experimentais.

A *figura 5.17* mostra a curva de calibração do termistor nº10 onde foram graficados os pontos experimentais e os pontos calculados a partir da equação obtida. Pode-se observar que devido à excelente correlação dos dados experimentais não há diferença, no gráfico, entre os pontos experimentais e os pontos calculados.

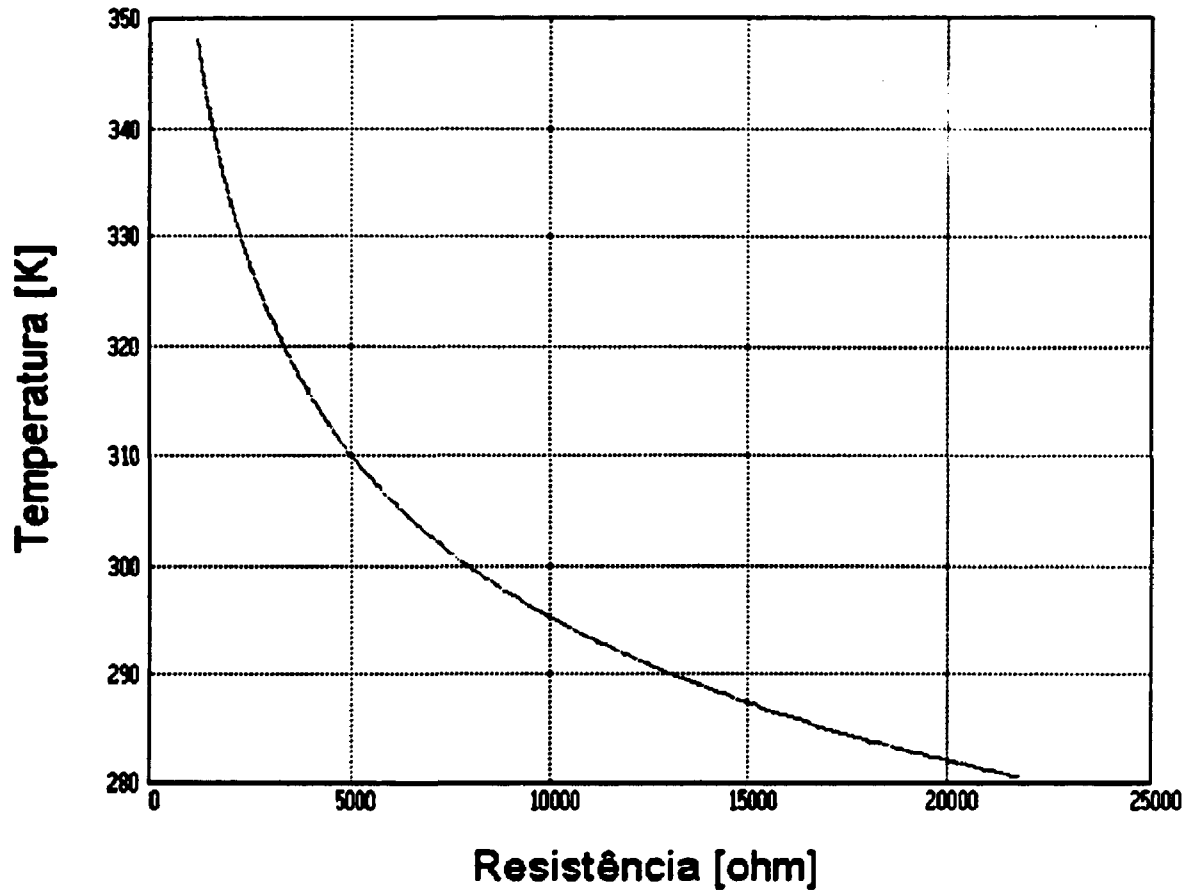


Figura 5.17 : Curva de calibração do termistor n°10.

Os coeficientes obtidos da regressão de grau 4 a serem utilizados na *equação 5.10* resultaram em:

$$\begin{aligned}
 A &= 0,0047253 \\
 B &= -0,0014012 \\
 C &= 2,8126 \times 10^{-4} \\
 D &= -2,109 \times 10^{-5} \\
 E &= 5,8152 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

5.5 DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO

Na seção 3.5 foi discutida a calibração do calorímetro, onde um dos métodos consiste na utilização de uma resistência elétrica no interior do núcleo na qual é aplicada uma tensão V durante um tempo t . Assim, a energia dissipada no resistor por efeito Joule pode ser determinada a partir da resistência, da corrente e do tempo por meio da equação 3.7.

Neste trabalho foi desenvolvida uma nova metodologia baseada no método acima descrito. Esta metodologia consiste em automatizar todas as medidas por meio da utilização do microcomputador; cujas principais características são :

a) utiliza resistências de aquecimento do mesmo valor no núcleo e no anel, conectadas em série ;

b) mede com extrema precisão a tensão elétrica, $V(t)$, aplicada ao resistor de aquecimento do núcleo em função do tempo, a corrente elétrica, $I(t)$, que passa pelos resistores em função do tempo e o tempo, t , em que o circuito permanece fechado. Estas medidas, realizadas por intermédio de um microcomputador, permitem calcular a energia dissipada no resistor utilizando a seguinte expressão :

$$E = \int_0^t V(t) I(t) dt \quad (5.11)$$

c) mede a variação de temperatura do núcleo (T_2-T_1) para o cálculo da capacidade térmica por meio da expressão:

$$C = \frac{E}{(T_2 - T_1)} \quad (5.12)$$

5.5.1 RESISTORES DE AQUECIMENTO

A utilização de dois resistores de aquecimento iguais, no núcleo e no anel, é necessária para dissipar a mesma quantidade de energia, minimizando a troca de calor (condição quase-adiabática). Em consequência disto, após dissipada a energia nas resistências, o núcleo e o anel atingirão a mesma temperatura devido ao fato de possuírem a mesma massa e capacidade térmica.

Os resistores de aquecimento foram construídos em fio de Ni-Cr bitola nº 26, diâmetro = 0,4 mm , resistência linear = 8,2 ohm/m e comprimento = 28,6 cm. A resistência elétrica de cada resistor resultou em 2,5 ohm.

Os resistores no núcleo e no anel foram posicionados nos respectivos baricentros, de modo a minimizar o tempo necessário para o equilíbrio térmico. A *figura 5.18* mostra o posicionamento dos resistores no núcleo e no anel.

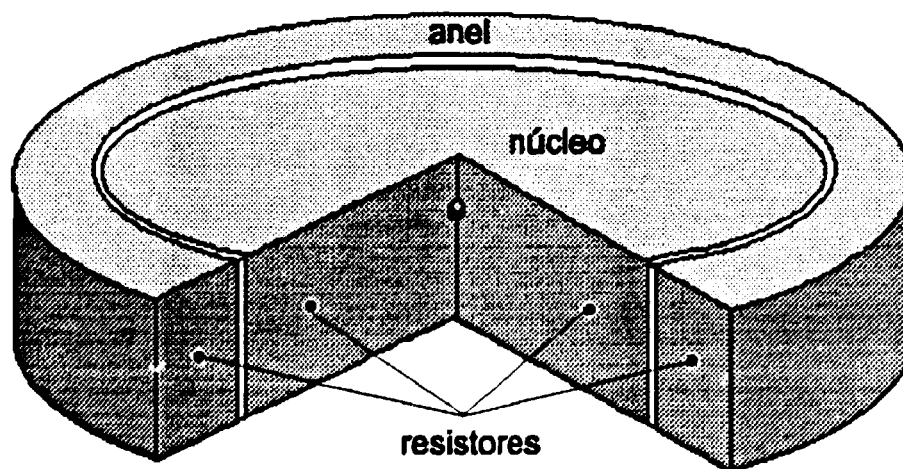


Figura 5.18 : Posicionamento dos resistores de aquecimento.

Na calibração é necessário que o tempo de dissipação da energia elétrica no resistor seja comparável ao tempo de irradiação do calorímetro (0,45 s) e também, que a energia dissipada provoque um pequeno aumento de temperatura do núcleo, de modo que a capacidade térmica calculada corresponda a um Δt pequeno. Por tal motivo e considerando que o sensor de temperatura permite medir variações de temperatura

menores do que $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi calculada a energia E_0 necessária para elevar em $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura do núcleo, utilizando a equação 3.6 e o valor nominal da capacidade térmica para o núcleo de grafite ($43,6\text{ J}/^{\circ}\text{C}$).

A energia E_0 calculada resultou em $4,36\text{ J}$. Sendo a massa do núcleo $63,76\text{ g}$, a dose absorvida de radiação resulta em $68,4\text{ Gy}$.

A partir do valor calculado de E_0 e do tempo de deposição de energia, $0,45\text{ s}$, foi calculada a potência elétrica mínima da fonte de alimentação para os dois resistores, resultando em $19,4\text{ W}$.

Definida a potência elétrica da fonte de alimentação pode-se calcular a corrente elétrica I e a tensão V da fonte. Para possibilitar a utilização de um conversor analógico-digital (A/D), cuja faixa de operação é de 0 a 5 V , foi fixada a tensão da fonte de alimentação em 9 V . Assim, a tensão média aplicada em cada um dos resistores de aquecimento é $4,5\text{ V}$. Com isto, em função da potência elétrica antes calculada, a corrente média I resulta em $2,16\text{ A}$.

5.5.2 MEDIÇÃO DA CORRENTE, TENSÃO E TEMPO

A medição da corrente elétrica, $I(t)$, é realizada por meio de um sensor de efeito Hall, que fornece um sinal de tensão elétrica diretamente proporcional à corrente que se deseja medir. A utilização do sensor de efeito Hall apresenta as vantagens de elevada sensibilidade e precisão e impedância resistiva igual à zero. Para garantir a exatidão das leituras a serem realizadas com este sensor durante a calibração do calorímetro foi feita uma calibração contra as leituras fornecidas pelo eletrômetro Keithley 617 utilizado como padrão de referência na medição de corrente.

A saída de tensão do sensor de corrente Hall foi amplificada para se obter o mesmo nível de tensão, 0 a 5 V , aplicado ao resistor de aquecimento do núcleo. Isto permite que o conversor A/D operado pelo microcomputador, que mede as duas tensões, trabalhe sempre com ganho constante eliminando o ruído gerado pela mudança de ganho.

A *figura 5.19* mostra os dados experimentais da calibração do sensor Hall e a reta obtida pela correlação linear destes dados. A correlação dos dados de calibração é mostrada no apêndice 5.

A equação resultante da calibração do sensor Hall é :

$$I \text{ [A]} = \text{Tensão do sensor Hall [V]} \times 1,13826 - 0,02362 \quad (5.13)$$

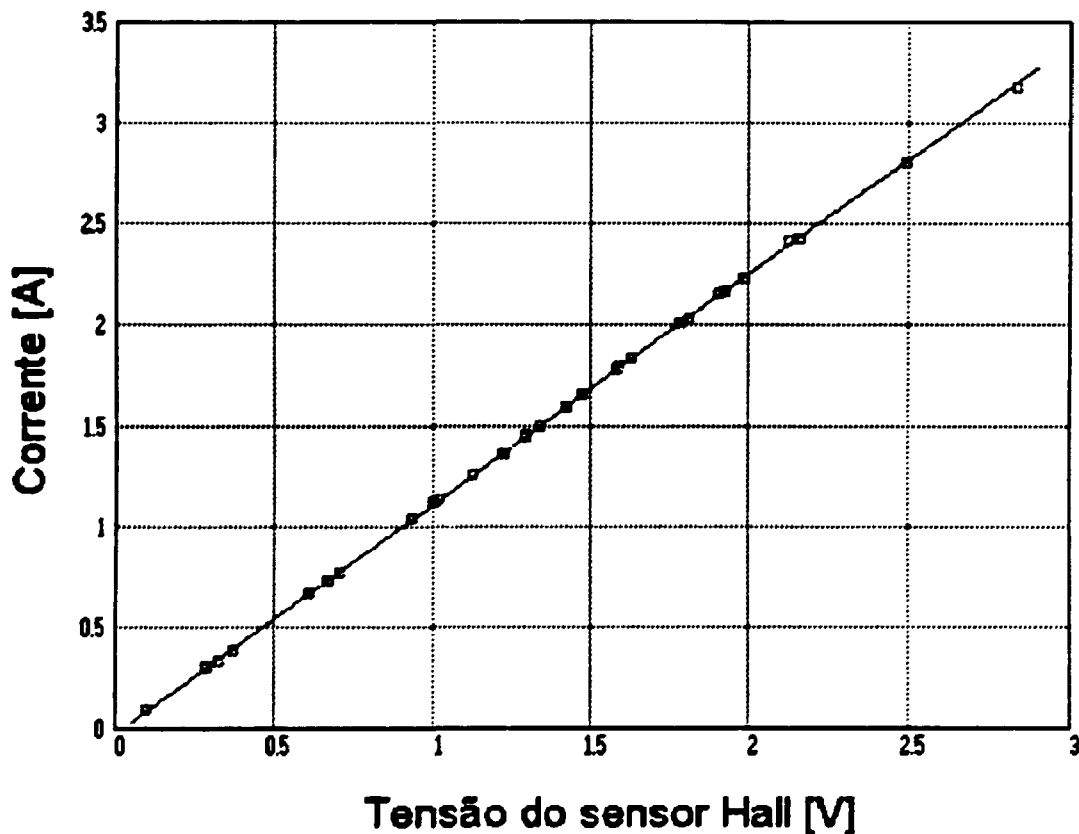


Figura 5.19 : Curva de calibração do sensor Hall de corrente.

A medição da tensão, $V(t)$, aplicada à resistência de aquecimento do núcleo é feita diretamente, sem amplificação, pelo conversor A/D operado pelo microcomputador.

O conversor A/D escolhido possui as seguintes características:

- impedância de entrada $> 10^8$ ohm ;
- resolução = 12 bits , 1,22 mV no intervalo de 0 a 5 V;
- tempo de conversão $< 35 \mu\text{s}$.

O circuito é aberto ou fechado por meio de um relé de estado sólido acionado pelo microcomputador através de uma interface de entradas e saídas digitais. O tempo t durante o qual o circuito permanece fechado ou seja, o tempo de dissipação de calor no resistor, é controlado diretamente pelo microcomputador utilizando um contador e, como base de tempo, o oscilador interno de 25 MHz.

A figura 5.20 mostra um diagrama esquemático do circuito de calibração.

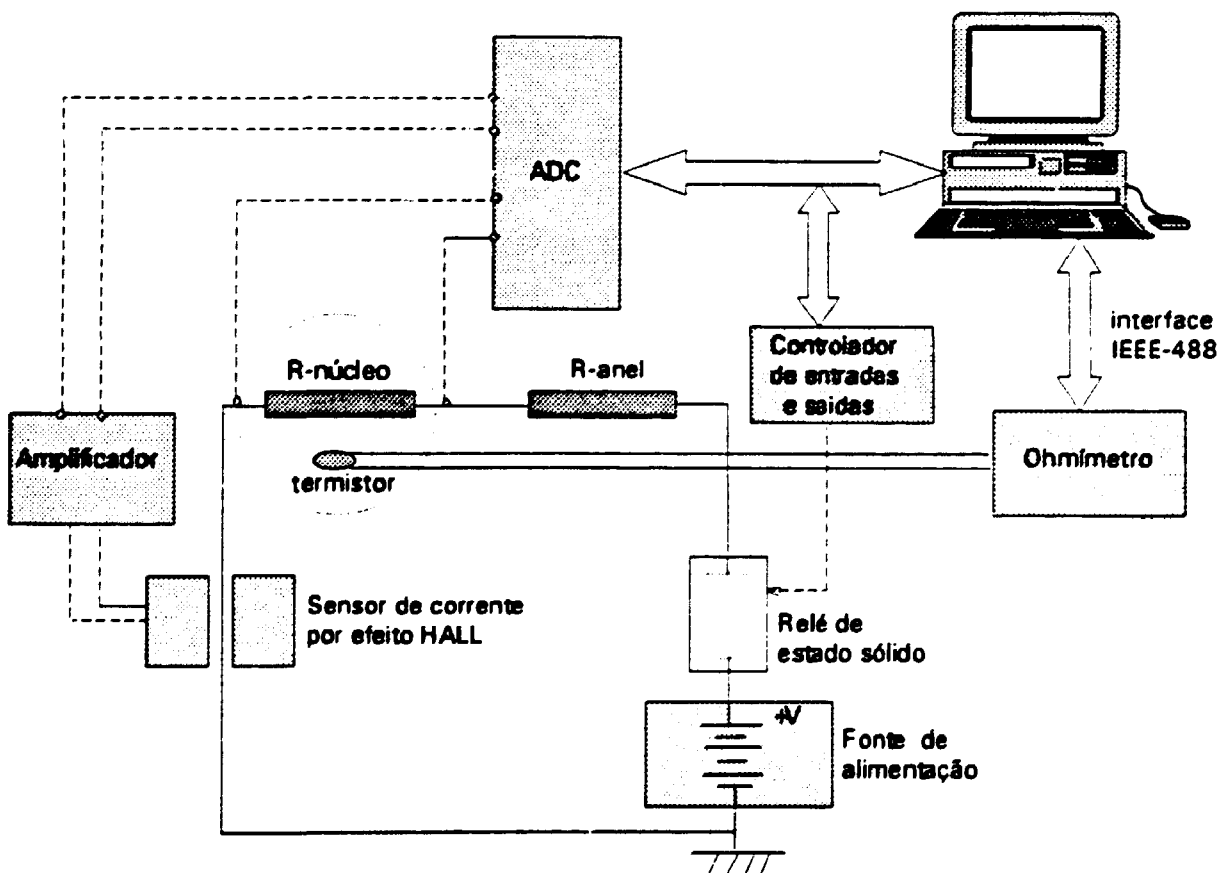


Figura 5.20 : Diagrama esquemático do sistema de calibração.

O cálculo da energia total dissipada E é realizado pelo microcomputador segundo a equação 5.11, por integração numérica do produto $V(t) \times I(t)$ em função do tempo, t , de aquecimento. O intervalo de tempo decorrido entre a aquisição de dois pares $V(t)$ e $I(t)$ é 20 ms. A figura 5.21 mostra um gráfico de $V(t) \times I(t)$ em função do tempo, para 1 s de aquecimento do resistor, onde a energia total depositada, E , é a área sob a curva. Este gráfico é mostrado na tela do computador durante a execução do programa de calibração.

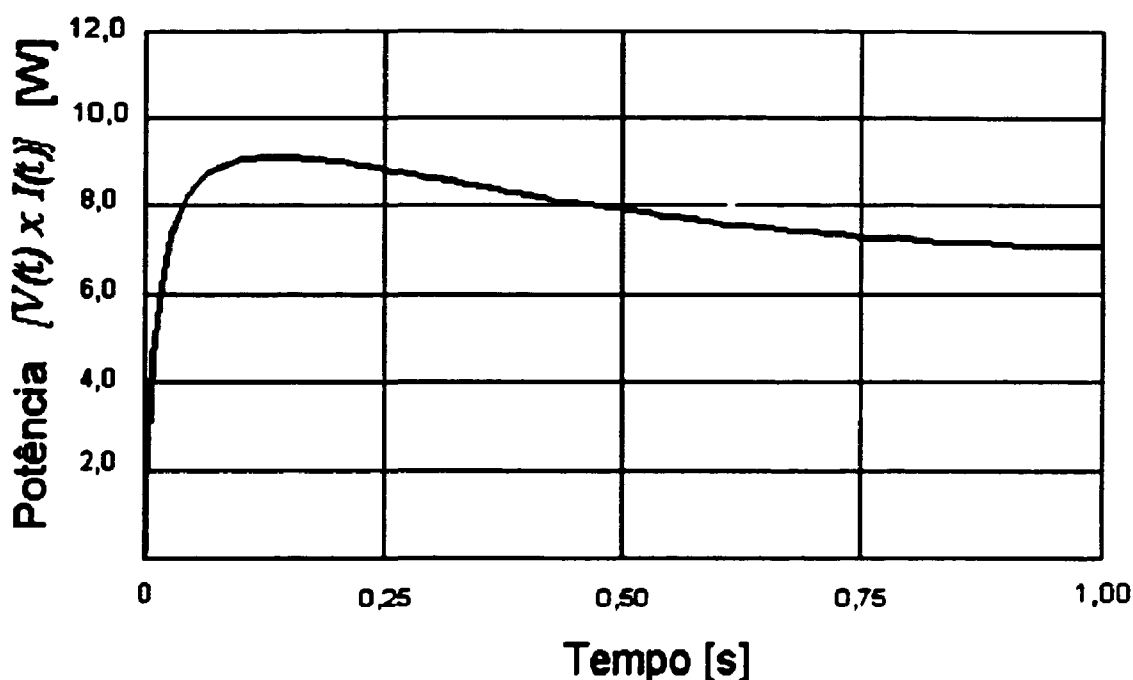


Figura 5.21 : Curva de potência elétrica dissipada no resistor em função do tempo.

Na figura acima pode ser observada inicialmente uma elevação da potência até atingir um valor máximo, seguida de uma diminuição contínua por causa do aumento de temperatura interna do resistor, o que aumenta a resistência elétrica deste.

5.5.3 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO NÚCLEO E CÁLCULO DA CAPACIDADE TÉRMICA

Para acompanhar a elevação da temperatura do núcleo devido à energia elétrica dissipada no resistor, foi estabelecido pelo programa de calibração um ciclo de medição da temperatura. O primeiro, no intervalo de t_1 a t_2 , principia quando o núcleo, depois de atingido o equilíbrio térmico do ciclo de aquecimento anterior, começa a trocar calor com a carcaça. O período seguinte começa no tempo t_2 , que corresponde ao fechamento do relé pelo microcomputador, quando inicia a dissipação de calor no resistor e termina com a abertura do relé no tempo t_3 . O último período principia em t_3 e se prolonga até atingir o equilíbrio térmico, seguido da troca de calor com a carcaça, terminando em t_4 . Durante todo o ciclo a temperatura do núcleo é medida a cada 200 ms, obtendo-se um gráfico similar ao da *figura 5.22*.

