

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia de Campinas
Departamento de Engenharia Mecânica

Projeto, Construção e Ensaio de um
Gerador de Raios-X de Laboratório

*Este exemplar corresponde à redação
final da tese defendida por Lourival Lins de Albuquerque
e aprovada pela Comissão Julgadora em
27 de fevereiro de 1986*

Augusto Luiz de Almeida

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-Graduação
da Faculdade de Engenharia de Campinas, como par
te dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

1985

U N I C A M P
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

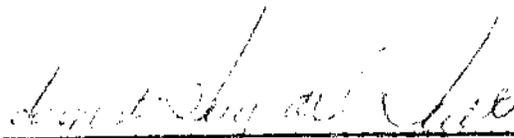
Tese de: Mestrado

Título da Tese: Projeto, Construção e Ensaio de um Gerador de Raios-X
de Laboratório

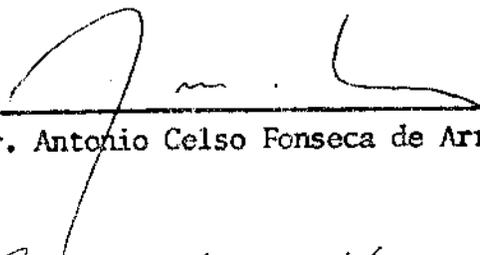
Autor: Lourival Lins de Albuquerque

Orientador: Prof. Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto

Aprovado por



Prof. Dr. Augusto Ruy de Oliveira Pinto, Presidente



Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda



Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan

Campinas, 16 de Abril 1986

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal o projeto e a construção de um gerador de raios-X de laboratório para uso industrial. A construção e o estudo feitos tem a sua justificativa no fato de haver grandes dificuldades para importação de equipamentos similares, pela necessidade do uso de aparelhos de difração de raios-X, relativamente simples e robustos na indústria brasileira. Finalmente, pela constatação feita neste estudo de que esses aparelhos podem, com exceção do tubo de raios-X, serem construídos inteiramente no Brasil com meios relativamente modestos.

Os testes foram satisfatórios. O equipamento foi projetado, construído e testado no Laboratório de Cristalografia do Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp, operando sob tensão de 40 KV, corrente de 20 mA. A avaliação de seu desempenho foi feita pela técnica de Laue, empregando-se um diagrama de difração de um cristal de silício orientado na direção [111]. Foi feito, também, um diagrama de difração de raios-X do mesmo cristal, pelo método de retro-reflexão, utilizando-se filme Polaroid.

ABSTRACT

The present work has as the main objective the design and the construction of a laboratory X-ray generator for industrial purposes. The construction and the study done has its justification on the fact that there are many difficulties for the importation of similar equipments, and by the necessity of the apparatus of X-ray diffraction not so sophisticated in the Brazilian industry, and finally by the possibility of construction of this equipment in Brazil, except the X-ray tube.

The prototype was designed, built and tested in the Crystallography Laboratory of Instituto de Física Gleb Wataghin of Unicamp. The results of tests were satisfactory. The equipment is operated at 40 KV and 20 mA. Experimental results obtained in this generator were made by back-reflection Laue pattern of silicon cristal on the orientation [111].

Í N D I C E

	Página
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos do trabalho	1
CAPÍTULO 2 - PRODUÇÃO, DETECÇÃO E APLICAÇÃO DOS RAIOS-X	3
2.1. Produção dos raios-X	3
2.1.1. Noções básicas	3
2.1.2. Espectro contínuo de raios-X	5
2.1.3. Espectro característico de raios-X	10
2.1.4. Filtros para raios-X	11
2.2. Detecção dos raios-X	19
2.2.1. Filmes utilizados em raios-X	19
2.2.2. Contadores quânticos para difratometria	21
2.2.2.1. Detetores de ionização	21
2.2.2.2. Detetores de estado sólido	23
2.3. Aplicações dos raios-X	27
2.3.1. Radiografia	27
2.3.2. Difração	27
2.3.3. Espectrometria	27
2.4. Referências bibliográficas	32
CAPÍTULO 3 - PROJETO E CONSTRUÇÃO DO GERADOR DE RAIOS-X	34
3.1. Vista geral	34
3.2. Construção da torre de raios-X	34
3.3. Dispositivo de abertura e fechamento para os raios-X ..	43
3.4. Circuito elétrico	45
3.4.1. Introdução	45
3.4.1.1. Dados de projeto do circuito retificador a ponte ..	49
3.4.1.2. Projeto do transformador de alta tensão	54
3.4.1.2.1. Introdução	54
3.4.1.2.2. Cálculo do transformador	55
3.4.1.2.3. Projeto do transformador de filamento	64
3.4.2. Operação do gerador de raios-X	68
3.5. Referências bibliográficas	70