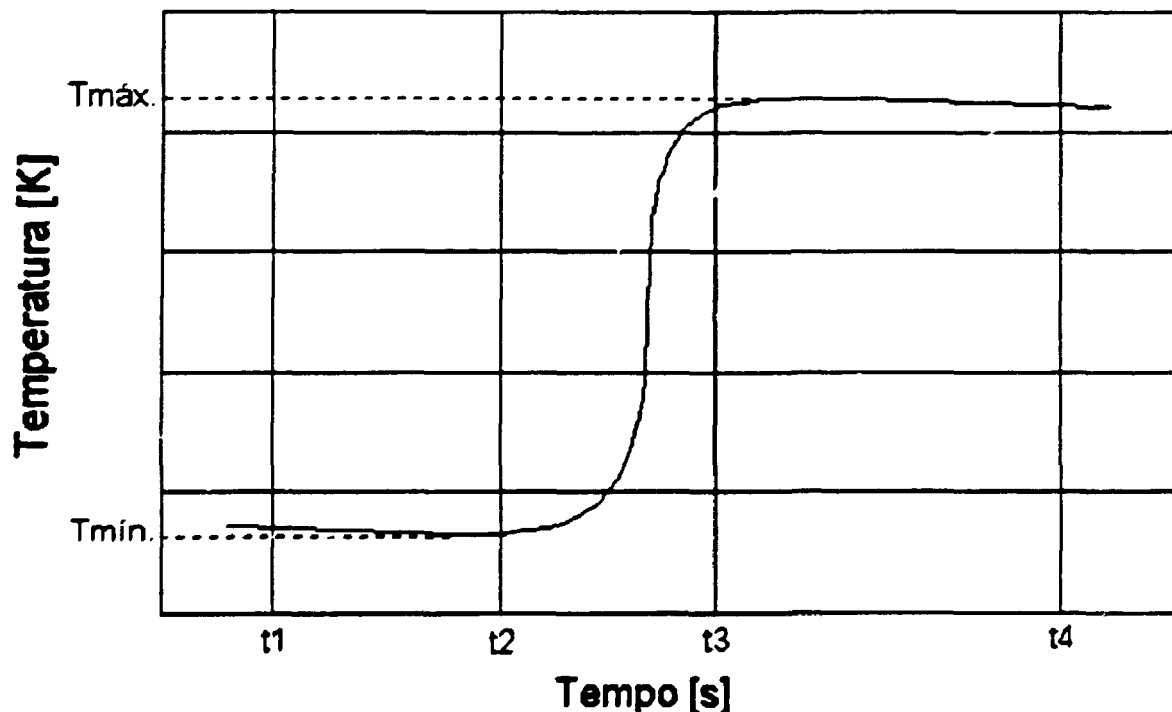


Figura 5.22 : Ciclo de medição de temperatura.

Terminado o ciclo de medição de temperatura são calculados T_{\min} e T_{\max} que correspondem, respectivamente, a T_1 e T_2 da equação 5.12. Finalmente, usando esta equação e com E , T_1 e T_2 o programa calcula a capacidade térmica, C , para $T = (T_2 - T_1) / 2$. Desta forma, repetindo este procedimento, se obtém $C = f(T)$ em todo o intervalo de temperatura da calibração.

5.5.4 PROGRAMA DE CALIBRAÇÃO

O programa de calibração CALIBRA é parte do programa DOFEC (Dosimetria de Feixe de Elétrons por Calorimetria) desenvolvido na linguagem de programação "MS VisualBasic For DOS" versão 1.0 [37,38,39] cuja listagem se encontra no apêndice 6. O programa CALIBRA, interativo com o operador, executa a metodologia de calibração descrita anteriormente através da repetição de uma seqüência de tarefas até a obtenção da capacidade térmica em função da temperatura média em todo o intervalo de temperatura desejado. O resultado final da calibração é um arquivo sequencial com os dados de capacidade térmica em função da temperatura média em todo o intervalo de temperatura utilizado.

As principais tarefas executadas pelo programa CALIBRA na seqüência de execução são:

- 1) Gera um quadro de diálogo para entrada, pelo operador via teclado, do nome do arquivo onde serão gravados no disco rígido as temperaturas médias e as capacidades térmicas em todo o intervalo de temperatura.
- 2) Gera um quadro de diálogo para entrada, pelo operador via teclado, do tempo de aquecimento t .
- 3) Gera a tela principal, mostrada na figura 5.23, onde a temperatura do núcleo é constantemente monitorada em tempo real por meio da subrotina

Le_temp que utiliza a equação 5.10 com as constantes A, B, C, D e E determinadas experimentalmente na calibração do termistor. A temperatura monitorada é mostrada no quadro de temperatura inicial ao mesmo tempo que é gerada uma mensagem na tela para que o operador digite o comando de início do aquecimento.

4) Armazena na memória a temperatura medida no instante anterior ao fechamento do relé, como temperatura mínima, e fecha o relé durante o período de tempo t definido pelo operador.

5) Lê a corrente instantânea, $I(t)$, durante o período de aquecimento por meio do sensor de corrente Hall usando a subrotina *Le_I* e a equação 5.13. Alternadamente, lê a tensão instantânea no resistor de aquecimento do núcleo, $V(t)$, diretamente do conversor A/D por meio da subrotina *Le_V*. As variáveis $I(t)$, $V(t)$ e o produto destas, ou seja, a potência instantânea dissipada no núcleo, são monitoradas em tempo real a cada 20 ms, armazenadas na memória e mostrados os seus valores instantâneos na tela principal, assim como fornece o número total de leituras realizadas no período t .

6) Abre o relé ao término do tempo t de aquecimento e monitora a temperatura do núcleo no quadro de temperatura final até atingir a temperatura máxima a qual é armazenada na memória. A seguir gera, na tela principal, o gráfico da potência instantânea em função do tempo de aquecimento t .

7) Calcula a energia total dissipada ou o calor adicionado no núcleo, E [J], empregando $V(t)$ e $I(t)$ armazenados na memória e utilizando a equação 5.11. Calcula também a capacidade térmica, C [J/°C], através da equação 5.12 empregando E [J] e a temperatura média $(T_2-T_1)/2$.

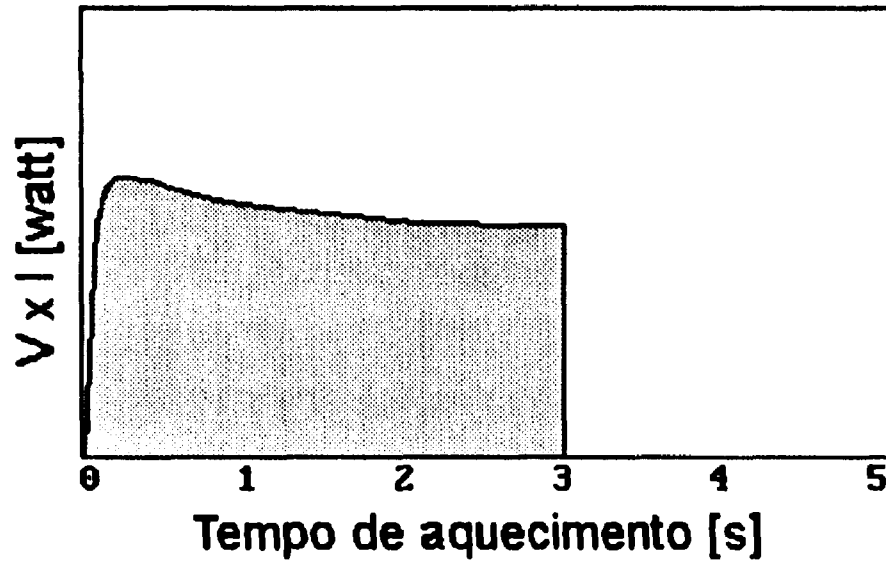
20/12/93

CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO

IPEN/GE

Resistência de Aquecimento
Desligada

Tempo de Aquecimento
3 [s]



Temperatura Inicial
°C
49.38

Temperatura Final
°C
49.74

RESULTADOS

Calor adicionado : 17.80 J

Dif. de temperatura: 0.36 °C

Capac. térmica : 49.44 J/°C

Temperatura média : 49.56 °C

Figura 5.23 : Tela principal do subprograma CALIBRA.

- 8) Apresenta no quadro de resultados da tela principal os valores calculados das variáveis : calor adicionado, capacidade térmica , diferença de temperatura e temperatura média . Grava em disco rígido no arquivo, nomeado em 1), a capacidade térmica e a temperatura média .
- 11) Imprime relatório dos resultados, como mostra a *figura 5.24*.
- 12) Volta ao menu principal do programa DOFEC.

20/12/1993	CALIBRAÇÃO DE CALORÍMETRO	10:02 h
MASSA DO CALORÍMETRO	: 63,7621	g
TEMPO DE AQUECIMENTO	: 3	s
TEMPERATURA INICIAL	: 49,38	°C
TEMPERATURA FINAL	: 49,74	°C
DIF. DE TEMPERATURA	: 0,36	°C
CALOR ADICIONADO	: 17,80	joule
CALOR ESPECÍFICO	: 0,7735	joule / g °C
CAPACIDADE TÉRMICA	: 49.444	joule / °C
TEMPERATURA MÉDIA	: 49.56	°C

Figura 5.24 : Relatório dos resultados de calibração do calorímetro.

5.6 OPERAÇÃO DO CALORÍMETRO

A operação do calorímetro consiste em medir o aumento da temperatura do núcleo como resultado da energia absorvida após a irradiação do calorímetro sob o feixe de elétrons do acelerador.

A medição do ΔT permite o cálculo da energia total E depositada no núcleo. Isto é feito através da integração numérica de dE em todo o intervalo de variação de temperatura ΔT , calculando para cada elemento dE a capacidade térmica utilizando as equações 5.1 , 5.2 e a capacidade térmica do núcleo em função da temperatura, que foi determinada na calibração.

A dose de radiação absorvida pelo calorímetro é calculada pela equação 5.3 empregando a energia total depositada , E , calculada anteriormente e a massa do núcleo que é constante e igual a 63,762 g.

O sistema para a operação do calorímetro está localizado na sala de controle do acelerador de elétrons do IPEN e é formado pelo eletrômetro KEITHLEY 617 que, por sua vez, está ligado ao microcomputador por meio de uma interface IEEE 488.

O termistor localizado a 3,8 mm da superfície do núcleo, como calculado na secção 5.3.3, está ligado ao eletrômetro por meio de um cabo blindado de resistência compensada. O calorímetro atravessa o feixe de elétrons na câmara de irradiação sobre uma bandeja de alumínio que se desloca a uma velocidade constante igual a 3,36 m/min. A figura 5.25 mostra um diagrama esquemático do sistema para operação do calorímetro.

Para automatizar a operação do calorímetro foi desenvolvido o programa DOSIMETR, escrito na linguagem de programação "MS VisualBasic For DOS" versão 1.0, cuja listagem se encontra no apêndice 6.

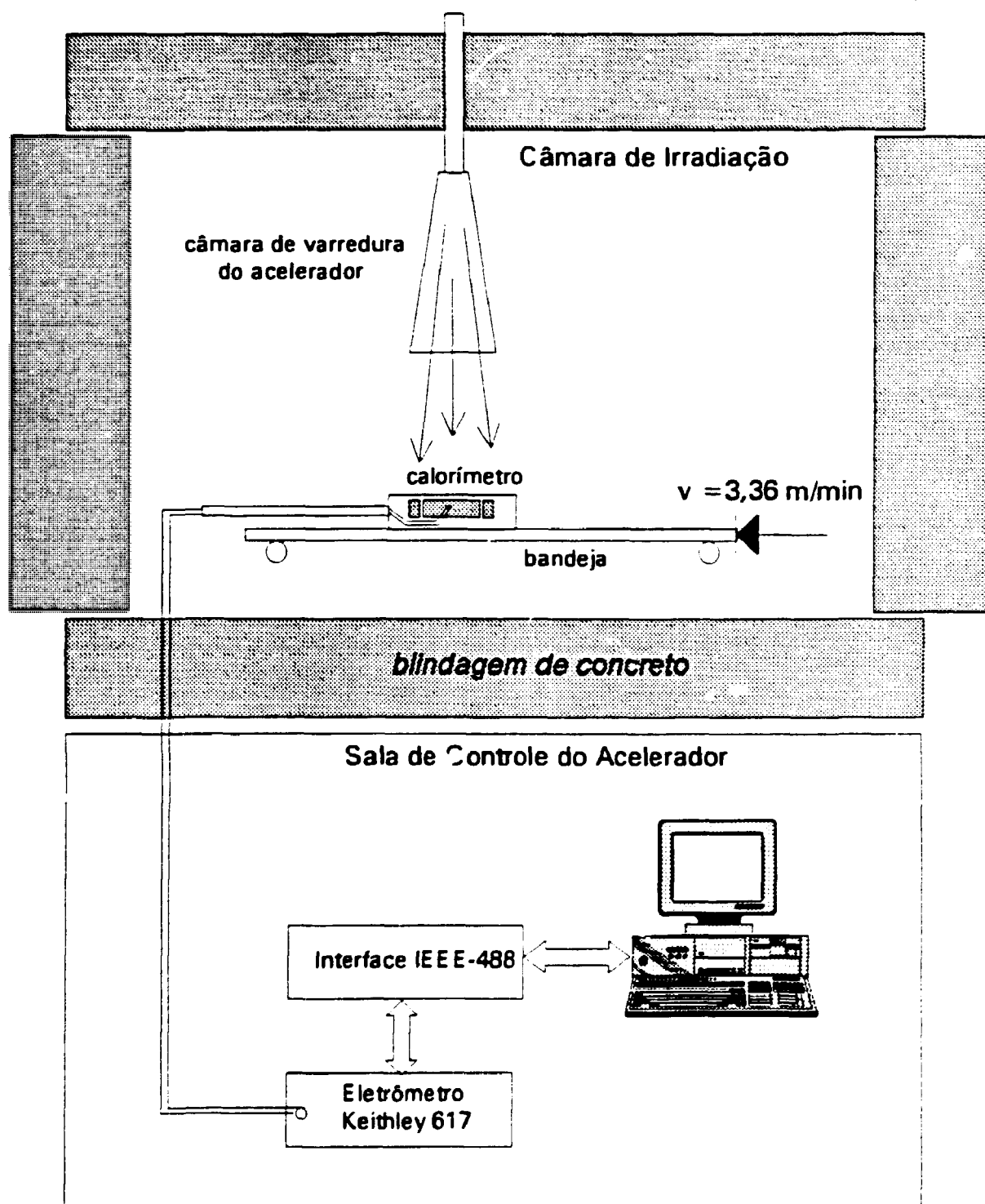


Figura 5.25 : Diagrama esquemático do sistema de operação do calorímetro.

O programa DOSIMETR executa a sequência de tarefas descritas a seguir:

- 1) Gera um quadro de diálogo para a entrada, pelo operador, via teclado, do nome do arquivo que contém as constantes da equação da capacidade térmica em função da temperatura determinadas com a correlação dos dados obtidos na calibração.
- 2) Gera os quadros de diálogo para entrada dos parâmetros de operação do acelerador (HVD, Energia, SCAN e Corrente do feixe) e do nome do arquivo onde serão gravados os resultados.
- 3) Gera a tela principal, mostrada na *figura 5.26*, com quadro de aviso ao operador para iniciar a monitoração em tempo real da temperatura do núcleo, por meio da subrotina *Le_temp*, que será mostrada na tela no quadro de temperatura inicial.
- 4) Gera um quadro de aviso ao operador para iniciar a irradiação do calorímetro, que é feita através de dois comandos, um na sala de controle para ligar o sistema de movimentação da bandeja e outro via teclado para iniciar o ciclo de determinação da dose absorvida.
- 5) Realiza, durante a passagem do calorímetro pelo feixe de elétrons, a aquisição em tempo real da temperatura que é apresentada no quadro de temperatura final, o gráfico da temperatura lida em função do tempo e armazena a temperatura lida na memória. Este ciclo é finalizado de forma automática após o registro do pico de temperatura máxima ou manualmente, via teclado, pelo operador.

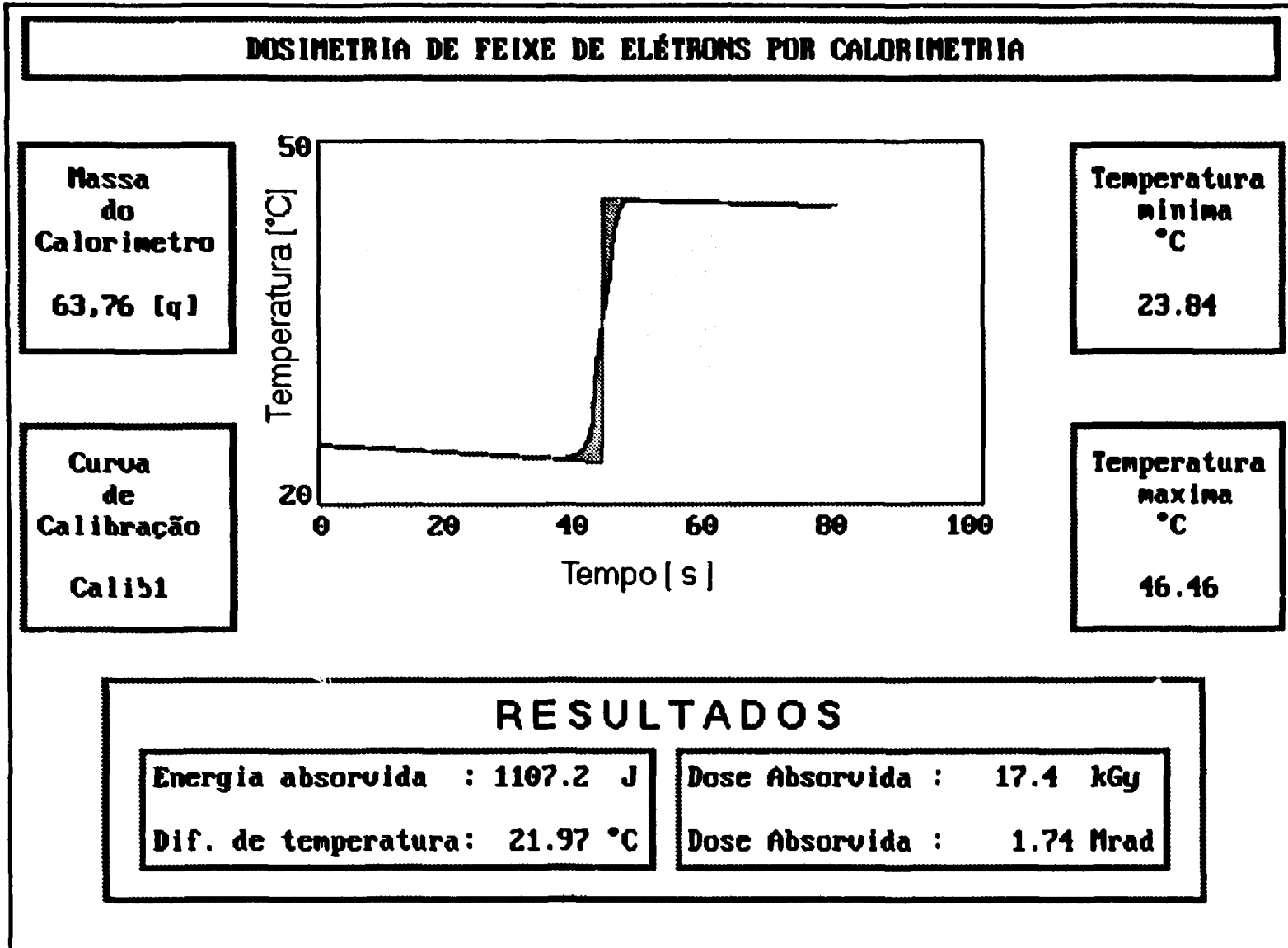


Figura 5.26 : Tela principal do subprograma DOSIMETR.

- 6) Após o término do ciclo anterior, o programa procura as temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) da memória e com estes dados calcula as temperaturas máxima extrapolada (T_{max}') e mínima extrapolada (T_{min}') para compensar a inércia térmica do termistor. As temperaturas T_{max}' e T_{min}' são mostradas no quadro de temperatura final e temperatura inicial respectivamente e graficadas sobre o gráfico da temperatura em função do tempo.

- 7) Calcula a energia total depositada no núcleo, E , como somatória de ΔE , usando como limites as temperaturas mínima e máxima extrapoladas. Cada elemento ΔE é calculado como o produto da capacidade térmica em função da temperatura multiplicado por ΔT . A capacidade térmica de cada elemento ΔE é calculada utilizando a temperatura T de ΔE e a equação da capacidade térmica do núcleo em função da temperatura determinada na calibração. O valor de ΔT é constante e igual a $0,01$ °C.

- 8) Calcula a dose de radiação absorvida utilizando a energia total E e a massa do núcleo. Após isso, mostra no quadro de resultados a energia absorvida [J], a diferença de temperatura [K], a dose absorvida [kGy] e também a dose absorvida em unidades especiais [Mrad].

- 9) Grava no disco rígido na forma de arquivo sequencial, nomeado inicialmente, todos os resultados calculados, os parâmetros de operação do acelerador e o conjunto das temperaturas armazenadas na memória.

- 10) Imprime os resultados na forma de relatório como mostra a *figura 5.26*.

- 11) Volta ao menu principal do programa DOFEC.

20/12/1993	DOSIMETRIA DE FEIXE DE ELÉTRONS POR CALORIMETRIA		10:02 h
MASSA DO CALORÍMETRO	:	63,762	g
CALOR ADICIONADO	:	1108,4	joule
DOSE ABSORVIDA	:	17,38	kGy
		1,74	Mrad
DOSE ESPEC. ABSORVIDA	:	0,273	kGy/g
HVD	:	109,3	uA
ENERGIA	:	1500	keV
SCAN	:	100	cm
CORRENTE DO FEIXE	:	15	mA
VELOCIDADE	:	3,36	m/min

Figura 5.26 : Relatório de resultados da dosimetria de feixe de elétrons com o calorímetro de grafite.

Os programas DOSIMETR e CALIBRA formam o programa DOFEC (Dosimetria de Feixe de Elétrons por Calorimetria) listado no apêndice 6, que é um gerenciador de menus e também interface gráfica para entrada de dados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO

O calorímetro desenvolvido foi calibrado segundo a metodologia descrita na seção 5.5 utilizando o programa CALIBRA . A calibração foi realizada no intervalo de temperatura de 293 a 325 K (20 a 52 °C).

Foram realizadas três séries de calibrações, onde para cada série foi determinada a capacidade térmica do núcleo do calorímetro a cada 1 K aproximadamente, totalizando 33 determinações por série. O calor adicionado ao núcleo pelo aquecimento do resistor elétrico foi de aproximadamente 10 J para cada determinação e o tempo de aquecimento de 1 s.

As 99 determinações de capacidade térmica das 3 séries de calibração foram incluídas em uma única correlação linear, apresentada no apêndice 7, com os seguintes resultados:

$$m = 0,1529999$$

$$b = 0,653936$$

$$\text{coef. correlação} = 0,998598$$

A equação da capacidade térmica do núcleo em função da temperatura, obtida da regressão linear dos dados de calibração, resultou em:

$$\text{Capacidade térmica [J/K]} = \text{Temperatura [K]} * 0,1529999 + 0,653936 \quad (6.1)$$

Na *figura 6.1* foram graficadas as três séries de calibrações juntamente com a reta da equação 6.1.

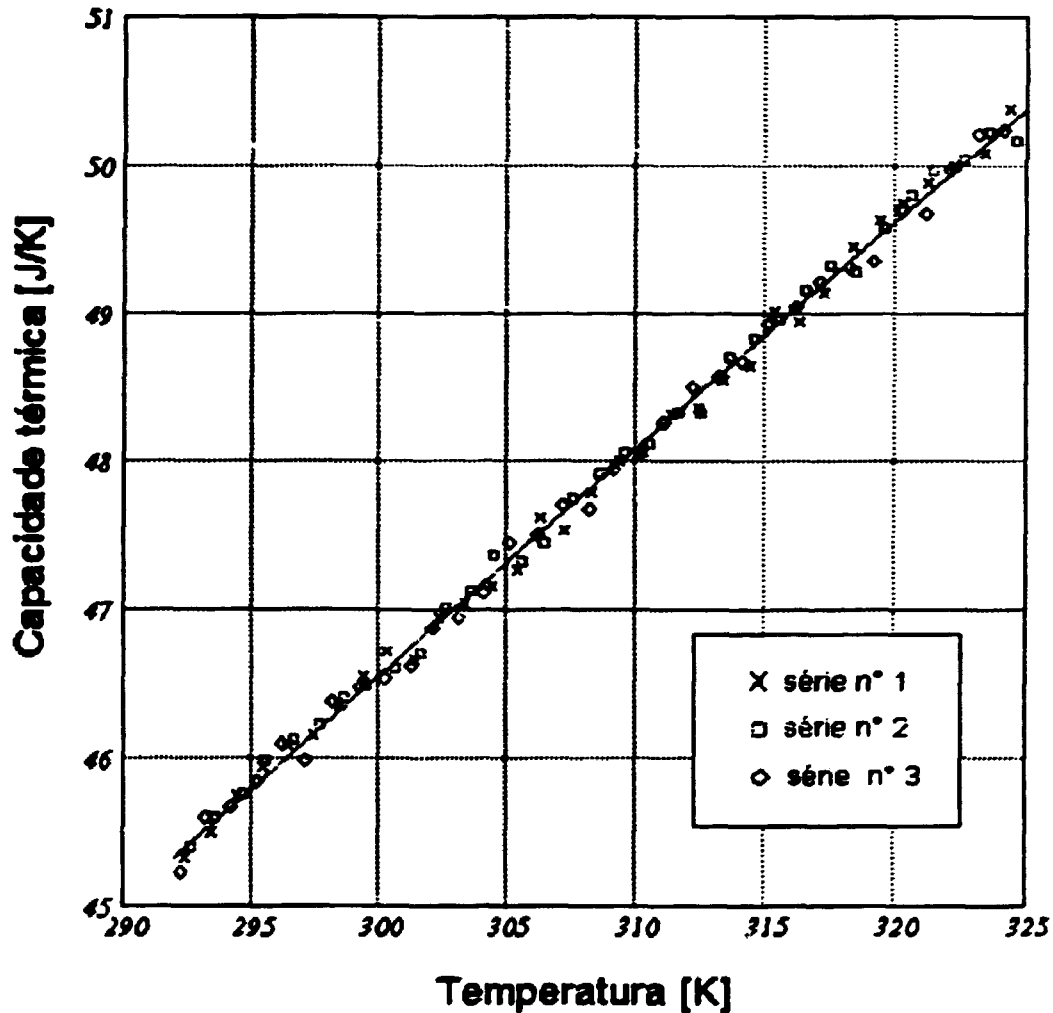


Figura 6.1 : Curva de calibração do calorímetro

A capacidade térmica do núcleo de grafite em função da temperatura, obtida na calibração, foi comparada com os valores obtidos por outros autores para diferentes calorímetros de grafite.

BURNS & MORRIS [3] obtiveram, no NPL, a seguinte expressão para a capacidade térmica do núcleo de grafite:

$$C_g = 644,2 + 2,86 T \quad (6.2)$$

onde, T é a temperatura [°C] e

C_g é o calor específico [J/kg K]

A empresa STACKPOLE [57,58], fabricante do grafite utilizado no núcleo do calorímetro (grafite grau 2020), fornece uma tabela de valores típicos de capacidade térmica do grafite em função da temperatura, obtendo-se a seguinte expressão:

$$C_t = 1,1036 + 0,1536 * T \quad (6.3)$$

onde, C_t é a capacidade térmica [J/K] e

T é a temperatura [K]

Na figura 6.2 foram graficadas as curvas de capacidade térmica do grafite em função da temperatura obtidas na calibração, por Burns & Morris e pela empresa Stackpole.

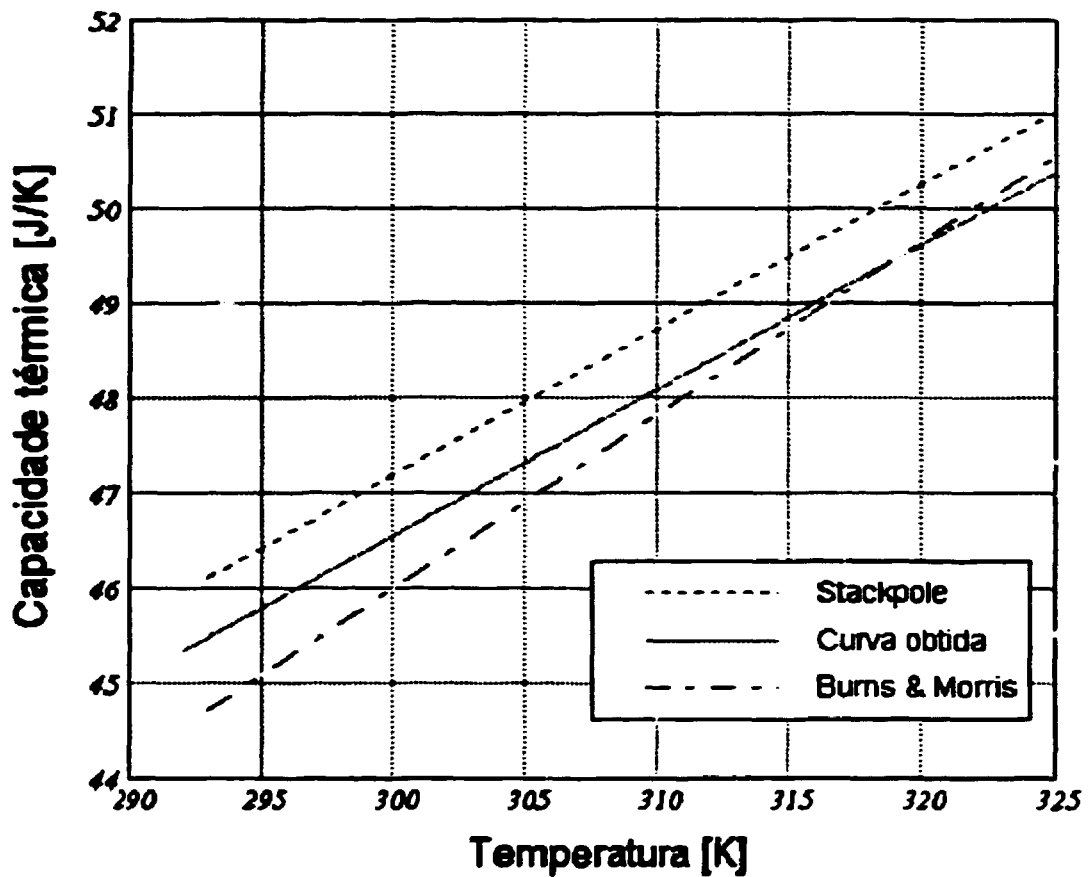


Figura 6.2 : Comparação das curvas de capacidade térmica do grafite utilizado no presente trabalho para a construção do núcleo do calorímetro.

A comparação da curva de capacidade térmica em função da temperatura obtida na calibração do calorímetro de grafite com as determinadas por outros autores valida a calibração realizada e a função da capacidade térmica obtida.

6.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ASSOCIADA À DETERMINAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA

A incerteza associada à determinação da dose absorvida no núcleo de grafite do calorímetro desenvolvido, entendida como uma indicação de quanto o melhor valor obtido da grandeza medida pode diferir do valor verdadeiro da grandeza, em termos de probabilidades [14,28,52,66], resulta da propagação dos erros das grandezas físicas medidas e utilizadas no cálculo da dose absorvida. As grandezas físicas utilizadas nesse cálculo são a variação de temperatura, Δt , no núcleo e a capacidade térmica.

O cálculo dos erros associados às grandezas físicas antes mencionadas foi realizado utilizando o programa AJUSPOL desenvolvido no CTA/IEAv em São José dos Campos, SP, Brasil. As incertezas percentuais obtidas para um nível de confiança de 95% (2σ) são mostradas na *tabela 6.1* e estão de acordo com as obtidas por outros autores [3,6,7,34].

Tabela 6.1: Incertezas na determinação da dose absorvida.

FONTE DA INCERTEZA	INCERTEZA \pm % (95% nível de confiança)
Sistemáticas :	
Calibração do termistor	0,6
Calibração da capacidade térmica do núcleo do calorímetro	1,6
Estatísticas :	
Desvio padrão de uma série de determinações consecutivas da dose absorvida	0,4
TOTAL :	1,8

6.3 UTILIZAÇÃO DO CALORÍMETRO NA DOSIMETRIA DE FEIXE DE ELÉTRONS

Para avaliar o funcionamento do sistema calorimétrico desenvolvido foi realizada uma série de medições no acelerador de elétrons do IPEN, para a determinação da dose absorvida no grafite em função da corrente do feixe de elétrons.

A operação do calorímetro foi realizada usando o programa DOSIMETR segundo o procedimento descrito na seção 5.6 e o esquema da *figura 5.25*.

Junto com o calorímetro foram irradiados dosímetros de CTA para comparação dos resultados. Para a leitura destes foi utilizado o procedimento descrito na seção 5.3.2.3 e a curva de calibração mostrada na *figura 5.10*.

A dose absorvida no grafite gerada pelo feixe de elétrons do acelerador foi também calculada em função dos parâmetros de operação do acelerador, para comparação com os outros resultados.

O cálculo da dose absorvida em função dos parâmetros de operação e o realizado pelo programa DOSIMETR são descritos no apêndice 8.

As condições de irradiação foram as seguintes:

Energia	:	1,5 MeV
Largura do feixe	:	7 cm
Comprimento do feixe (SCAN)	:	100 cm
Velocidade da bandeja de irradiação	:	3,36 m/min
Corrente do feixe de elétrons	:	2, 5, 6, 8, 10, 12 e 15 mA
Distância entre a janela do acelerador e o dosímetro	:	30 cm

Os resultados obtidos são mostrados na *figura 6.3* e na *tabela 6.2*.

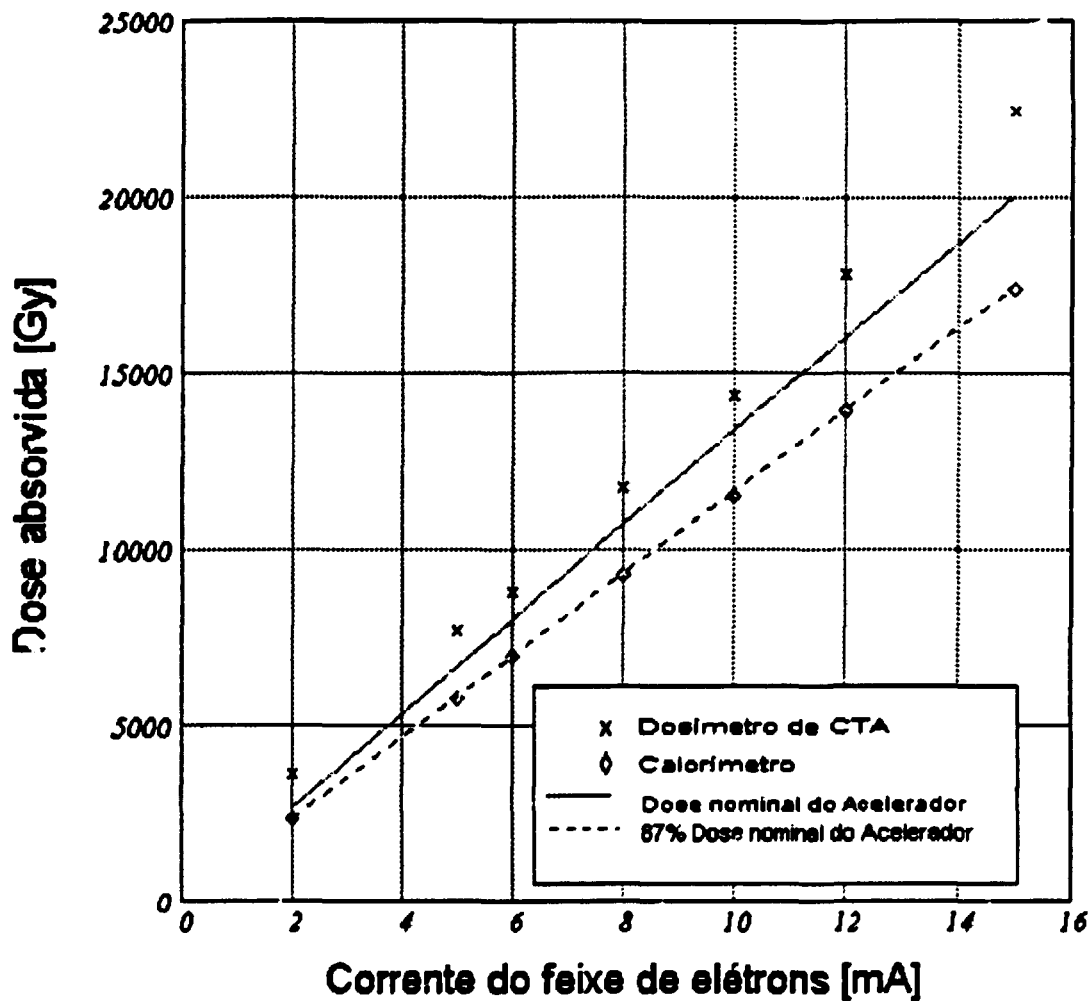


Figura 6.3 : Dose absorvida determinada pelo calorímetro, e pelo dosímetro de CTA e a calculada com os parâmetros de operação do acelerador .

Na figura 6.3 pode-se destacar as seguintes observações:

- a) O dosímetro de CTA foi calibrado contra a dose nominal fornecida pelo acelerador, calculada em função dos parâmetros operacionais, sem levar em conta a atenuação da janela de titânio do acelerador, a camada de ar interposta entre a saída do feixe de elétrons e o dosímetro e nem o retroespalhamento dos elétrons [61]. Portanto, a dose calculada com este dosímetro, embora superdimensionada, está em

estreita correlação com a curva da dose nominal fornecida pelo acelerador. O erro na determinação da dose absorvida com o dosímetro de CTA é 7 %.

b) A dose absorvida determinada pelo calorímetro é sistematicamente 87% do valor da dose absorvida no grafite calculada com os parâmetros de operação do acelerador.

A diferença, a menor, é explicada pelo elevado erro sistemático (10%) associado à metodologia de cálculo da dose absorvida baseada nos parâmetros operacionais do acelerador. Estes parâmetros dependem da resposta dos sistemas e componentes eletrônicos do acelerador, os quais, por causa da degradação ocasionada pelo envelhecimento, mudam as suas características de funcionamento.

Na *tabela 6.2* são fornecidos os valores encontrados nas diferentes determinações

Tabela 6.2 : Resultados comparativos de dose absorvida determinada por diferentes métodos .

<i>Dose determinada com o Calorímetro [kGy]</i>	<i>Dose determinada com o Dosímetro de CTA [kGy]</i>	<i>Dose calculada com os Parâmetros do Acelerador [kGy]</i>	<i>Corrente do feixe de elétrons [mA]</i>
2,34 ± 0,04	3,60 ± 0,25	2,67 ± 0,27	2
5,80 ± 0,10	7,70 ± 0,54	6,67 ± 0,67	5
6,99 ± 0,13	8,80 ± 0,62	8,01 ± 0,80	6
9,24 ± 0,17	11,70 ± 0,82	10,68 ± 1,1	8
11,48 ± 0,21	14,30 ± 1,0	13,34 ± 1,3	10
13,91 ± 0,25	17,80 ± 1,3	16,01 ± 1,6	12
17,39 ± 0,31	22,40 ± 1,6	20,01 ± 2,0	15

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

- 1) Os testes comparativos efetuados na determinação da dose absorvida mostraram que a medição realizada com o calorímetro apresenta uma elevada correlação com a reta correspondente a 87% da dose nominal calculada a partir dos parâmetros de operação do acelerador.

Por tanto, é válido concluir que a dose absorvida pelo grafite a 30 cm da janela do acelerador é 87% da dose absorvida calculada com os parâmetros de operação do acelerador.

- 2) A incerteza de 1,8% obtida na determinação da dose absorvida pelo núcleo de grafite está de acordo com os valores de incerteza reportados por diversos autores para a determinação de dose absorvida por calorimetria para aplicação em processos por radiação.

- 3) A utilização intensiva do microcomputador na automação de todas as etapas da calibração e da medição simplifica a operação do sistema calorimétrico, elimina a necessidade do operador efetuar qualquer cálculo, aumenta a precisão e a exatidão na determinação da dose absorvida.

Pelo exposto acima consideramos que o sistema calorimétrico desenvolvido no IPEN-CNEN/SP preenche todos os requisitos para aplicação em dosimetria de feixe de elétrons em processos por radiação, bem como a metodologia de automação pode ser aplicada a outros sistemas calorimétricos utilizados em diferentes áreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method for calibration of dosimeters against and adiabatic calorimeter for use in flash X-ray fields. 1983. (ASTM E 845-81). In: 1983 ANNUAL book of ASTM standards, section 12: Nuclear, solar and geothermal energy. v.12.02, p. 618-26.
- [2] BEWLEY, D. K. A simple calorimeter for the calibration of solid-state dosimeters. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* , 161: 94-8, 1969.
- [3] BURNS, D.T. ; MORRIS, W.T. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. A graphite calorimeter for electron beam dosimetry. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of the symposium on... held in Vienna* , 5-9 November,1990. Vienna, 1991. p.123.
- [4] CLELAND, M.R. ; MORGANSTERN, K.H. ; THOMPSON, C.C. *High power DC electron accelerators for industrial applications*. RDI,1979. (Technical Information Series, TIS 79-6). (Presented at the 3rd All-Union conference on applied accelerators , held in Leningrad, 26-28 June, 1979).
- [5] DeWILTON, M.S. High power, high reliability electron accelerators for industrial processing. *Radiat. Phys. Chem.* , 25(4-6): 643-6 52, 1985.

-
- [6] DOMEN, S.R. Advances in calorimetry for radiation dosimetry. In: KASE, K.R. ; BJÄRNGARD, B.E. ; ATTIX, F.H. eds. *The Dosimetry of Ionizing Radiation*. New York, N.Y., Academic, 1987. v.2 , p. 245- 320.
- [7] DuSAUTOY, A.R. *The UK primary standard calorimeter for absorbed dose measurement*. Teddington, United Kingdom. National Phys. Lab., Nov. 1991. (RSA -EXT- 25).
- [8] DUTREIX, A. & BRIDIER, A. Dosimetry for external beams of photon and electron radiation. In: KASE, K.K.; BJARNGARD, B.E.; ATTIX, F.H. eds. *The dosimetry of ionizing radiation*. New York, N.Y., Academic, 1985. v.1, p.163-228.
- [9] FARRAR, H. Efforts to obtain international consensus on dosimetry standards for radiation processing. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing. proceedings of the symposium on... held in Vienna , 5-9 November, 1990*. Vienna, 1991. p.29.
- [10] FIELDEN, E.M. & HOLM, N.W. *Dosimetry in accelerator research and processing*. In: HOLM, N.W. ; BERRY, J.R. eds. *Manual on Radiation Dosimetry*, New York, Marcel Dekker, 1970. p261-309.

-
- [11] FUOCHI, P.G.; CHIRCO, P.; PORTESINE, M.; FASCE, F. ; KOVACS, A
Dose evaluation in electron beam processing of power semiconductor devices. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 5-9 November, 1990.* Vienna, 1991. p.83-92.
- [12] GENERALOVA, V.V. ; GURSKII, M.N. ; PIKAEV, A.K. *Dosimetry in radiation processing. Radiat. Phys. Chem. , 25(4-6): 719-28 , 1985.*
- [13] GENERALOVA, V.V. The state and development of high dose dosimetry in the USSR . In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of the symposium on... held in Viena, 5-9 November,1990. Viena,1991. p.225.*
- [14] GERALDO, L.P. & SMITH, D. *Least square methods and covariance matrix applied to the relative efficiency calibration of a Ge(Li) detector.* São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Jan.1989. (Publicação IPEN 243).
- [15] GREENING, J.R. Fundamentals of radiation dosimetry. In: KASEK.R; BJÄRNGARD, B.E. ; ATTIX, F.H. eds, *The dosimetry of ionization radiation dosimetry.* New York , Academic, 1987. v. 2 , p. 245-319.
- [16] HOLM, N.W. Dosimetry in industrial processing. In: ATTIX, .H.; TOCHILIN, E. eds. *Radiation dosimetry.* New York, N.Y., Academic, 1985. v.1, p. 163-228.

-
- [17] HOLMAN, J. P. *Transferência de calor*. São Paulo, McGraw-Hill, 1983.
- [18] HUMPHREYS J.C. & MCLAUGHLIN W. L. Calorimetry of electron beams and the calibration of dosimeters at high doses. *Radiat. Phys. Chem.*, 35(4-6): 744-9, 1990.
- [19] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Electrons with initial energies between 1 and 50 MeV*. 1974. (ICRU-21).
- [20] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation Dosimetry: Electron beams with energies between 1 and 50 MeV*. Sept., 1984. (ICRU-35).
- [21] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation Dosimetry Stopping Powers for Electrons and Positrons*. Oct., 1984. (ICRU-37).
- [22] JANOVSKY, I. & MILLER, A. A calorimeter for measuring energy deposition in materials and calibrating the response of dosimeters irradiated by low-energy industrial electron accelerators. *Appl. Radiat. Isot.*, 38: 931, 1987.
- [23] JANOVSKY, I. Dosimetry methods applied to irradiation with Tesla-4 MeV linear electron accelerators. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 8-12 October, 1984*. Vienna, 1985. p. 307- 16.