	Página
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO DE LAUE PARA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	72
4.1. Método de Laue - parte teórica	72
4.1.1. Introdução	72
4.2. Aplicações da técnica de Laue	74
4.2.1. Introdução	74
4.2.2. Instrumentação	74
4.2.3. Realização da experiência	76
4.2.4. Análise dos resultados	76
4.3. Referências bibliográficas	79
 CAPÍTULO 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO GERADOR DE RAIOS-X FABRICADO	 80
5.1. Avaliação pelo método de Laue	80
5.2. Conclusões	80
CAPÍTULO 6 - DISCUSSÕES	83
ANEXO I - PRECAUÇÕES DE SEGURANÇA CONTRA AS RADIAÇÕES	84
Referências bibliográficas	92
 BIBLIOGRAFIA GERAL	 93

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1. Introdução

Em meados do século XVIII, eminentes físicos acreditavam que a natureza do mundo físico estava substancialmente entendida, faltando apenas detalhes e refinamentos. Estas idéias foram confirmadas por uma série de descobertas importantes tais como: radio (Hertz, 1887); um grupo de desconhecidos elementos químicos inertes; os raios-X (Roentgen, 1895); a radioatividade (Becquerel, 1896 ; os Curies, 1898); o elétron (Thomson, 1897); teoria quântica (Planck, 1900; Einstein, 1901); teoria da relatividade (Einstein, 1905); e os raios cósmicos (Hess, 1910).

A descoberta de Roentgen foi tão significativa como qualquer das acima mencionadas, e as potencialidades inestimáveis dos raios-X, tanto na teoria e prática da ciência, como na tecnologia e na medicina foram aplicadas imediatamente. Os raios-X foram amplamente empregados na radiografia médica e industrial, após um ano de sua descoberta. A difração dos raios-X e a espectrometria foram aplicadas em muitos laboratórios das universidades dentro de duas décadas; entretanto, as aplicações presentes destas disciplinas só foram possíveis, graças ao desenvolvimento dos tubos de raios-X e dos geradores, como também do equipamento de leitura e detecção.

1.2. Objetivos do trabalho

O objetivo básico do trabalho é o de desenvolver um gerador de raios-X nacional. Existem várias companhias estrangeiras que fabricam tais equipamentos, entretanto, a importação dos mesmos é incômoda, demorada e bastante onerosa para o país.

As etapas que constituem o trabalho de desenvolvimento do gerador de laboratório são as seguintes:

- 1º - Projeto e construção do transformador de alta tensão.
- 2º - Projeto e construção da torre onde se aloja o tubo de raios-X.
- 3º - Projeto e construção de um dispositivo metálico para a janela da torre por onde saem os raios-X.
- 4º - Projeto e construção do sistema de retificação na tensão de saída do transformador de alta tensão.
- 5º - Construção do circuito de refrigeração.

CAPÍTULO 2

PRODUÇÃO, DETECÇÃO E APLICAÇÃO DOS RAIOS-X

2.1. Produção dos raios-X

2.1.1. Noções básicas

Os raios-X são produzidos quando elétrons dotados de alta energia cinética colidem com um alvo metálico.

Os tubos de raios-X (fig. 2.1) consistem essencialmente de dois eletrodos, a saber: - um cátodo onde os elétrons são emitidos, sendo geralmente feito de tungstênio; - e de um ânodo (alvo metálico) que contém em sua extremidade um inserto metálico onde se chocam os elétrons.

Estes tubos de raios-X ficam sob vácuo, facilitando o movimento do fluxo de elétrons entre o cátodo e o ânodo. Com a passagem da corrente pelo filamento de tungstênio, o mesmo se aquece e emite elétrons que são acelerados pela diferença de potencial fornecida pelo transformador de alta tensão. Estes elétrons acelerados ao atingirem o alvo geram os raios-X. Portanto, a energia cinética destes elétrons acelerados é convertida em raios-X com uma eficiência bastante baixa (em torno de 1%) [1]. A maior parte desta energia é transformada em calor no tubo, sendo necessário a refrigeração do mesmo, evitando que o tubo de raios-X atinja altas temperaturas que diminuiriam a vida do mesmo, levando em casos extremos à sua fusão.

A fim de concentrar os elétrons, focalizando-os numa região do alvo, usa-se uma "lente" eletrostática (fig. 2.1).

Diferentes formas e dimensões do foco são projetados para diferentes usos do tubo. Um tubo convencional de difração de raios-X apresenta-se com quatro janelas, por onde saem os feixes de raios-X. Apresentamos um desenho esquemático, mostrando o interior do tubo para a compreensão da geometria dos focos linear e pontual (fig. 2.2).