-
- [24] KOBETICH, E.J.; KATZ, R. Energy deposition by electron beams and gamma rays. *Phys. Rev.*, 170 (1): 391-6, 1968.
- [25] KOVÁČZ, A.; MEHTA, K.K.; MILLER, A. Characterization of linear electron accelerators using reference and routine dosimetry methods. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 5-9 November, 1990*. Vienna, 1991. p. 371-84.
- [26] KUNTZ, F. ; MARCHIONI, A. ; STRASSER, A. Homogeneisation de la dose déposée dans un produit ionisé aux électrons accélérés. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High Dose Dosimetry for Radiation Processing: Proceedings of the symposium on ... held in Vienna, 5-9 November, 1990*. Vienna, 1991. p.479.
- [27] MARMIER, P. & SHELDON, E. *Physics of nuclei and particles*. New York, 1969. p. 155-198.
- [28] MASON, R.L.; GUNST, R.F.; HESS, J.L. *Statistical design and analysis of experiments*. New York, John Wiley & Sons, 1989.
- [29] McDONALD, J.C. ; LAUGHLIN, J.S. ; FREEMAN, R.E. Portable tissue equivalent calorimeter. *Med. Phys*, 3: 80-85 , 1976.
- [30] McEWEN, M.E. *The electron-beam water calorimeter project at the National Physical Laboratory*. Teddington, United Kingdom, *National Phys. Lab.*, Feb., 1992 . (RSA-EXT-30)

- [31] McINTYRE, R. & HUNTZIGER, C.J. Applications of EGS4 to industrial irradiator design and use. *Radiat. Phys. Chem.* 35(4-6): 762-6 , 1990.
- [32] McLAUGHLIN, W.L. ; MILLER, A. ; ADBEL-RAHIM, F. ; PREISINGER, T. Plastic film materials for dosimetry of very large absorbed doses. *Radiat. Phys. Chem.* , 25(4-6): 729-48 ,1985.
- [33] McLAUGHLIN, W.L. ; BOYD, A.W. ; CHADWICK, K.H. ; McDONALD, J.C. ; MILLER, A. *Dosimetry for Radiation Processing* . London, Taylor & Francis, 1989.
- [34] McLAUGHLIN, W.L. Standardization of high-dose measurement of electron and gamma ray absorbed doses and dose rates. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 8-12 October, 1984.* Vienna, 1985. p. 357-71.
- [35] McLAUGHLIN, W.L. Novel radiation dosimetry systems. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of the symposium on... held in Vienna, 5-9 November, 1990.* Vienna,1991. p.3 .
- [36] McLAUGHLIN, W.L. New dosimetry systems. *Radiat. Phys. Chem.* , 35 (94-6): 693-8, 1990.
- [37] MICROSOFT. *Visual basic programmer's guide*, Redmond, U.S.A., 1992.
- [38] MICROSOFT. *Visual basic professional features*, Redmond, U.S.A.,1992.

-
- [39] MICROSOFT. *Visual basic reference*, Redmond, U.S.A., 1992.
- [40] MILLER, A. ; KOVACS, A.. Calorimetry at industrial electron accelerators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*(10-11), 994-7, 1985.
- [41] MILLER, A. Status of electron and gamma ray dosimetry. *Radiat. Phys. Chem.* , 25(4-6): 777-8, 1985.
- [42] MILLER, A.; KOVACS, A.. Calibration and routine dosimetry for industrial electron irradiation. In: *Radioisotope Appl. and Rad. Processing in Industry: proceedings of the 4th Conf. on... held in Leipzig* ,1988.
- [43] MILLER, A. ; KOVACS, A. Application of Calorimeters for Routine and Reference Dosimetry at 4-10 MeV Industrial Electron Accelerators. *Radiat. Phys. Chem.* , 35(4-6): 774-8, 1990.
- [44] MILVY, P. ; GENNA, S. ; BARR, N.F. ; LAUGHLIN, J.S. Calorimetric determination of local absorbed dose. In: UNITED NATIONS. *Peaceful uses of atomic energy: proceedings of the 2nd international conference on ... held in Geneva, 1-13 September, 1958.* p.142.
- [45] NAM, J. W. High-dose standadization and dose assurance. *Radiat. Phys. Chem.* , 34(3): 399-401, 1989.
- [46] NELSON, W.R.; HIRAYAMA, H.; ROGERS, W.O. *The EGS4 code system*. Stanford , U.S.A., Stanford Linear Accelerator Center, Dec. 1985. (SLAC-R-265).

-
- [47] LAIZIER, J. Techniques utilisées au centre d'applications et promotion des rayonnements ionisants par la dosimétrie des irradiation gamma et sous faisceaux d'électrons. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Standardization and high-dose intercomparison for industrial radiation processing: proceeding of an IAEA advisory group meeting on... held in Vienna, 25-29 September, 1978.* Vienna, 1981. p 57-68. (Technical Report Series, 205).
- [48] LAUGHLIN, J.S. & GENNA S. Calorimetry. In: ATTIX, F.H. ; ROESCH, W.C. eds. *Radiation Dosimetry.* New York, Academic, 1966. v.2, p. 389-441.
- [49] LAUGHLIN, I. S. Electron beams. In: ATTIX, F.H.; TOCHILIN, E. eds. *Radiation dosimetry.* New York, N.Y., Academic, 1969. v.3, p. 91-149.
- [50] OWEN, B. & DuSAUTOY, A.R. *Absorvel dose graphite calorimeter correction for the effect of the gaps around the core.* Teddington, United Kingdom, National Phys. Lab., Apr. 1990. (RSA -EXT- 12).
- [51] PATTERSON, H.W. ; THOMAS, R.H. *Accelerator health physics.* New York, Academic , 1973. p. 3-23.
- [52] PARRAT, L.G. *Probability and experimental errors in science.* New York, John Wiley & Sons, 1961.

-
- [53] RADAK, B. & MARKOVIC, V. Calorimetry. In: HOLM, N.W. ; BERRY, J.R. eds. *Manual on Radiation Dosimetry*. New York, Marcel Dekker, 1970. p. 45-81.
- [54] ROGERS, D.W.O. & BIELAJEW, A.F. Monte carlo techniques of electron and photon transport for radiation dosimetry. In: KASE, K.R. ; BJÄRNGARD, B.E. ; ATTIX, F.H eds. *The dosimetry of ionizing radiation dosimetry*. New York, Academic, 1987. v. 3, p. 427-539.
- [55] SCHUMACHER, B.W. A review of the (macroscopic) laws for the electron penetration through matter. In: BAKISH, R. ed.. *Electron and ion beam science and technology*. New York, , John Wiley & Sons, 1965. p.5-70.
- [56] SIDNEY, L.N. ; LYNCH, D.C. ; WILLET, P.S. A new radiochromic dosimeter film. *Radiat. Phys. Chem.*, 35(4-6): 779-82 ,1990.
- [57] STACKPOLE. *Carbon graphite properties*. Pennsylvania,U.S.A.
- [58] STACKPOLE. *Graphite grade 2020*. Pennsylvania, U.S.A.
- [59] STOKER I. ; DuSAUTOY A.R. *The measuring assembly for the NPL primary standard absorbed dose graphite calorimeter at therapy levels*. Teddington, United Kingdon, National Phys. Lab. Dec., 1991. (RSA- EXT-23).
- [60] TABATA, T. & ITO, R. A generalized empirical equation for the transmission coefficient of electrons. *Nucl. Instrum. Methods*, 127: 429- 44 , 1975.

-
- [61] TABATA, T.; ITO, R.; OKABE, S. An empirical equation for the backscattering coefficient of electrons. *Nucl. Instrum. Methods*, 94: 509-13, 1971.
- [62] TANAKA, R. ; SUNAGA, H. ; AGEMATSU, T. Methods for measuring dose and beam profiles of processing electron accelerators. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry: proceedings of the symposium on...* , held in Vienna, 8-12 October, 1984. Vienna, 1985. p. 317-31.
- [63] TANAKA, R. ; SUNAGA, H. ; KOJIMA, T. A simultaneous electron energy and dosimeter calibration method for an electron beam irradiator. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry for radiation processing: proceedings of the symposium on... held in Vienna, 5-9 November, 1990. Vienna, 1991. p. 189.*
- [64] TSOULFANIDIS, N. *Measurement and detection of radiation*. New York, Hemisphere, 1983.
- [65] VIDAL, P.E. Dosimétrie et exploitation d'installations d'irradiation. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *High dose dosimetry: proceedings of an international symposium on... held in Vienna, 8-12 October, 1984. Vienna, 1985. p. 3-21.*
- [66] VUOLO, J.H. *Fundamentos da teoria dos erros*. São Paulo, Edgard Blücher, 1992.

- [67] WILLIS, C. ; BOYD, A.W. ; MILLER, O.A. The absolute dosimetry of a high intensity 600 keV pulsed electron accelerator used for radiation chemistry studies of gaseous samples. *Radiat. Research* , 46: 428-31, 1971.

APÊNDICE 1

Listagem do programa VARTEMP.

Linguagem: Microsoft VISUAL BASIC for DOS.

```
DECLARE SUB grafica2 ()
DECLARE SUB grafica ()
DECLARE SUB fundo ()
DIM SHARED c(13), t1(76), t2(76), t3(76)

SUB Command1_Click ()
    screen.HIDE
    CALL grafica
    SCREEN 0
    WIDTH 80
    screen.SHOW
END SUB

SUB Command2_Click ()
    mensagem$ = "  Está seguro ?"
    titulo$ = "ATENÇÃO"
    resposta% = MSGBOX(mensagem$, 1, titulo$)
    IF resposta% = 1 THEN
        screen.HIDE
        SCREEN 0
        CLS
        END
    END IF
END SUB
```

SUB Command3_Click ()

screen.HIDE

CALL grafica2

SCREEN 0

WIDTH 80

screen.SHOW

END SUB

SUB Form_Click ()

BEEP

BEEP

END SUB

SUB Form_Load ()

CALL fundo

screen.controlpanel(1) = 7

screen.controlpanel(7) = 0

screen.controlpanel(2) = 1

screen.controlpanel(4) = 14

screen.controlpanel(17) = 14

Top = (screen.Height - Height) \ 2

Left = (screen.Width - Width) \ 2

screen.SHOW

END SUB

SUB Timer1_Timer ()

label1.caption = TIME\$

label2.caption = DATE\$

END SUB

```

DECLARE SUB grafica ()
DIM SHARED c(13), t1(76), t2(76), t3(76)

```

```

SUB fundo ()
    screen.HIDE
    COLOR 0, 1
    FOR n = 1 TO 25
        LOCATE n, 1
        PRINT " Ipen CNEN Ipen CNEN Ipen CNEN Ipen
                CNEN Ipen CNEN Ipen ";
    NEXT
END SUB

```

```

SUB grafica ()
    n = 42
    FOR i = 0 TO 75
        t1(i) = 0
        t2(i) = 0
    NEXT i

    OPEN "edmult.arq" FOR INPUT AS #1
    FOR i = 1 TO n
        INPUT #1, a, B, c
        t1(i) = B
    NEXT
    CLOSE #1

```

```

t1(0) = t1(1)
t1(75) = t1(74)

```

```

CLS
COLOR 12
LOCATE 12, 20
INPUT "entre o % do delta T desejado : ", deltacorte

```

```

CLS

```

SCREEN 12

LINE (148, 50)-(520, 400), 1, B

```

FOR i = 1 TO 74
  x = 146 + i * 5
  y = 390 - 350 / 3 * t1(i)
  COLOR 14
  PSET (x, y)
  t3(i) = t1(i)
NEXT i

```

DO

j = j + 1

```

FOR i = 1 TO 74
  t2(i) = (t1(i - 1) + t1(i + 1)) / 2
NEXT i

```

t2(0) = t2(1)
t2(75) = t2(74)

```

FOR i = 0 TO 75
  t1(i) = t2(i)
NEXT i

```

```

FOR i = 1 TO 74
  x = 146 + i * 5
  y = 390 - 350 / 3 * t1(i)
  COLOR 14
  PSET (x, y)
NEXT i

```

```

COLOR 12
LOCATE 12, 40
tempo = j * .000184833#
PRINT USING "##.###"; tempo;
PRINT " s"
LOCATE 27, 13

```

```

PRINT USING "##.###"; t1(0)
LOCATE 27, 66
PRINT USING "##.###"; t1(75)
LOCATE 27, 40
delta = (ABS(t1(0) - t1(75))) / t1(0) * 100
PRINT USING "###.###"; delta

```

LOOP WHILE delta > deltacorte

```

COLOR 11
FOR i = 1 TO 73
  x1 = 146 + i * 5
  y1 = 390 - 350 / 3 * t3(i)
  x2 = 146 + (i + 1) * 5
  y2 = 390 - 350 / 3 * t3(i + 1)
  LINE (x1, y1)-(x2, y2)
NEXT i

```

COLOR 15

```

FOR i = 1 TO 73
  x1 = 146 + i * 5
  y1 = 390 - 350 / 3 * t1(i)
  x2 = 146 + (i + 1) * 5
  y2 = 390 - 350 / 3 * t1(i + 1)
  LINE (x1, y1)-(x2, y2)
NEXT i

```

COLOR 12

```

LOCATE 29, 29
PRINT " aperte uma tecla para sair ";

```

```

DO
LOOP WHILE INKEY$ = ""

```

END SUB

```
DECLARE SUB grafica2 ()  
DIM SHARED c(13), t1(76), t2(76), t3(76)
```

```
SUB grafica2 ()
```

```
    a$ = "d20 h3 f3 e3"  
    SCREEN 12
```

```
        FOR n = 125 TO 280 STEP 30  
            PSET (n, 10), 9  
            DRAW a$  
        NEXT
```

```
    PALETTE 15, 277564  
    PALETTE 14, 273468  
    PALETTE 6, 268348  
    PALETTE 12, 264511  
    PALETTE 4, 1442876  
    PALETTE 10, 2884668  
    PALETTE 2, 3933244  
    PALETTE 11, 3933219  
    PALETTE 9, 3933196  
    PALETTE 5, 3277828  
    PALETTE 1, 2098180  
    PALETTE 8, 984068  
    PALETTE 3, 986895
```

```
    LINE (10, 55)-(50, 75), 15, BF  
    LINE (10, 75)-(50, 95), 14, BF  
    LINE (10, 95)-(50, 115), 6, BF  
    LINE (10, 115)-(50, 135), 12, BF  
    LINE (10, 135)-(50, 155), 4, BF  
    LINE (10, 155)-(50, 175), 10, BF  
    LINE (10, 175)-(50, 195), 2, BF  
    LINE (10, 195)-(50, 215), 11, BF  
    LINE (10, 215)-(50, 235), 9, BF  
    LINE (10, 235)-(50, 255), 5, BF
```

LINE (10, 255)-(50, 275), 1, BF
 LINE (10, 275)-(50, 295), 8, BF
 LINE (9, 54)-(51, 316), 1, B

c(12) = 15
 c(11) = 14
 c(10) = 6
 c(9) = 12
 c(8) = 4
 c(7) = 10
 c(6) = 2
 c(5) = 11
 c(4) = 9
 c(3) = 5
 c(2) = 1
 c(1) = 8
 c(0) = 0

n = 42

FOR i = 0 TO 75
 t1(i) = 0
 t2(i) = 0
NEXT i

OPEN "edmult.arq" FOR INPUT AS #1

 FOR i = 1 TO n
 INPUT #1, a, B, c
 t1(i) = B
 NEXT

CLOSE #1

t1(0) = t1(1)
 t1(74) = t1(75)

LINE (100, 40)-(300, 411), 3, B

LINE (350, 40)-(550, 411), 3, B

COLOR 9

LINE (325, 40)-(325, 411)

FOR k = 40 TO 411 STEP 37

LINE (323, k)-(327, k)

NEXT k

LOCATE 3, 43

PRINT "0"

LOCATE 26, 42

PRINT "10"

FOR i = 1 TO 74

y1 = 36 + i * 5

y2 = y1 + 4

n = INT(t1(i) / .22)

LINE (101, y1)-(299, y2), c(n), B

PAINT (200, y1 + 1), c(n)

NEXT i

COLOR 12

LOCATE 28, 20

INPUT "entre o % do delta T desejado : ", deltacorte

LOCATE 28, 20

PRINT SPACE\$(50)

DO

j = j + 1

FOR i = 1 TO 74

t2(i) = (t1(i - 1) + t1(i + 1)) / 2

NEXT i

t2(0) = t2(1)

t2(75) = t2(74)

FOR i = 0 TO 75

t1(i) = t2(i)

NEXT i

FOR i = 1 TO 74

y1 = 36 + i * 5

y2 = y1 + 4

n = INT(t1(i) / .22)

LINE (351, y1)-(549, y2), c(n), B

PAINT (500, y1 + 1), c(n)

NEXT i

COLOR 6

LOCATE 2, 52

tempo = j * .000184833#

PRINT USING "##.###"; tempo;

PRINT " s"

LOCATE 3, 70

PRINT USING "#.###"; t1(0)

LOCATE 26, 70

PRINT USING "#.###"; t1(75)

LOCATE 14, 71

delta = (ABS(t1(0) - t1(75))) / t1(0) * 100

PRINT USING "###.###"; delta

LOOP WHILE delta > deltacorte

COLOR 12

LOCATE 28, 20

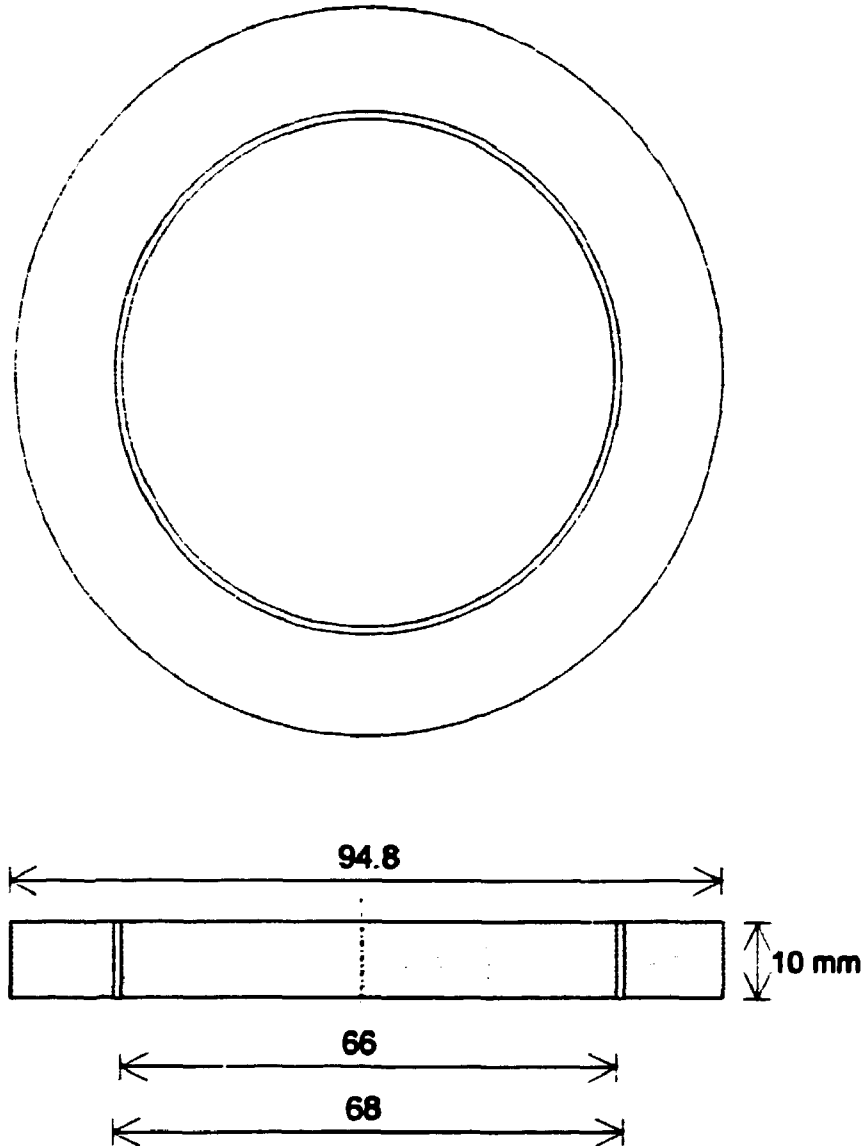
PRINT " aperte uma tecla para terminar "

DO

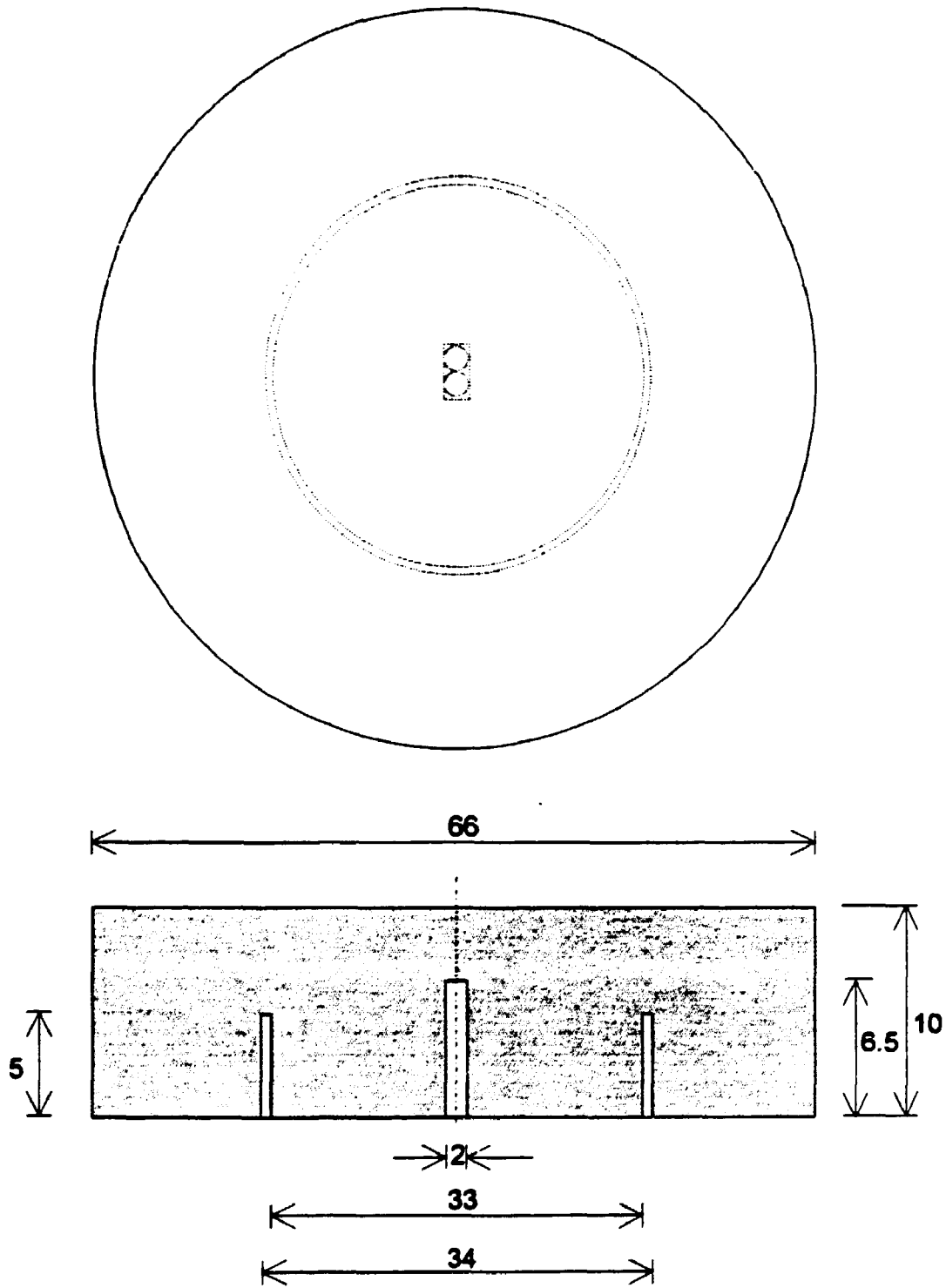
LOOP WHILE INKEY\$ = ""

END SUB

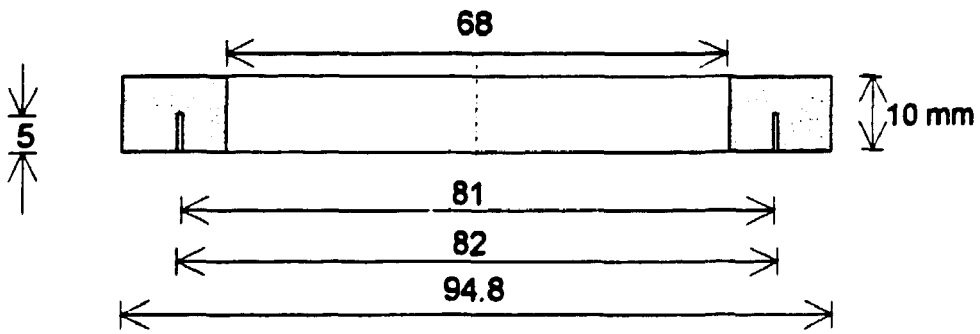
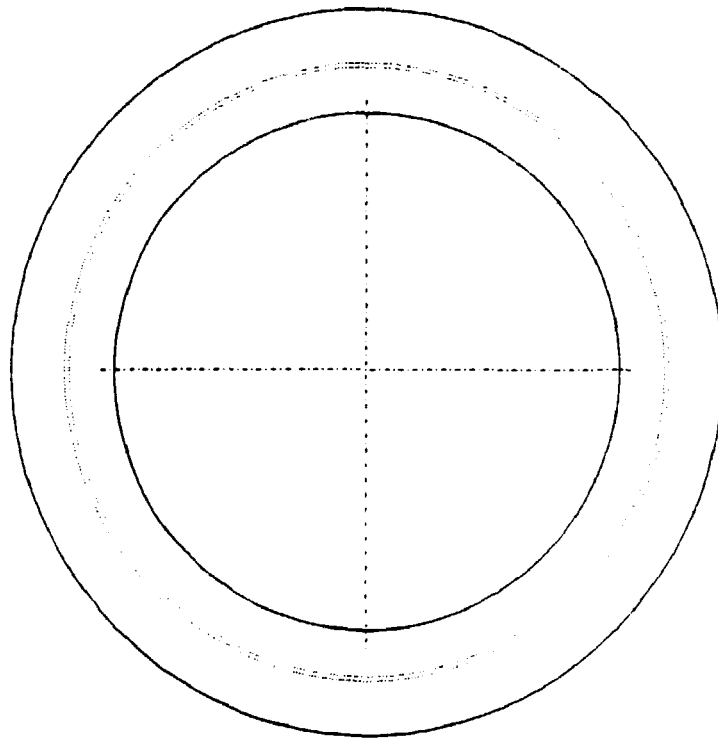
APÊNDICE 2



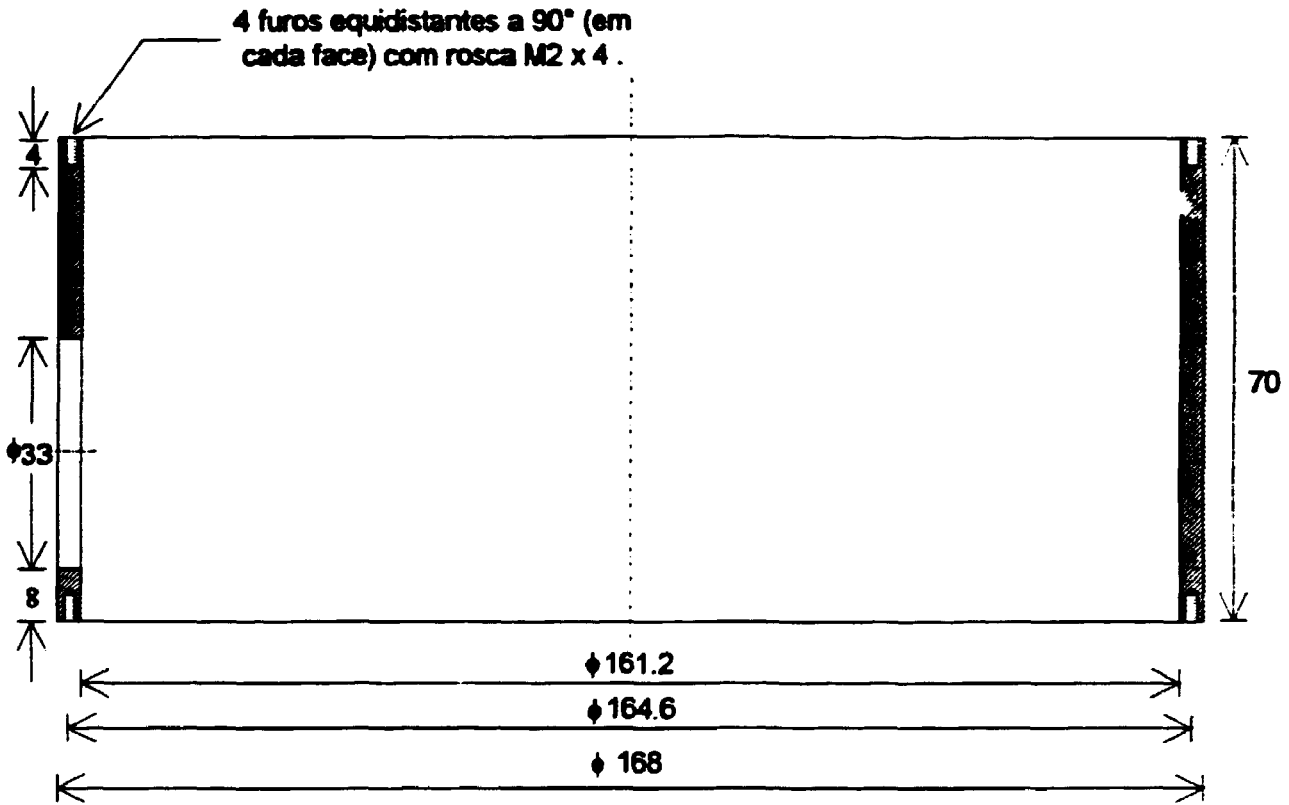
FEU - CEN/EP - PROJETO CALORÍMETRO PARA DOSIMETRIA DE FEIXES DE ELÉTRONS	
Calorímetro de grafite Vista geral	
Material : Grafite 2020	N° de peças : 4
Escala : 1:1	Data : 22/03/93
Projeto : Homero E. B. Pérez	Obs. :



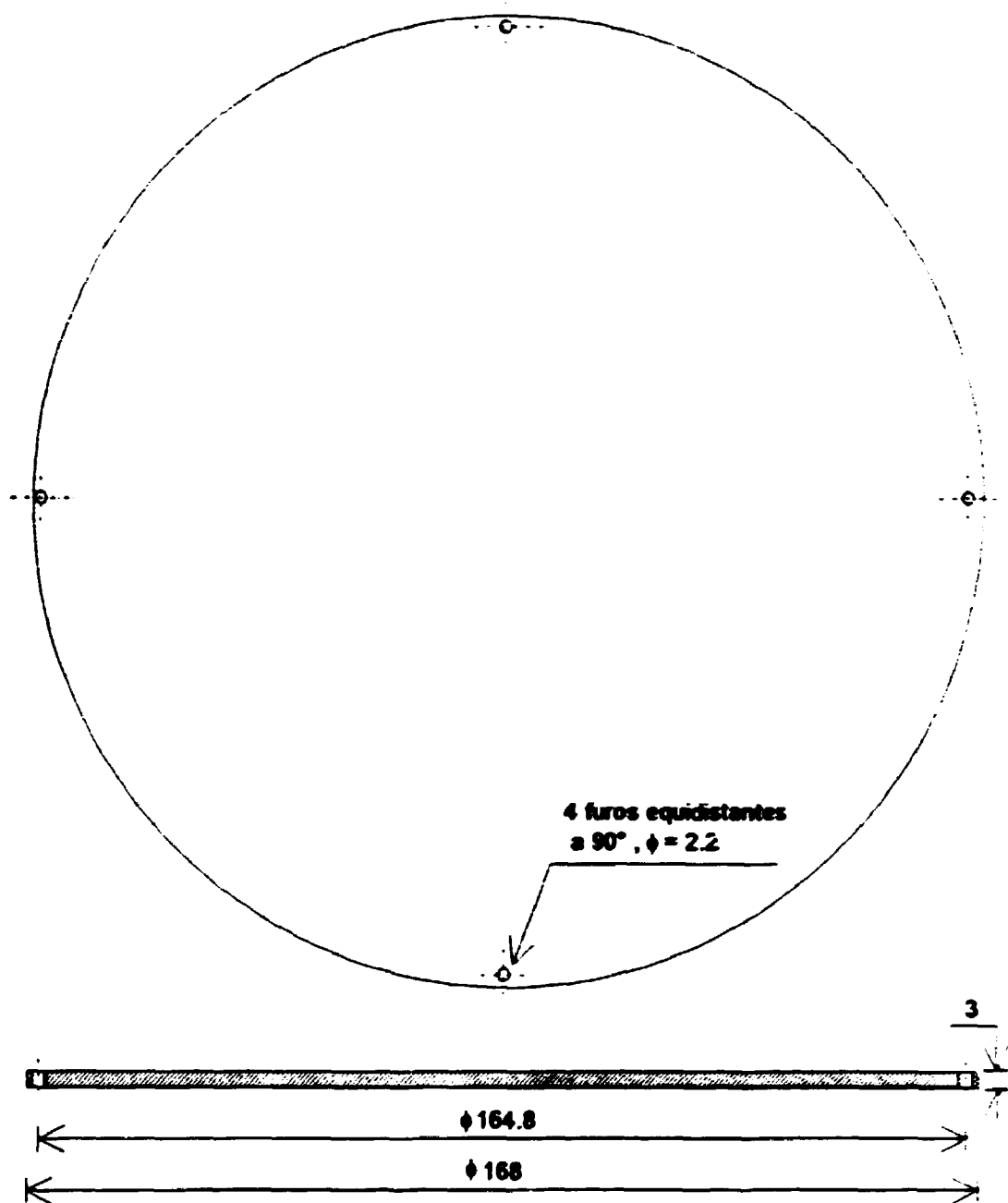
IPEN - CEN/EP - PROJETO CALORÍMETRO PARA DOSIMETRIA DE FEIXES DE ELÉTRONS	
Núcleo	
Material : Grafite 2020	N° de peças : 4
Escala : 2:1	Data : 22/03/93
Projeto : Homero E. B. Pérez	Obs. :



DPS - CEM/MP - PROJETO CALORÍMETRO PARA DOSIMETRIA DE FÍXIS DE ELÉTRONS	
ANEL	
Material : Grafite 2020	N° de peças : 4
Escala : 1:1	Data : 22/03/93
Projeto : Homero E. B. Pérez	Obs. :

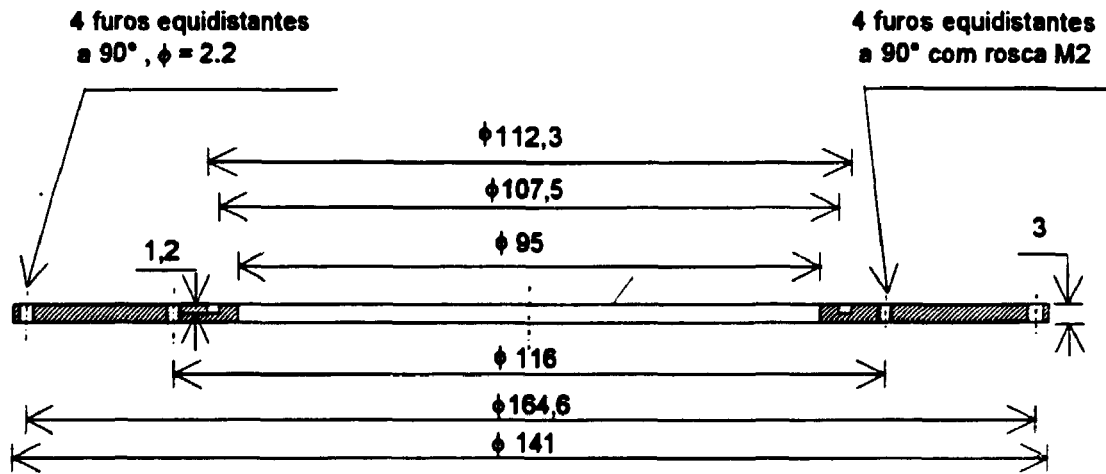


IPEN - CIBR/89 - PROJETO CALORÍMETRO PARA DENSÍMETRIA DE FEIXES DE ELÉTRONS	
Corpo	
Material : Aço inox ANSI 304	N° de peças : 4
Escala : fora de escala	Data : 26/04/93
Projeto : Homero E. B. Pérez	Obs. :

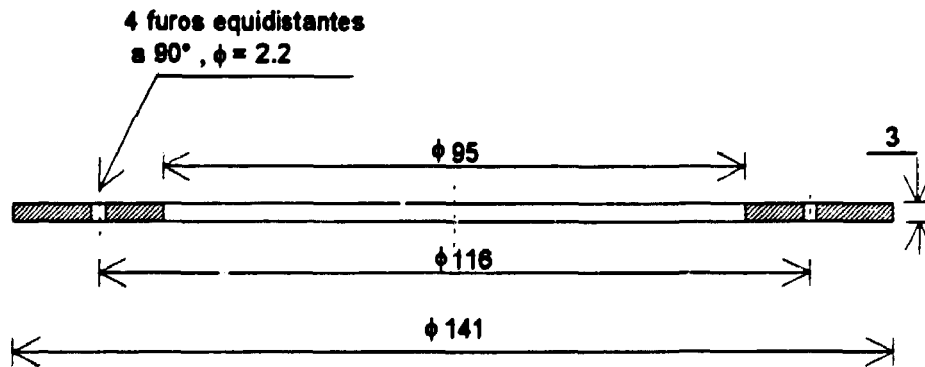


PROJ - CENPRO - PROJETO CALORÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DE FUSÃO DE ELÉTRONS	
Tampa Inferior	
Material : Aço inox ANSI 304	Nº de peças : 4
Escala : fora de escala	Data : 26/04/93
Projeto : Homero E. B. Pérez	Obs. :

Tampa intermediária



Tampa superior



IPEN - CENEP/SP - PROJETO CALORÍMETRO PARA DORMITÓRIA DE FEIXES DE ELÉTRONS

Tampa Intermediária e Superior

Material : Aço Inox ANSI 304

N° de peças : 4

Escala : fora de escala

Data : 26/04/93

Projeto : Homero E. B. Pérez

Obs. :

APÊNDICE 3

Listagem do programa CALTERM

Linguagem: Microsoft Quick BASIC , versão 4.5

' CALIBRAÇÃO DE TERMISTORES

INICIALIZA.GPIB:

IBSTA% = 0

IBCNT% = 0

IBERR% = 0

CALL IBINIT(IBSTA%, IBERR%, IBCNT%)

V% = 1

bd% = 0

disp1% = 24838 'Endereço Keithley 619, canal 1 - Termistor 1

disp2% = 25094 'Endereço Keithley 619 , canal 2 - Termistor 2

disp3% = 30 'Endereço Keithley 617 , termómetro Ni-100

CALL IBTMO(bd%, V%)

CALL IBSIC(bd%)

CALL IBSRE(bd%, V%)

WR\$ = "F2X"

CALL IBESC(bd%, disp1%, WR\$)

WR\$ = "F2X"

CALL IBESC(bd%, disp1%, WR\$)

WR\$ = "R0X"

CALL IBESC(bd%, disp1%, WR\$)

WR\$ = "T1X"

CALL IBESC(bd%, disp1%, WR\$)

```

WR$ = "POCOX"
CALL IBESC(bd%, disp1%, WR$)
WR$ = "S9Z1X"
CALL IBESC(bd%, disp1%, WR$)
WR$ = "F2X"
CALL IBESC(bd%, disp2%, WR$)
WR$ = "R0X"
CALL IBESC(bd%, disp2%, WR$)
WR$ = "T1X"
CALL IBESC(bd%, disp2%, WR$)
WR$ = "POCOX"
CALL IBESC(bd%, disp2%, WR$)
WR$ = "S9Z1X"
CALL IBESC(bd%, disp2%, WR$)

```

```

WR$ = "F2X"
CALL IBESC(bd%, disp3%, WR$)
WR$ = "R0X"
CALL IBESC(bd%, disp3%, WR$)
WR$ = "T1X"
CALL IBESC(bd%, disp3%, WR$)
WR$ = "C0X"
CALL IBESC(bd%, disp3%, WR$)
WR$ = "Z1X"
CALL IBESC(bd%, disp3%, WR$)

```

inicializa.arquivo'

```

DATA$ = MID$(DATE$, 4, 2) + "/" + MID$(DATE$, 1, 2) + "/" +
MID$(DATE$, 9, 2)
CLS
COLOR 11
LOCATE 12, 26
INPUT "TERMISTORES NÚMEROS ? : ", T1$, T2$
ARQ1$ = "THER" + T1$ + ".PRN"
ARQ2$ = "THER" + T2$ + ".PRN"

LPRINT DATA$; TAB(20); ARQ1$; TAB(50); ARQ2$; TAB(71); TIMES$

```

LPRINT
LPRINT

CLS
COLOR 14
LOCATE 1, 9
PRINT DATA\$

LOCATE 1, 70
PRINT MID\$(TIME\$, 1, 5);

LOCATE 1, 28
PRINT "CALIBRAÇÃO DE TERMISTORES"

COLOR 5
LOCATE 22, 24
PRINT "para terminar aperte F..."

DO

temptot = 0
restot1 = 0
restot2 = 0

FOR m = 1 TO 10

RD1\$ = SPACE\$(20)
CALL ibler(bd%, disp1%, RD1\$)

RD2\$ = SPACE\$(20)
CALL ibler(bd%, disp2%, RD2\$)

RD3\$ = SPACE\$(20)
CALL ibler(bd%, disp3%, RD3\$)

ET2:

COLOR 11
LOCATE 8, 20
PRINT "Ni - 100 :"

```

LOCATE 8, 34
RES3 = VAL(MID$(RD3$, 5, 15))
PRINT USING "#####.##"; RES3; 'Ni-100
PRINT " (ohm)"
LOCATE 8, 54
PRINT "Temp : ";
temp2 = RES3 * 1.67011 - 166.091
temp = temp2 * 1.00777 - .57283
PRINT USING "###.##"; temp;
PRINT " (C)"
LOCATE 12, 20
PRINT "Termistor1 : "
LOCATE 12, 34
COLOR 11
RES1 = VAL(MID$(RD1$, 5, 15))
PRINT USING "#####.##"; RES1;
PRINT " (ohm)"

LOCATE 16, 20
PRINT "Termistor2 : "
LOCATE 16, 34
RES2 = VAL(MID$(RD2$, 5, 15))
PRINT USING "#####.##"; RES2;
PRINT " (ohm)"

temptot = temptot + temp
restot1 = restot1 + RES1
restot2 = restot2 + RES2

```

NEXT m

```

temp = temptot / 10
RES1 = restot1 / 10
RES2 = restot2 / 10
LPRINT SPC(8);
LPRINT USING "###.##"; temp;
LPRINT " (graus C) "; SPC(10);
LPRINT USING "#####.##"; RES1;

```

```
LPRINT " (ohm)"; SPC(10);  
LPRINT USING "#####.##"; RES2;  
LPRINT " (ohm)"
```

```
OPEN ARQ1$ FOR APPEND AS #1  
    WRITE #1, temp, RES1      'arquivo dados termistor 1  
CLOSE #1
```

```
OPEN ARQ2$ FOR APPEND AS #2  
    WRITE #2, temp, RES2      'arquivo dados termistor 2  
CLOSE #2
```

```
LOOP WHILE INKEY$ <> "F"
```

```
END
```

APÊNDICE 4

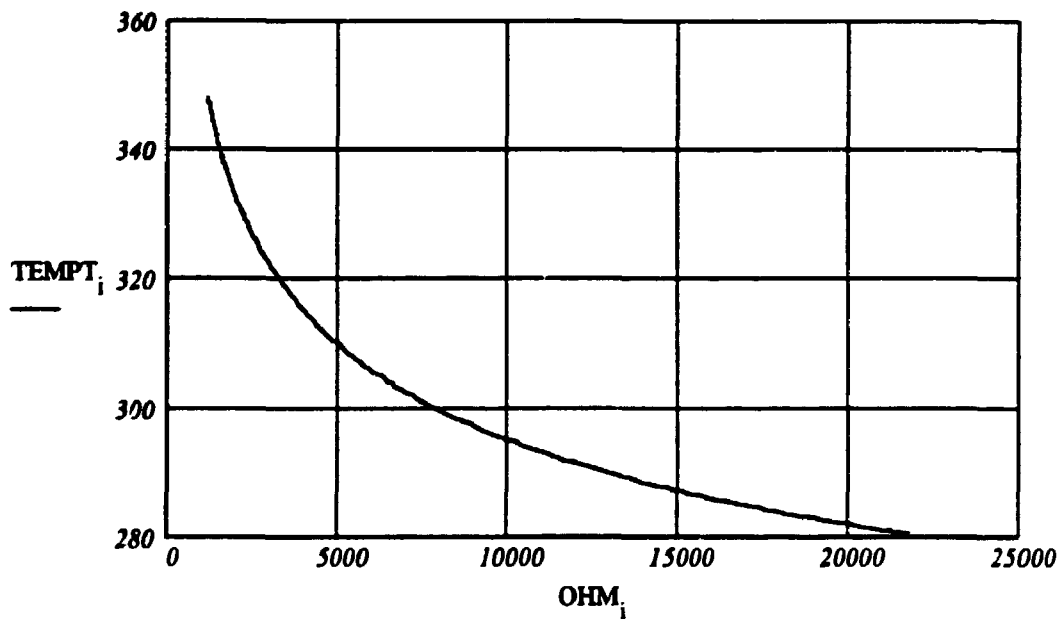
CORRELAÇÃO DOS DADOS DE CALIBRAÇÃO DO TERMISTOR

(Cálculo realizado com o programa MATHCAD for Windows)

T1 := READPRN(ther10a) <----- le arquivo e o atribui à matriz T1

ind = rows(T1) i = 0..(ind - 1) N = ind $TEMP_i = \frac{1}{[T1_{i,0}] + 273}$

$TEMP_i = T1_{(i,0)} + 273$ $OHM_i = T1_{(i,1)}$ $RES_i = \ln[OHM_i]$



Inicia regressão grau 4

$$X1 = \sum_i RES_i$$

$$X2 = \sum_i [RES_i]^2$$

$$X3 = \sum_i [RES_i]^3$$

$$X4 = \sum_i [RES_i]^4 \quad X5 = \sum_i [RES_i]^5 \quad X6 = \sum_i [RES_i]^6$$

$$X7 = \sum_i [RES_i]^7 \quad X8 = \sum_i [RES_i]^8 \quad Y1 = \sum_i TEMP_i$$

$$Y2 = \sum_i [TEMP_i]^2 \quad XY = \sum_i TEMP_i \cdot RES_i \quad X2Y = \sum_i [RES_i]^2 \cdot TEMP_i$$

$$X3Y = \sum_i [RES_i]^3 \cdot TEMP_i \quad X4Y = \sum_i [RES_i]^4 \cdot TEMP_i$$

$$D1 = \begin{bmatrix} N & X1 & X2 & X3 & X4 \\ X1 & X2 & X3 & X4 & X5 \\ X2 & X3 & X4 & X5 & X6 \\ X3 & X4 & X5 & X6 & X7 \\ X4 & X5 & X6 & X7 & X8 \end{bmatrix}$$

$$DA = \begin{bmatrix} Y1 & X1 & X2 & X3 & X4 \\ XY & X2 & X3 & X4 & X5 \\ X2Y & X3 & X4 & X5 & X6 \\ X3Y & X4 & X5 & X6 & X7 \\ X4Y & X5 & X6 & X7 & X8 \end{bmatrix}$$

$$DB = \begin{bmatrix} N & Y1 & X2 & X3 & X4 \\ X1 & XY & X3 & X4 & X5 \\ X2 & X2Y & X4 & X5 & X6 \\ X3 & X3Y & X5 & X6 & X7 \\ X4 & X4Y & X6 & X7 & X8 \end{bmatrix}$$

$$DC = \begin{bmatrix} N & X1 & Y1 & X3 & X4 \\ X1 & X2 & XY & X4 & X5 \\ X2 & X3 & X2Y & X5 & X6 \\ X3 & X4 & X3Y & X6 & X7 \\ X4 & X5 & X4Y & X7 & X8 \end{bmatrix}$$

$$DD = \begin{bmatrix} N & X1 & X2 & Y1 & X4 \\ X1 & X2 & X3 & XY & X5 \\ X2 & X3 & X4 & X2Y & X6 \\ X3 & X4 & X5 & X3Y & X7 \\ X4 & X5 & X6 & X4Y & X8 \end{bmatrix}$$

$$DE = \begin{bmatrix} N & X1 & X2 & X3 & Y1 \\ X1 & X2 & X3 & X4 & XY \\ X2 & X3 & X4 & X5 & X2Y \\ X3 & X4 & X5 & X6 & X3Y \\ X4 & X5 & X6 & X7 & X4Y \end{bmatrix}$$

$$DD1 = |D1|$$

$$DDA = |DA|$$

$$DDB = |DB|$$

$$DDC = |DC|$$

$$DDD = |DD|$$

$$DDE = |DE|$$

$$A = \frac{DDA}{DD1}$$

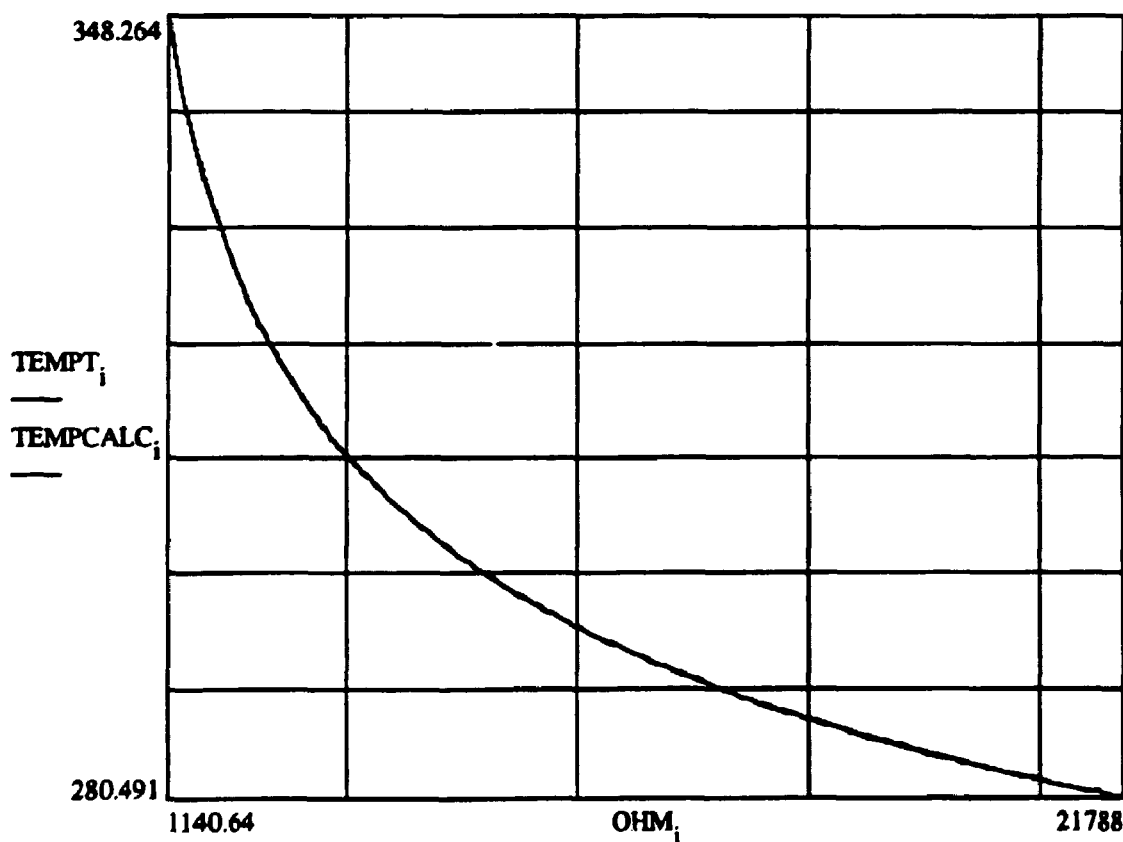
$$B = \frac{DDB}{DD1}$$

$$C = \frac{DDC}{DD1}$$

$$D = \frac{DDD}{DD1}$$

$$E = \frac{DDE}{DD1}$$

$$TEMPCALC_i = \frac{1}{A + B \cdot \ln[OHM_i] + C \cdot \ln[OHM_i]^2 + D \cdot \ln[OHM_i]^3 + E \cdot \ln[OHM_i]^4}$$



COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE GRAU 4

A = 0.0047253

B = -0.0014012

C = 2.8126231 · 10⁻⁴

D = -2.1087519 · 10⁻⁵

E = 5.8152118 · 10⁻⁷

$$\text{desvio_padrão} = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\left[\text{TEMPT}_i \right] - \left[\text{TEMPCALC}_i \right] \right)^2}{N - 5}}$$

desvio_padrão = 0.0671287

APÊNDICE 5

CORRELAÇÃO DOS DADOS DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR HALL

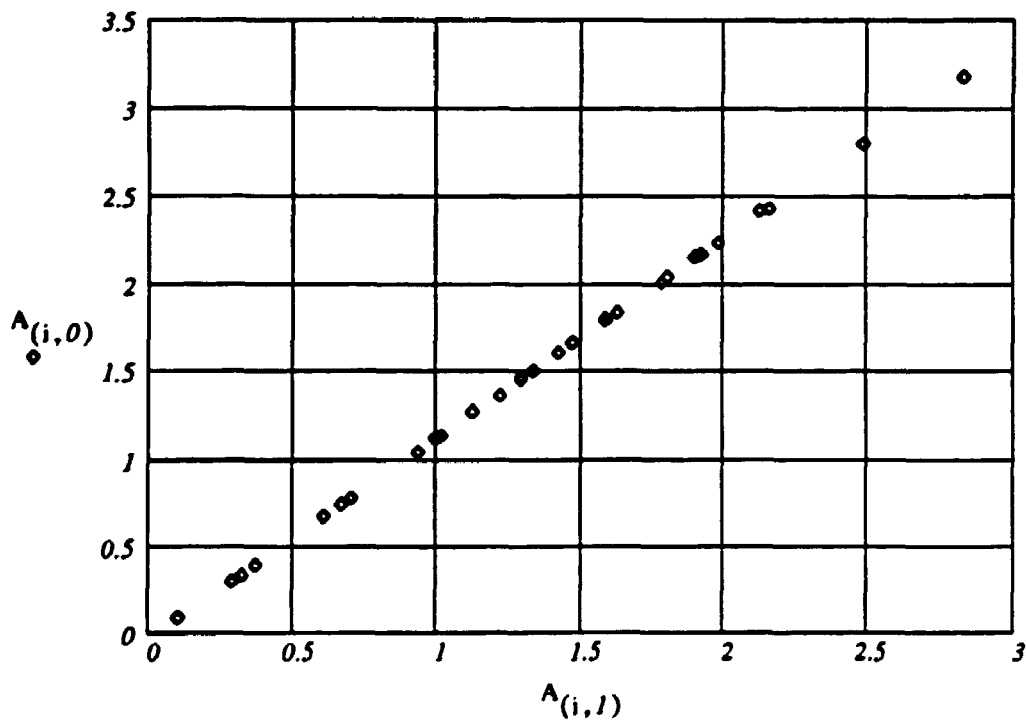
(Cálculo realizado com o programa MATHCAD for Windows)

$A = \text{READPRN}(\text{hallcal})$ <----- le arquivo e o atribui à matriz A

$\text{rows}(A) = 29$

$\text{cols}(A) = 2$

$i = 0..28$



$$x_i = A_{(i,1)}$$

$$y_i = A_{(i,0)}$$

Computa estatística das amostras:

$$\text{mean}(x) = 1.345$$

$$\text{mean}(y) = 1.507$$

$$N = \text{length}(x)$$

$$N = 29$$

$$\text{var}(x) = 0.45 \quad \text{var}(y) = 0.583 \quad \text{stdev}(x) = 0.671 \quad \text{stdev}(y) = 0.763$$

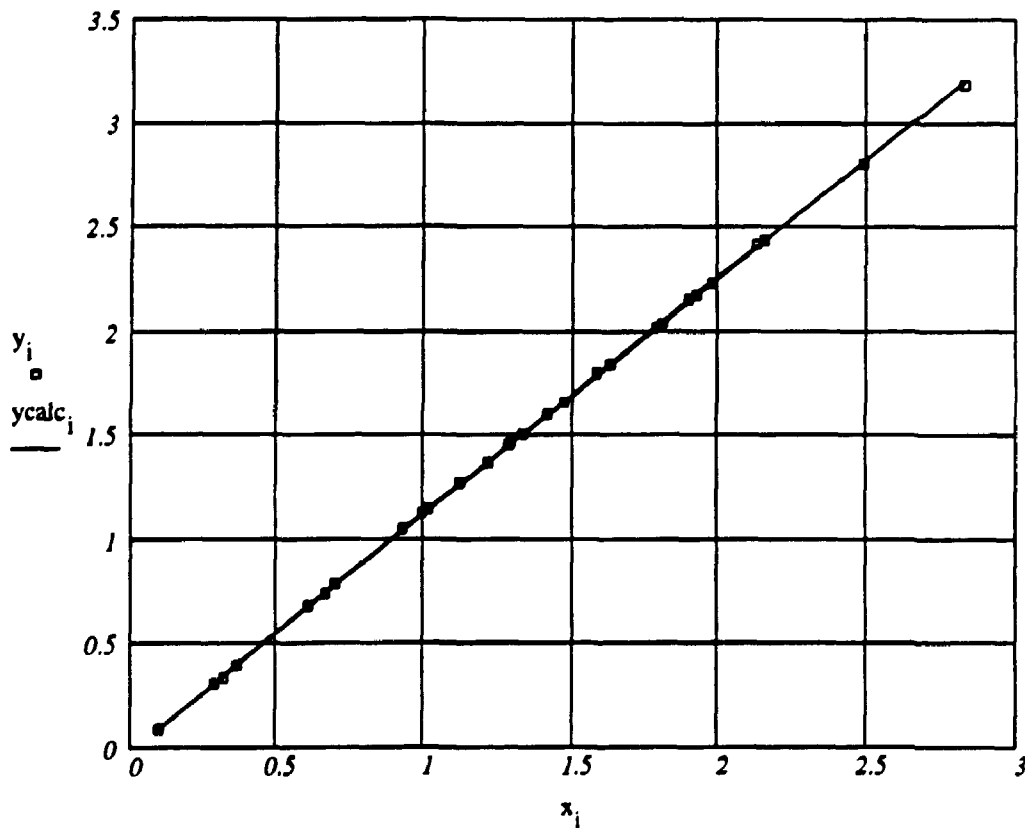
Correlação linear :

$$\text{corr}(x, y) = 0.99996836 \quad m = \text{slope}(x, y) \quad b = \text{intercept}(x, y)$$

$$m = 1.13826 \quad b = -0.02362 \quad y_{\text{calc}_i} = [x_i \cdot m + b]$$

Computa desvio padrão :

$$\text{desvio_padr\~ao} = \sqrt{\frac{\sum_i [y_i - y_{\text{calc}_i}]^2}{N - 2}} \quad \text{desvio_padr\~ao} = 0.00629$$



APÊNDICE 6

**Listagem do programa DOFEC (Dosimetria de Feixe de Elétrons por
Calorimetria)**

Linguagem : Microsoft VISUAL BASIC for DOS

```

DECLARE SUB init ()
DECLARE SUB fundo2 ()
DECLARE SUB operação ()
DECLARE SUB calibra ()
DECLARE SUB teladosimetria ()
DECLARE SUB telacalib ()
DECLARE SUB fundo ()
DECLARE SUB gera.cabecalho ()
DECLARE SUB gera.graf ()
DECLARE SUB baixoRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORBG!,
                        COLORSONBRA!, COLORLUZ!)
DECLARE SUB sobreRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORSONBRA!,
                        COLORLUZ!)
DECLARE SUB le_corrente (CORRENTE)
DECLARE SUB init_AD ()
DECLARE SUB init_GPIB ()
DECLARE SUB Le_Temp (temperatura)

COMMON SHARED temp_aquec$, nomearq$, nomearqCAL$, HVDS$,
ENERGIAS$, SCANS$, CORRENTES$, nomearqRESS$

SUB Command1_Click ()

    nomearq$ = INPUTBOX$("Nome do arquivo de Calibração", "Calibração
                        do Calorímetro", "", 15, 8)
    nomearq$ = nomearq$ + ".cal"
    temp_aquec$ = INPUTBOX$("Tempo de Aquecimento [s]", "Calibração do
                        calorímetro", "", 15, 8)

```

```

screen.HIDE
CALL telacalib
CALL calibra
SCREEN 0
WIDTH 80
screen.SHOW

```

END SUB

SUB Command2_Click ()

```

nomearqCAL$ = INPUTBOX$("Nome do arquivo de Calibração",
                        "Dosimetria por Calorimetria", "", 15, 8)
HVDS$ = INPUTBOX$(" H V D [uV]", " Dosimetria por Calorimetria", "", 15,
8)
ENERGIA$ = INPUTBOX$("ENERGIA [keV]", " Dosimetria por
                    Calorimetria", "", 15, 8)
SCAN$ = INPUTBOX$("SCAN [cm]", " Dosimetria por Calorimetria", "", 15,
8)
CORRENTE$ = INPUTBOX$("CORRENTE [mA]", " Dosimetria por
                    Calorimetria", "", 15, 8)
nomearqRES$ = INPUTBOX$("Nome do arquivo de Resultados",
                        "Dosimetria por Calorimetria", "", 15, 8)
nomearqRES$ = nomearqRES$ + ".arq"

```

```

screen.HIDE
CALL teladosimetria
CALL operação
SCREEN 0
WIDTH 80
screen.SHOW

```

END SUB

```

SUB Form_Click ()
    BEEP
END SUB

```

```

SUB Form_Load ()

```

```

    CALL fundo

```

```

    screen.controlpanel(1) = 7
    screen.controlpanel(7) = 0
    screen.controlpanel(2) = 1
    screen.controlpanel(4) = 14
    screen.controlpanel(17) = 14
    Top = (screen.Height - Height) \ 2
    Left = (screen.Width - Width) \ 2
    screen.SHOW

```

```

    CALL init

```

```

END SUB

```

```

SUB Sair_Click ()

```

```

    mensagem$ = "    Está seguro ?"
    título$ = "ATENÇÃO"
    resposta% = MSGBOX(mensagem$, 1, título$)

```

```

    IF resposta% = 1 THEN
        CALL fundo2
        CLS
        END
    END IF

```

```

END SUB

```

SUB Timer1_Timer ()

```
label1.caption = TIME$
DATA$ = MID$(DATE$, 4, 2) + "/" + MID$(DATE$, 1, 2) + "/" +
        MID$(DATE$, 9, 2)
label2.caption = DATA$
```

END SUB

'SUBPROGRAMA CALIBRA

```
DECLARE SUB le_tensão (tensão!)
DECLARE SUB escreve ()
DECLARE SUB baixoRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORBG!,
                        COLORSOMBRA!, COLORLUZ!)
DECLARE SUB sobreRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORSOMBRA!,
                        COLORLUZ!)

DECLARE SUB gera.graf ()
DECLARE SUB gera.cabecalho ()
DECLARE SUB le_corrente (corrente)
DECLARE SUB init_AD ()
DECLARE SUB init_GPIB ()
DECLARE SUB Le_Temp (temperatura)
```

'\$INCLUDE: 'font.bi'

DIM SHARED FI AS FontInfo

```
COMMON SHARED temp_aquec$, NOMEARQ$, nomearqCAL$, HVD$,
ENERGIA$, SCANS$, corrente$, nomearqRESS$
```

```
SUB baixoRELEVO (X1, X2, Y1, Y2, COLORBG, COLORSOMBRA,
                COLORLUZ)
```

```
LINE (X1, Y1)-(X2, Y2), COLORBG, B
```

```
PAINT (X1 + 1, Y1 + 1), COLORBG
```

```
FOR I = 1 TO 3
```

```
  LINE (X1, Y1 - I)-(X2 + I, Y1 - I), COLORSONBRA 'borda superior  
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
```

```
  LINE (X1 - I, Y1 - 3)-(X1 - I, Y2 + I), COLORSONBRA 'borda esquerda  
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
```

```
  LINE (X2 + I, Y1 - I)-(X2 + I, Y2), COLORLUZ 'borda direita  
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
```

```
  LINE (X1 - I, Y2 + I)-(X2 + 3, Y2 + I), COLORLUZ 'borda inferior  
NEXT I
```

```
END SUB
```

```
SUB calibra ()
```

```
DIM I(2800), V(2800)
```

```
  OUT &H2C1, 0 'abre relé
```

```
  massa.cal = 63.7621
```

```
  LOCATE 10, 24
```

```
  PRINT " Para iniciar o teste "
```

```
  LOCATE 11, 24
```

```
  PRINT SPACES(32)
```

```
  LOCATE 12, 24
```

```
  PRINT " Aperte qualquer tecla "
```


DO

```
CALL Le_Temp(T)
COLOR 14
LOCATE 10, 71
PRINT USING "##.##"; T
```

LOOP WHILE INKEY\$ = ""

LINE (165, 130)-(450, 200), 1, BF ' apaga aviso

```
LOCATE 10, 24
PRINT "Numero de Aquisições :      "
LOCATE 11, 24
PRINT "                               "
LOCATE 12, 24
PRINT "Potência Instantânea :    [W] "
```

'Inic.Aquecimento

temp_aquec = VAL(temp_aquec\$)

```
COLOR 12
LOCATE 10, 4
PRINT " ligada "
```

```
CALL Le_Temp(Tmin)
COLOR 14
LOCATE 10, 71
PRINT USING "##.##"; Tmin
```

```
COLOR 14
OUT &H2C1, 1 ' fecha relé
BEEP
tempo_inic$ = TIMES$
N = 1
```

```

FOR taq = 1 TO temp_aquec * 26

    CALL le_corrente(I)
    I(N) = I

    LOCATE 10, 48
    PRINT N

    CALL le_tensão(V)
    V(N) = V

    LOCATE 12, 48
    PRINT USING "##.#"; V * I
    N = N + 1

NEXT taq

OUT &H2C1, 0 ' abre relé
BEEP
tempo_final$ = TIMES$

COLOR 14
LOCATE 10, 4
PRINT "Desligada"

LINE (165, 130)-(450, 200), 1, BF ' apaga aviso

fe = temp_aquec * 32 / N          ' fator de escala

FOR J = 1 TO N

    p = V(J) * I(J)
    X = 158 + J * fe
    Y = 181 - p * 1.5          ' plota gráfico de potência
    IF Y < 72 THEN Y = 72
    LINE (X, 250)-(X, Y), 11

NEXT J

```

```

T = temp_aquec / N
E = 0

FOR K = 1 TO N
    dE = I(K) * V(K) * T
    E = E + dE
NEXT K

COLOR 14
LOCATE 25, 30
PRINT USING "###.##"; E

CALL Le_Temp(T)
Tmax = T

DO

    CALL Le_Temp(T)
    COLOR 14
    LOCATE 19, 71
    PRINT USING "##.##"; T

    IF T > Tmax THEN Tmax = T

    IF (T + .1) < Tmax THEN EXIT DO

LOOP

COLOR 14
LOCATE 19, 71
PRINT USING "##.##"; Tmax

deltatemp = Tmax - Tmin
tmed = Tmin + deltatemp / 2

capacidade_térmica = E / deltatemp
calor_especifico = capacidade_térmica / massa.cal

```

```

COLOR 14
LOCATE 25, 64
PRINT USING "##.##"; deltatemp
LOCATE 27, 27
PRINT USING "##.###"; capacidade_ térmica
LOCATE 27, 64
PRINT USING "##.##"; tmed

COLOR 15
LOCATE 20, 17
PRINT "Ligue a impressora para copiar os resultados,"
LOCATE 21, 17
PRINT "  quando pronto aperte qualquer tecla... "

DO
LOOP WHILE INKEY$ = ""

OPEN NOMEARQ$ FOR APPEND AS #1
  PRINT #1, capacidade_ térmica, tmed
CLOSE

LPRINT
LPRINT
LPRINT
Data$ = MID$(DATE$, 4, 2) + "/" + MID$(DATE$, 1, 2) + "/" +
      MID$(DATE$, 7, 4)

LPRINT CHR$(18)
LPRINT SPC(2); Data$; SPC(6); "  CALIBRACAO DE
      CALORIMETRO  "; SPC(10); MID$(TIME$, 1, 5)

LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(20); "MASSA DO CALORIMETRO : "; massa.cal; " g"
LPRINT

```

```
LPRINT
LPRINT SPC(20); "TEMPO DE AQUECIMENTO : "; temp_aquec$; " s"
```

```
LPRINT
LPRINT
LPRINT SPC(20); "TEMPERATURA INICIAL : ";
LPRINT USING "##.##"; Tmin;
LPRINT " C"
```

```
LPRINT
LPRINT
LPRINT SPC(20); "TEMPERATURA FINAL : ";
LPRINT USING "##.##"; Tmax;
LPRINT " C"
```

```
LPRINT
LPRINT
LPRINT SPC(20); "DIF. DE TEMPERATURA : ";
LPRINT USING "#.##"; deltatemp;
LPRINT " C"
```

```
LPRINT
LPRINT
LPRINT SPC(20); "CALOR ADICIONADO : ";
LPRINT USING "###.##"; E;
LPRINT " joule"
LPRINT
LPRINT
```

```
LPRINT SPC(20); "CALOR ESPECÍFICO : ";
LPRINT USING "##.####"; calor_específico;
LPRINT " joule/ g C"
LPRINT
LPRINT
```

```
LPRINT SPC(20); "CAPACIDADE TÉRMICA : ";
LPRINT USING "###.###"; capacidade_térmica;
```



```

FOR N = 1 TO 25
  LOCATE N, 1
  PRINT " Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen Ipen
        Ipen ";
NEXT

```

END SUB

SUB fundo2 ()

```

screen.HIDE
COLOR 7, 0

```

```

FOR N = 1 TO 25
  LOCATE N, 1
  PRINT SPACES$(80)
NEXT

```

END SUB

SUB gera.cabecalho ()

```

***** cabeçalho *****
CALL sobreRELEVO(12, 627, 10, 35, 3, 2)
Data$ = MID$(DATE$, 4, 2) + "/" + MID$(DATE$, 1, 2) + "/" +
        MID$(DATE$, 7, 4)

COLOR 15
LOCATE 2, 5
PRINT Data$
LOCATE 2, 72
PRINT "IPEN/GE" + MID$(TIME$, 1, 5)
LOCATE 2, 30
PRINT "CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO"

```

***** laterais *****

```
CALL sobreRELEVO(10, 110, 72, 172, 3, 2)
COLOR 2
LOCATE 6, 3
PRINT "Resistência"
LOCATE 7, 8
PRINT "de"
LOCATE 8, 3
PRINT "Aquecimento"
COLOR 14
LOCATE 10, 4
PRINT "Desligada"
```

```
CALL sobreRELEVO(10, 110, 214, 314, 3, 2)
COLOR 2
LOCATE 15, 5
PRINT "Tempo"
LOCATE 16, 7
PRINT "de"
LOCATE 17, 3
PRINT "Aquecimento"
COLOR 14
LOCATE 19, 6
PRINT "0 [s]"
```

```
CALL sobreRELEVO(529, 629, 72, 172, 3, 2)
COLOR 2
LOCATE 6, 68
PRINT "Temperatura"
LOCATE 7, 70
PRINT "Inicial"
LOCATE 8, 73
PRINT CHR$(248); "C"
COLOR 14
LOCATE 10, 71
PRINT USING "##.#"; Tinicial
```

```
CALL sobreRELEVO(529, 629, 214, 314, 3, 2)
```



```

COLOR 2
LOCATE 15, 68
PRINT "Temperatura"
LOCATE 16, 71
PRINT "Final"
LOCATE 17, 73
PRINT CHR$(248); "C"
COLOR 14
LOCATE 19, 71
PRINT USING "##.#"; Tfinal

```

.....

END SUB

SUB gera.graf ()

```

CALL baixoRELEVO(158, 480, 72, 250, 1, 2, 3)
COLOR 15
LOCATE 17, 20
PRINT "0    2    4    6    8    10"

SelectFont 3
SetGTextColor 15
SetGTextDir 0 'posição horizontal
Length% = OutGText(220, 274, "tempo de aquecimento [ s ]")
SetGTextDir 1 'posição horizontal
Length% = OutGText(130, 210, " V x I  [ watt ]")

```

END SUB

SUB Init ()

```

'INICIALIZA.GPIB

```

IBSTA% = 0

IBCNT% = 0

IBERR% = 0

CALL IBINIT(IBSTA%, IBERR%, IBCNT%)

V% = 1

bd% = 0

disp3% = 30

CALL IBTMO(bd%, V%)

CALL IBSIC(bd%)

CALL IBSRE(bd%, V%)

WR\$ = "F2X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "F2X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "R0X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "R0X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "T1X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "T1X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "C0X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

WR\$ = "Z1X"

CALL IBESC(bd%, disp3%, WR\$)

'INICIA A/D LYNX

OUT &H305, 0

OUT &H305, 1

OUT &H305, 0

FOR N = 1 TO 100

NEXT N

OUT &H305, &H70 'GANHO 0, +5 V

END SUB

SUB le_corrente (corrente)

V = 0

canal% = 19

FOR KK = 1 TO 10

OUT &H304, canal%

L1:

V1 = INP(&H303)

IF (V1 AND 16) = 1 THEN GOTO L1

I = INP(&H305) XOR &H80

V1 = INP(&H304)

V1 = (V1 + I * 256) / 16

V = V + V1

NEXT KK

V = V / 10

V = V * .0012207#

corrente = V * 1.1382641# - .0236225 'calibração do sensor Hall

END SUB

SUB Le_Temp (temperatura)

```
bd% = 0
```

```
disp2% = 30
```

```
RD3$ = SPACE$(20)
```

```
CALL ibler(bd%, disp3%, RD3$)
```

```
res = VAL(MID$(RD3$, 5, 15))
```

```
A = .0047253#
```

```
B = -.0014012 * LOG(res)
```

```
c = .000281262# * (LOG((res)) ^ 2)
```

```
D = -.00002108752# * (LOG((res)) ^ 3) ' curva de calibração
```

```
E = 5.815212E-07 * (LOG((res)) ^ 4) ' do termistor 10a
```

```
tcal = (1 / (A + B + c + D + E))
```

```
tcal = tcal - 273.35
```

```
temperatura = tcal
```

```
END SUB
```

SUB le_tensão (tensão)

```
V = 0
```

```
canal% = 17
```

```
FOR KK = 1 TO 10
```

```
  OUT &H304, canal%
```

```
L2:
```

```
  V1 = INP(&H303)
```

```
  IF (V1 AND 16) = 1 THEN GOTO L2
```

```
  I = INP(&H305) XOR &H80
```

```
  V1 = INP(&H304)
```

```
V1 = (V1 + I * 256) / 16
V = V + V1
NEXT KK
```

```
V = V / 10
```

```
tensão = V * .0012207#
```

END SUB

SUB sobreRELEVO (X1, X2, Y1, Y2, COLORSONBRA, COLORLUZ)

```
FOR I = 1 TO 3
  LINE (X1, Y1 - I)-(X2 + I, Y1 - I), COLORSONBRA 'borda superior
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
  LINE (X1 - I, Y1 - 3)-(X1 - I, Y2 + I), COLORSONBRA 'borda esquerda
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
  LINE (X2 + I, Y1 - I)-(X2 + I, Y2), COLORLUZ 'borda direita
NEXT I
```

```
FOR I = 1 TO 3
  LINE (X1 - I, Y2 + I)-(X2 + 3, Y2 + I), COLORLUZ 'borda inferior
NEXT I
```

END SUB

SUB telacalib ()

```
SCREEN 12
```

```
p1 = 65536 * 30 + 256 * 34 + 50 'COLOR FUNDO
```

P2 = 65536 * 43 + 256 * 47 + 63 'COLOR FUNDO ILUMINADO
 P3 = 65536 * 10 + 256 * 14 + 30 'COLOR FUNDO SOMBREADO

PALETTE 0, p1
 PALETTE 2, P3
 PALETTE 3, P2
 PALETTE 1, 0

***** cria tela de fundo *****

LINE (0, 0)-(639, 479), 0, B
 PAINT (12, 12), 0
 LINE (1, 1)-(638, 478), 2, B

CALL escreve
 CALL gera.cabecalho
 CALL sobreRELEVO(50, 589, 344, 450, 3, 2)
 CALL gera.graf

CALL baixoRELEVO(68, 316, 380, 434, 0, 2, 3)
 CALL baixoRELEVO(333, 571, 380, 434, 0, 2, 3)

COLOR 2
 LOCATE 25, 10
 PRINT "Calor adicionado : J"
 LOCATE 25, 43
 PRINT "Dif. de temperatura: "; CHR\$(248); "C"
 LOCATE 27, 10
 PRINT "Capac. térmica : J"; CHR\$(248); "C"
 LOCATE 27, 43
 PRINT "Temperatura média : "; CHR\$(248); "C"

COLOR 14
 LOCATE 19, 6
 PRINT temp_aquec\$

LOCATE 10, 24
 PRINT " Quando a temperatura estiver "

```
LOCATE 11, 24
PRINT "constante, aperte uma tecla para"
LOCATE 12, 24
PRINT "iniciar o ciclo de aquecimento. "
```

END SUB

'SUBPROGRAMA DOSIMETR

```
DECLARE SUB Le_Temp (temperatura!)
DECLARE SUB escreve ()
DECLARE SUB sobreRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORSONBRA!,
                        COLORLUZI!)
DECLARE SUB baixoRELEVO (X1!, X2!, Y1!, Y2!, COLORBGI!,
                        COLORSONBRA!, COLORLUZI!)
DECLARE SUB gera.cabecalho2 ()
DECLARE SUB gera.graf2 ()
```

'\$INCLUDE: 'font.bi'

DIM SHARED FI AS FontInfo

```
COMMON SHARED temp_aquec$, nomearq$, nomearqCAL$, HVDS$,
                ENERGIA$, SCANS$, CORRENTE$, nomearqRESS$
```

SUB gera.cabecalho2 ()

***** cabecalho *****

```
CALL sobreRELEVO(12, 627, 10, 35, 3, 2)
Data$ = MID$(DATE$, 4, 2) + "/" + MID$(DATE$, 1, 2) + "/" +
        MID$(DATE$, 7, 4)
```

COLOR 15

LOCATE 2, 16
 PRINT "DOSIMETRIA DE FEIXE DE ELÉTRONS POR CALORIMETRIA"

***** laterais *****

CALL sobreRELEVO(10, 110, 72, 172, 3, 2)
 COLOR 2
 LOCATE 6, 5
 PRINT "Massa"
 LOCATE 7, 7
 PRINT "do"
 LOCATE 8, 3
 PRINT "Calorímetro"
 COLOR 10
 LOCATE 10, 4
 PRINT "63,76 [g]" 'massa.cal = 63.7621

CALL sobreRELEVO(10, 110, 214, 314, 3, 2)
 COLOR 2
 LOCATE 15, 5
 PRINT "Curva"
 LOCATE 16, 7
 PRINT "de"
 LOCATE 17, 3
 PRINT "Calibração"
 COLOR 14
 LOCATE 19, 5
 PRINT nomearqCAL\$

CALL sobreRELEVO(529, 629, 72, 172, 3, 2)
 COLOR 2
 LOCATE 6, 68
 PRINT "Temperatura"
 LOCATE 7, 70
 PRINT "Inicial"
 LOCATE 8, 72
 PRINT CHR\$(248); "C"
 COLOR 14
 LOCATE 10, 71

PRINT USING "##.#"; Tinitial

CALL sobreRELEVO(529, 629, 214, 314, 3, 2)

COLOR 2

LOCATE 15, 68

PRINT "Temperatura"

LOCATE 16, 71

PRINT "Final"

LOCATE 17, 72

PRINT CHR\$(248); "C"

COLOR 14

LOCATE 19, 71

PRINT USING "##.#"; Tfinal

.....

END SUB

SUB gera.graf2 ()

CALL baixoRELEVO(158, 480, 72, 250, 1, 2, 3)

COLOR 15

LOCATE 17, 20

PRINT "0 20 40 60 80 100"

COLOR 15

LOCATE 16, 18

PRINT "20"

LOCATE 5, 18

PRINT "50"

SelectFont 3

SetGTextColor 15

SetGTextDir 0 'posição horizontal

Length% = OutGText(276, 278, "tempo [s]")

SetGTextDir 1 'posição vertical

a\$ = "Temperatura [" + CHR\$(248) + "C]"

Length% = OutGText(125, 210, a\$)

END SUB

SUB operação ()

DIM TEMP(2000), t(2000)

massa_cal = 63.7621

COLOR 4

LOCATE 9, 25

PRINT SPACE\$(31)

LOCATE 10, 25

PRINT " Antes de iniciar a operação, " 'mensagem inicio

LOCATE 11, 25

PRINT " VERIFIQUE a instrumentação "

LOCATE 12, 25

PRINT SPACE\$(31)

DO

LOOP WHILE INKEY\$ = ""

LINE (165, 130)-(480, 200), 1, BF ' apaga aviso

COLOR 14

LOCATE 9, 25

PRINT SPACE\$(31)

LOCATE 10, 25

PRINT " Para iniciar a irradiação, " 'mensagem irradiação

LOCATE 11, 25

PRINT " aperte uma tecla ! "

LOCATE 12, 25

PRINT SPACE\$(31)

DO

CALL Le_Temp(t)
 COLOR 14
 LOCATE 10, 71
 PRINT USING "##.##"; t

LOOP WHILE INKEY\$ = ""

CALL Le_Temp(t)
 Tmin = t

DO

N = 1
 CALL Le_Temp(t)
 COLOR 11
 LOCATE 19, 71
 PRINT USING "##.##"; t
 TEMP = t
 TEMP(N) = TEMP

IF TEMP <> Tmin THEN EXIT DO

LOOP

LINE (165, 120)-(480, 200), 1, BF ' apaga aviso
 LOCATE 20, 23
 COLOR 4
 PRINT "PLOTANDO ! , para terminar, tecla F ";

COLOR 2
 LINE (158, 102)-(480, 102)
 LINE (158, 131)-(480, 131)
 LINE (158, 161)-(480, 161) 'grafica grade horizontal

```
LINE (158, 190)-(480, 190)
LINE (158, 220)-(480, 220)
```

```
N = 0
```

```
DO
```

```
    N = N + 1
    CALL Le_Temp(t)
    COLOR 14
    LOCATE 19, 71
    PRINT USING "##.##"; t
    TEMP = t
    TEMP(N) = TEMP
```

```
    Y = 368 - TEMP * 5.9333
    x = 158 + N
```

```
    IF x >= 480 THEN
        x = x - 322
        PSET (x, Y), 14
    ELSE
        PSET (x, Y), 11
    END IF
```

```
    a$ = INKEY$
```

```
    IF a$ = "T" OR a$ = "F" THEN EXIT DO
    IF N > 643 OR N = m - 1 THEN EXIT DO
```

```
LOOP
```

```
LOCATE 20, 23
PRINT SPACE$(38)
```

'CALCULA ENERGIA ABSORVIDA

Q = 0

Tmax = TEMP(1)

Tmin = TEMP(1)

Nmin = 1

FOR K = 2 TO N 'valor corrente de n=m-1

IF TEMP(K) > Tmax THEN 'procura Tmax

Tmax = TEMP(K)

Nmax = K

END IF

IF TEMP(K) < Tmin THEN 'procura Tmin

Tmin = TEMP(K)

Nmin = K

END IF

NEXT K

denominador = (Nmin - 1)

IF denominador = 0 THEN denominador = 1

Mmin = (Tmin - TEMP(1)) / denominador

Bmin = Tmin - Mmin * Nmin 'm e b da reta Tmin

Mmax = (TEMP(N) - Tmax) / (N - Nmax)

Bmax = Tmax - Mmax * Nmax 'm e b da reta Tmax

Imint = 0

Imaxt = 0

Indmin = Nmin

Indmax = Nmax

Imin = ABS(TEMP(Indmin) - (Indmin * Mmin + Bmin))

Imax = ABS((Indmax * Mmax + Bmax) - TEMP(Indmax))

```

Imint = Imint + Imin
Imaxt = Imaxt + Imax
DO ' Calcula a temperatura extrapolada

    IF Imint > Imaxt THEN
        Indmax = Indmax - 1
        Imax = ABS((Indmax * Mmax + Bmax) - TEMP(Indmax))
        Imaxt = Imaxt + Imax
    END IF

    IF Imint < Imaxt THEN
        Indmin = Indmin + 1
        Imin = ABS(TEMP(Indmin) - (Indmin * Mmin + Bmin))
        Imint = Imint + Imin
    END IF

    IF Indmin >= Indmax - 2 THEN EXIT DO

LOOP

Tminf = (Indmin + 1) * Mmin + Bmin
Tmaxf = (Indmax - 1) * Mmax + Bmax

COLOR 7 ' desenha temperatura extrapolada
LINE (158 + Nmin, 368 - Tmin * 5.9333)-(158 + Indmin, 368 - Tminf *
    5.9333)
LINE (158 + Indmin, 368 - Tminf * 5.9333)-(158 + Indmax, 368 - Tmaxf *
    5.9333)
LINE (158 + Indmax, 368 - Tmaxf * 5.9333)-(158 + Nmax, 368 - Tmax *
    5.9333)

COLOR 2
LOCATE 7, 70
PRINT " minima"
LOCATE 16, 71
PRINT "maxima" 'escreve no quadro de diálogo correspondente
COLOR 14 'a temperatura máxima e mínima

```

```

LOCATE 10, 71
PRINT USING "##.##"; Tminf
LOCATE 19, 71
PRINT USING "##.##"; Tmaxf

'inicia integração de Q

dT = .1

FOR K = Tminf * 10 TO Tmaxf * 10

    tm = K / 10
    tm = tm + 273.35
    capacidade_térmica = .152999 * tm + 0.653936# ' curva de calibração
    dQ = capacidade_térmica * dT
    Q = Q + dQ: ' em joule

NEXT K

Q = Q * 1.01929 ' correção devido à janela de Titânio

delta_T_total = Tmax - Tmin

'CALCULA DOSE

DOSE = Q / 63.7621: 'dose em kGy
DOSE.ESPC = DOSE / 63.7621
COLOR 14
LOCATE 25, 31
PRINT USING "####.#"; Q
LOCATE 25, 60
PRINT USING "####.# "; DOSE
LOCATE 27, 32
PRINT USING "##.##"; delta_T_total
LOCATE 27, 61
PRINT USING "###.###"; DOSE / 10

```

'Arquiva resultados

```

OPEN nomearqRES$ FOR OUTPUT AS #2
  PRINT #2, "Arquivo de calibração : "; nomearqCAL$
  PRINT #2, "HVD : "; HVDS$
  PRINT #2, "Energia [keV] : "; ENERGIAS$
  PRINT #2, "SCAN : "; SCANS$
  PRINT #2, "CORRENTE [mA] : "; CORRENTES$
  PRINT #2, "Delta temperatura [K] : "; delta_T_total
  PRINT #2, "Energia absorvida [J] : "; Q
  PRINT #2, "Dose absorvida [kGy] : "; DOSE
  PRINT #2,
  PRINT #2, "***** Perfil de Temperatura *****"

  FOR K = 1 TO N
    PRINT #2, TEMP(K)
  NEXT K

```

CLOSE #2

LOCATE 20, 20

COLOR 4

PRINT "Para IMPRIMIR RESULTADOS, aperte uma tecla.."

DO

LOOP WHILE INKEY\$ = ""

LOCATE 20, 20

PRINT SPACES\$(44)

'Inicia impressão dos resultados

LPRINT

LPRINT

LPRINT

Data\$ = MID\$(DATE\$, 4, 2) + "/" + MID\$(DATE\$, 1, 2) + "/" +
MID\$(DATE\$, 7, 4)

LPRINT SPC(2); Data\$; SPC(4); "DOSIMETRIA DE FEIXE DE
ELÉTRONS POR CALORIMETRIA"; SPC(4); MID\$(TIMES, 1, 5)

LPRINT
LPRINT
LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(10); "MASSA DO CALORÍMETRO : "; massa_cal; " g"

LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(10); "CALOR ADICIONADO : ";

LPRINT USING "####.##"; Q;

LPRINT " joule"

LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(10); "DOSE ABSORVIDA : ";

LPRINT USING "####.##"; DOSE;

LPRINT " kGy"; " (";

LPRINT USING "##.##"; DOSE / 10;

LPRINT " Mrad)"

LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(10); "DOSE ESPECÍFICA ABSORVIDA : ";

LPRINT USING "###.### "; DOSE.ESPC;

LPRINT " kGy/g"

LPRINT
LPRINT
LPRINT

LPRINT SPC(22); "HVD : "; HVDS; " uA"

LPRINT

LPRINT SPC(22); "Energia : "; ENERGIAS; " keV"

LPRINT


```
CALL gera.graf2
CALL sobreRELEVO(50, 589, 344, 450, 3, 2)
CALL baixoRELEVO(68, 316, 380, 434, 0, 2, 3)
CALL baixoRELEVO(333, 571, 380, 434, 0, 2, 3)
```

```
COLOR 2
LOCATE 25, 10
PRINT "Energia absorvida :      J"
LOCATE 25, 43
PRINT "Dose Absorvida :      kGy"
LOCATE 27, 10
PRINT "Dif. de temperatura:    "; CHR$(248); "C"
```

```
LOCATE 27, 43
PRINT "Dose Absorvida :      Mrad"
```

```
END SUB
```

APÊNDICE 7

CORRELAÇÃO DOS DADOS DE CALIBRAÇÃO DO CALORÍMETRO

(Cálculo realizado com o programa MATHCAD for Windows)

$A = \text{READPRN}[\text{teste4}]$

$B = \text{READPRN}[\text{teste5}]$

Le arquivos de dados experimentais
das séries # 4, 5 e 6

$C = \text{READPRN}[\text{teste6}]$

$\text{cols}[A] = 2$ $\text{rows}[A] = 33$ $j = 0..[\text{rows}[A]-1]$ $X2 = \begin{bmatrix} 292 \\ 325 \end{bmatrix}$

DADOS EXPERIMENTAIS : $C \text{ [J/K]} = f(\text{Temperatura [K]})$

$D = \text{READPRN}[\text{teste456}]$

<---- teste 4 + teste 5 + teste 6

$i = 0..[\text{rows}[D]-1]$

Estatística dos dados de entrada :

$y_i = D_{(i,0)}$

$x_i = D_{(i,1)}$

$N = \text{length}[x]$

$\text{mean}[x] = 308.364$

$\text{mean}[y] = 47.833$

$N = 99$

$\text{var}[x] = 90.63$

$\text{var}[y] = 2.127$

$\text{stdev}[x] = 9.52$

$\text{stdev}[y] = 1.459$

Regressão linear de grau 1:

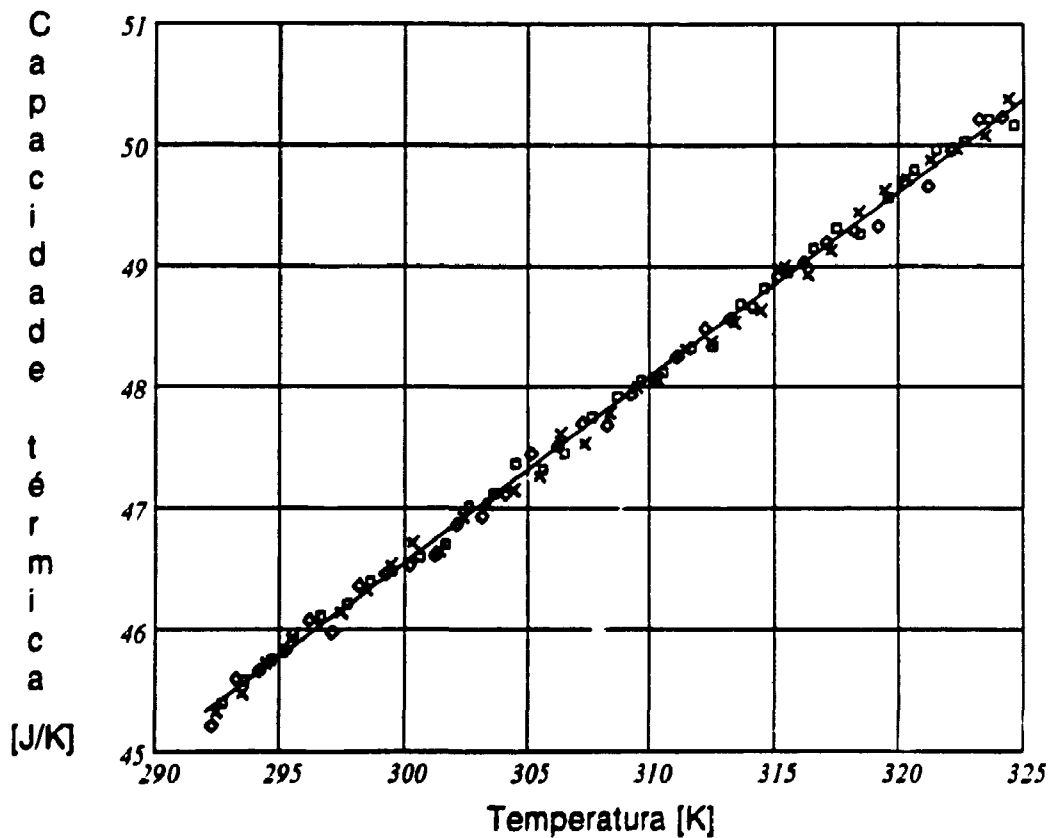
$$m = \text{slope}[x,y] \quad b = \text{intercept}[x,y] \quad \text{corr}[x,y] = 0.99859808$$

$$y_{\text{calc}_i} = x_i \cdot m + b \quad m = 0.1529989 \quad b = 0.653936$$

$$Y2 = m \cdot X2 + b \quad k = 0..1$$

Calcula o desvio padrão :

$$\text{desvio_padrão} = \sqrt{\frac{\sum_i [y_i - y_{\text{calc}_i}]^2}{N - 2}} \quad \text{desvio_padrão} = 0.078$$



APÊNDICE 8

CÁLCULO DA DOSE ABSORVIDA PELOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DO ACELERADOR E PELA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DO NÚCLEO DO CALORÍMETRO

(Cálculo realizado com o programa MATHCAD for Windows)

Constantes :

$c = 0.72$	calor específico médio [J/g K]
$E = 1500000$	energia dos elétrons [eV]
$m = .0637621$	massa do núcleo do calorímetro [kg]
$af = 700$	área do feixe [cm ²]
$v = \frac{336}{60}$	velocidade da bandeja [cm/s]
$at = 1.01929$	fator de correção devido à fração de dose absorvida na janela do calorímetro
$fda = 1.0663$	fator de correção devido à fração de dose absorvida na janela do acelerador e no ar
$m1 = .1529989$	parâmetros de calibração do calorímetro
$b1 = 0.653936$	
$re = 1.01$	fator de correção devido ao retroespalhamento dos elétrons no grafite
$an = \pi \cdot 3.3^2$	área do núcleo [cm ²]

$I = 0.002$

corrente nominal do feixe = 2 mA

$$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot a \cdot n}{v \cdot a_f \cdot f_{da} \cdot r_e}$$

$E_{dep} = 170.181$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$$dose = \frac{E_{dep}}{m}$$

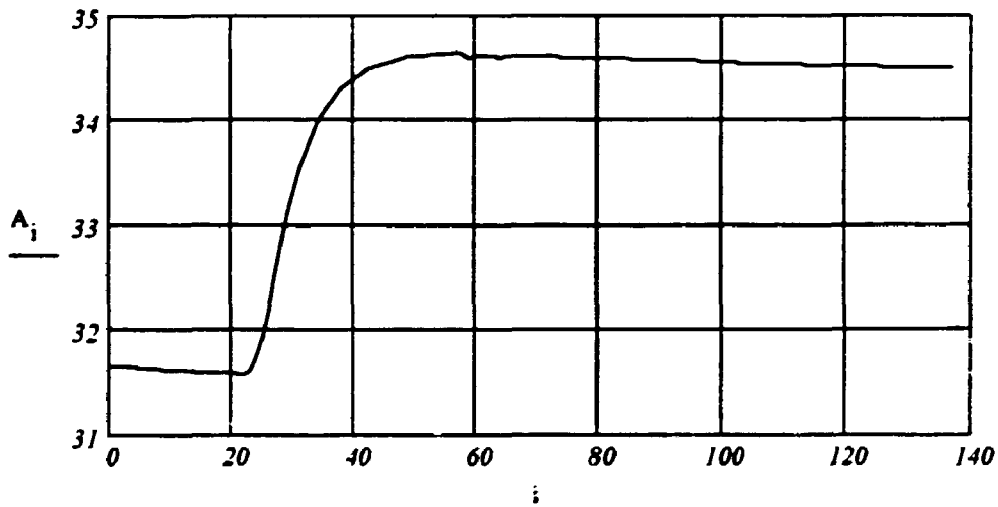
$dose = 2.669 \cdot 10^3$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$A = READPRN(I2MA)$

$n = rows(A)$

$i = 0..n - 1$



$min(A) = 31.58$

$max(A) = 34.66$

$j = (min(A) \cdot 100) .. (max(A) \cdot 100)$

$$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m1 + b1}{100} \right] \right] \cdot at$$

$E_{depcal} = 149.232$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$$

$Dose = 2.34 \cdot 10^3$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$$I = 0.005$$

corrente nominal do feixe = 5 mA

$$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot an}{v \cdot af \cdot fda \cdot re}$$

$$E_{dep} = 425.452$$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$$dose = \frac{E_{dep}}{m}$$

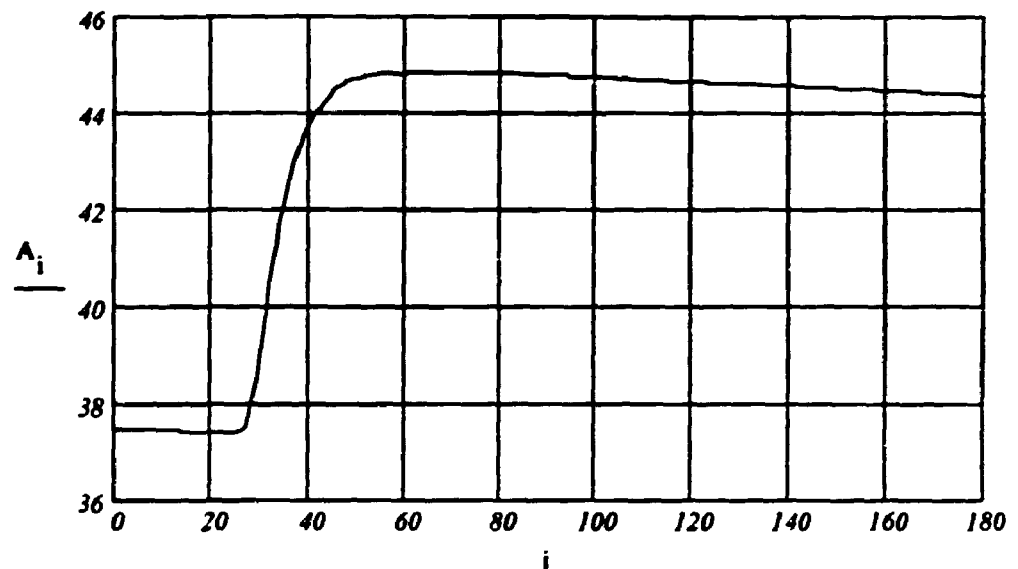
$$dose = 6.672 \cdot 10^3$$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$$A = \text{READPRN}(15MA)$$

$$n = \text{rows}(A)$$

$$i = 0..n - 1$$



$$\min(A) = 37.41$$

$$\max(A) = 44.847$$

$$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$$

$$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot ml + bl}{100} \right] \right] \cdot at$$

$$E_{depcal} = 369.777$$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$$

$$Dose = 5.799 \cdot 10^3$$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$I = 0.006$

corrente nominal do feixe = 5 mA

$$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot a_n}{v \cdot a_f \cdot f_{da} \cdot r_e}$$

$E_{dep} = 510.542$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$$dose = \frac{E_{dep}}{m}$$

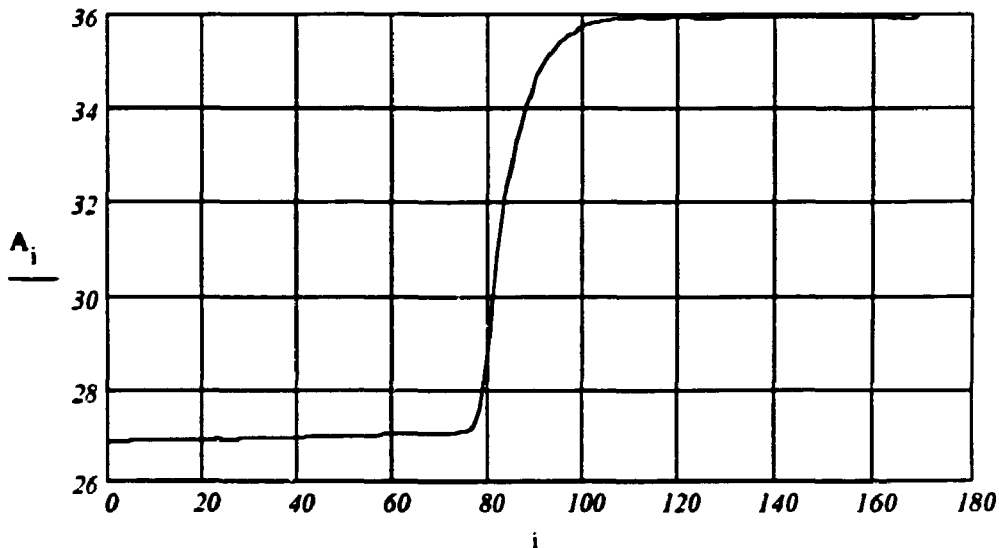
$dose = 8.007 \cdot 10^3$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$A = \text{READPRN}(I6MA)$

$n = \text{rows}(A)$

$i = 0..n-1$



$\min(A) = 26.875$

$\max(A) = 36.12$

$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$

$$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m1 + b1}{100} \right] \right] \cdot at$$

$E_{depcal} = 445.844$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$$

$Dose = 6.992 \cdot 10^3$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$I = 0.008$

corrente nominal do feixe = 8 mA

$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot an}{v \cdot af \cdot fda \cdot re}$

$E_{dep} = 680.723$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$dose = \frac{E_{dep}}{m}$

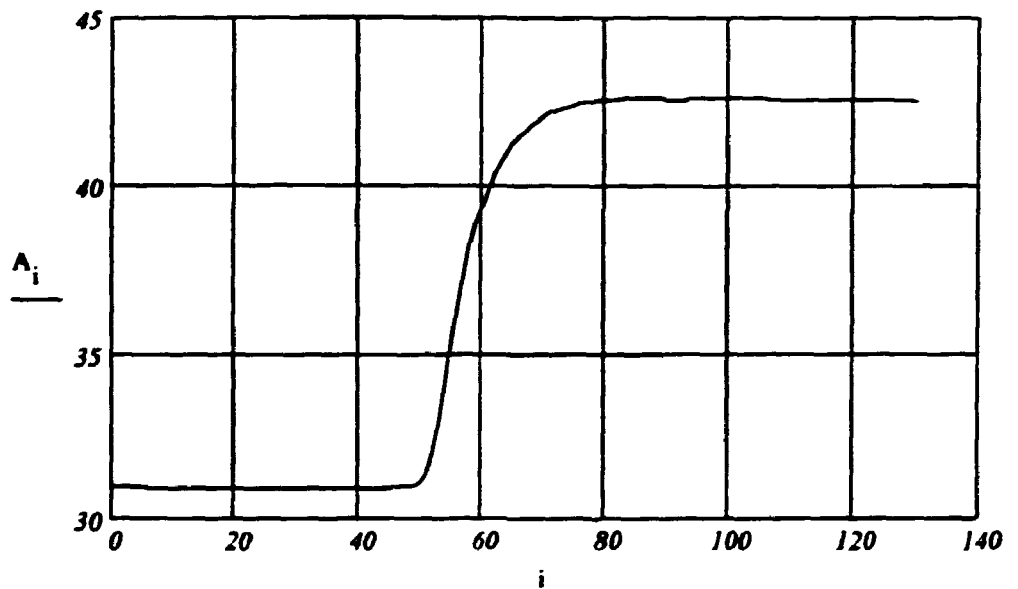
$dose = 1.068 \cdot 10^4$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$A = \text{READPRN}(18MA)$

$n = \text{rows}(A)$

$i = 0..n-1$



$\min(A) = 30.905$

$\max(A) = 42.914$

$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$

$$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m1 + b1}{100} \right] \right] \cdot at$$

$E_{depcal} = 589.007$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$

$Dose = 9.238 \cdot 10^3$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$$I := 0.010$$

corrente nominal do feixe = 10 mA

$$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot a_n}{v \cdot a_f \cdot f_{da} \cdot r_e}$$

$$E_{dep} = 850.903$$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$$dose = \frac{E_{dep}}{m}$$

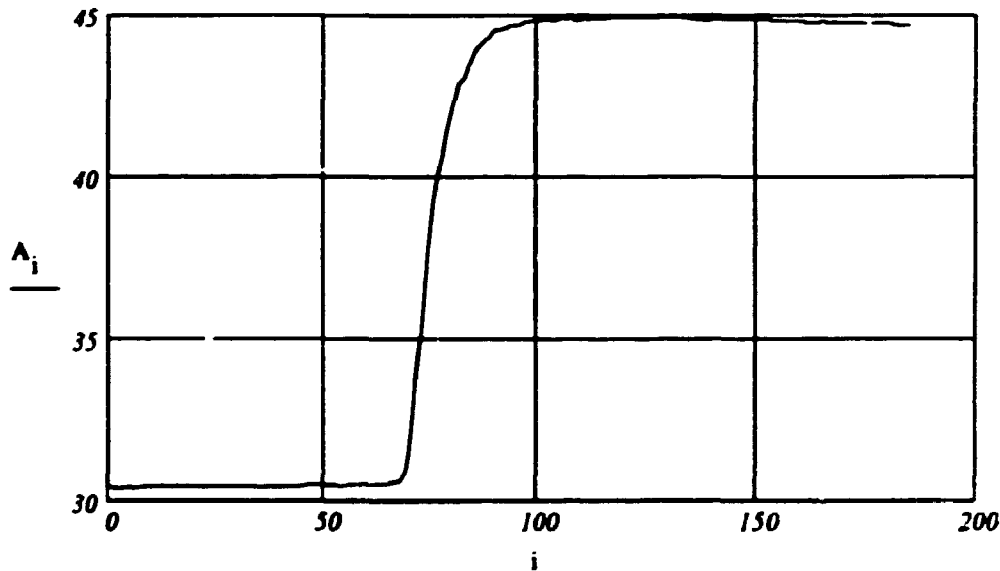
$$dose = 1.334 \cdot 10^4$$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$$A = \text{READPRN}(110MA)$$

$$n := \text{rows}(A)$$

$$i = 0..n-1$$



$$\min(a) = 30.1123$$

$$\max(A) = 44.997$$

$$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$$

$$E_{dep_{cal}} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m_i + b1}{100} \right] \right] \cdot a1$$

$$E_{dep_{cal}} = 731.755$$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$$Dose = \frac{E_{dep_{cal}}}{m}$$

$$Dose = 1.148 \cdot 10^4$$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$I = 0.012$

corrente nominal do feixe = 12 mA

$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot a_n}{v \cdot a_f \cdot f_{da} \cdot r_e}$

$E_{dep} = 1.021 \cdot 10^3$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$dose = \frac{E_{dep}}{m}$

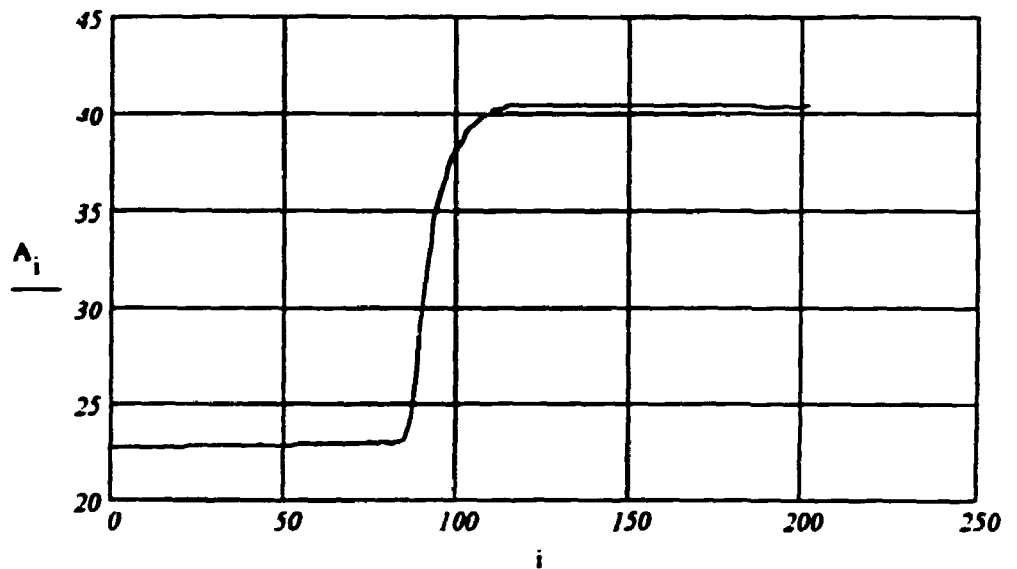
$dose = 1.601 \cdot 10^4$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorímetro [Gy]

$A = \text{READPRN}(I12MA)$

$n = \text{rows}(A)$

$i = 0..n - 1$



$\min(A) = 22.485 \quad \max(A) = 40.866$

$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$

$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m1 + b1}{100} \right] \right] \cdot a1$

$E_{depcal} = 886.903$

Energia depositada calculada pelo calorímetro [J].

$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$

$Dose = 1.391 \cdot 10^4$

Dose absorvida calculada pelo calorímetro [Gy]

$$I = 0.015$$

corrente nominal do feixe = 15 mA

$$E_{dep} = \frac{7 \cdot I \cdot E \cdot a \cdot n}{v \cdot a_f \cdot f_{da} \cdot r_e}$$

$$E_{dep} = 1.276 \cdot 10^3$$

Energia depositada pelos elétrons calculada pelos parâmetros do acelerador [J].

$$dose = \frac{E_{dep}}{m}$$

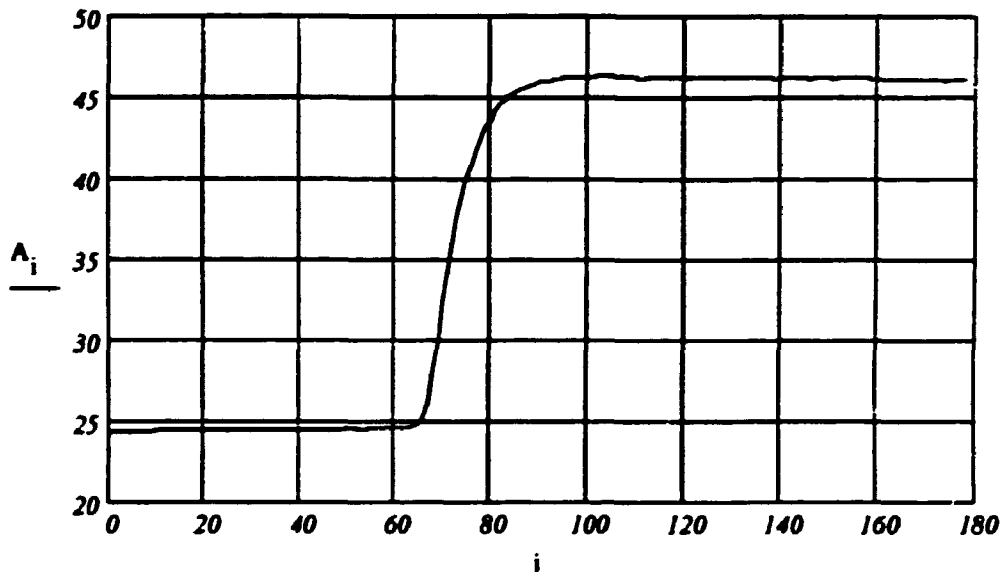
$$dose = 2.002 \cdot 10^4$$

Dose absorvida calculada pelos parâmetros do acelerador calorimetro [Gy]

$$A = \text{READPRN}(I15MA)$$

$$n = \text{rows}(A)$$

$$i = 0..n-1$$



$$\min(A) = 24.365$$

$$\max(A) = 47.052$$

$$j = (\min(A) \cdot 100) .. (\max(A) \cdot 100)$$

$$E_{depcal} = \left[\sum_j \left[\frac{\left[\frac{j}{100} + 273.3 \right] \cdot m1 + b1}{100} \right] \right] \cdot at$$

$$E_{depcal} = 1.109 \cdot 10^3$$

Energia depositada calculada pelo calorimetro [J].

$$Dose = \frac{E_{depcal}}{m}$$

$$Dose = 1.739 \cdot 10^4$$

Dose absorvida calculada pelo calorimetro [Gy]