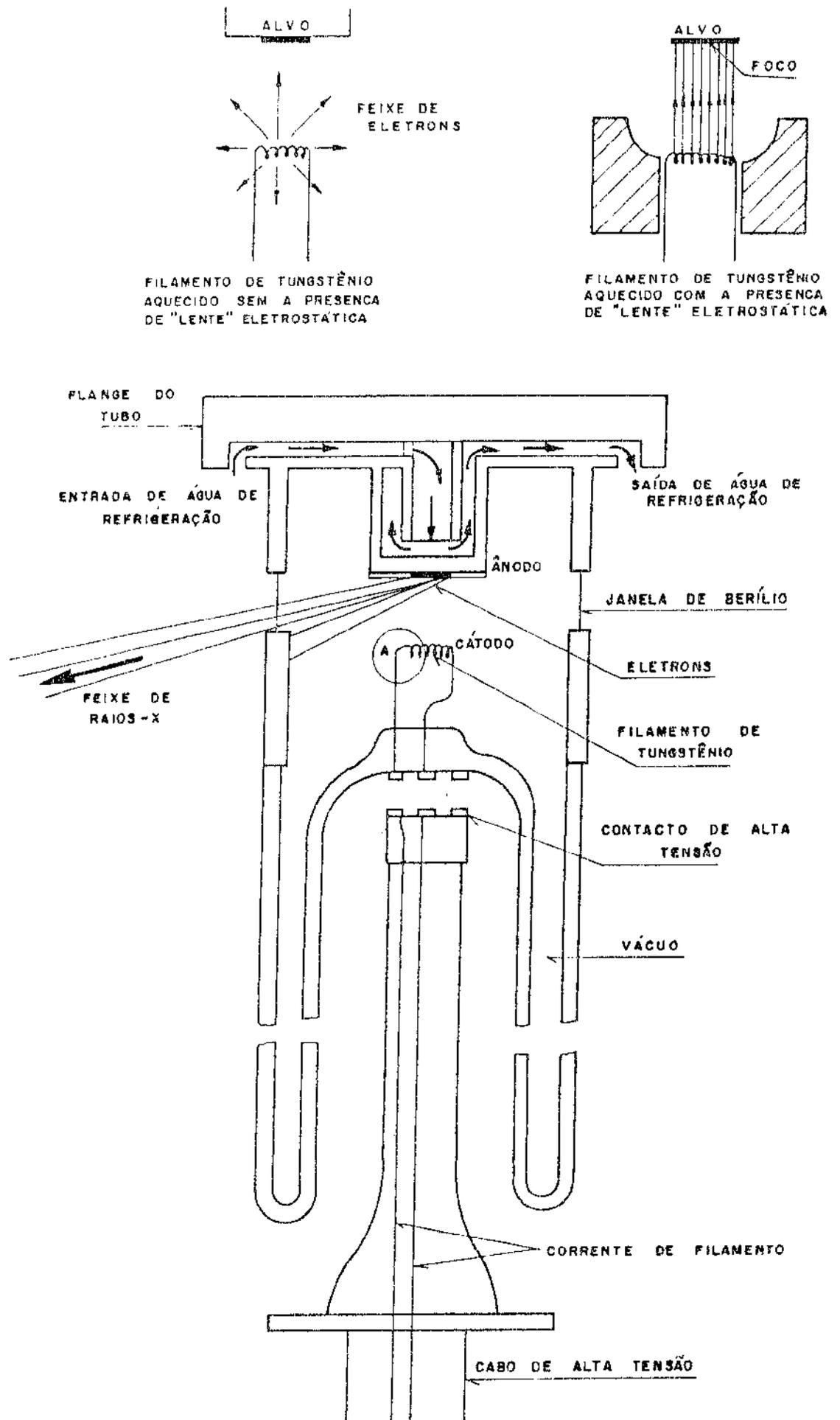


Figura 2.1. Esquema de um tubo de Raios-X para difração [2].

Observando o foco ao longo da linha \overline{AA} (fig. 2.2) temos como projeção uma linha, ou seja, foco linear. Ao longo da linha \overline{BB} (fig. 2.2), temos como projeção uma área pequena denominada foco pontual.

O ângulo entre o feixe de raios-X e a superfície do alvo varia numa faixa entre 6° - 20° ; um foco de dimensões 1 mm x 10 mm visto a 6° fornece um feixe de raios-X altamente concentrado de secção transversal 1 mm x 1 mm [3,4]. Eles são adequados para a maioria dos métodos de difração. Recentemente, os denominados tubos microfocos com dimensões de foco menores (por exemplo 0,4 mm x 8,0 mm) tem sido utilizados para fornecer feixes mais estreitos. Estes tubos são mais eficientes para o estudo de monocristais pequenos do que os tubos padrões [5].

2.1.2. Espectro contínuo de raios-X

Os vários tipos de radiações que fazem parte do espectro eletromagnético são agrupados e classificados de acordo com o comprimento de onda (tabela 2.a). Os componentes deste espectro eletromagnético tem dupla natureza. Sob algumas condições eles são considerados como ondas. Por exemplo, o estudo da difração dos raios-X é baseado na consideração de que os mesmos são de natureza ondulatória. Sob outras condições eles se comportam como partículas: suas energias não são irradiadas continuamente, mas sim em pacotes de energia denominados quanta ou fótons. A energia de um quantum é proporcional ao comprimento de onda da radiação, segundo a equação de Einstein [7]:

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

onde:

E = energia de cada quantum

h = constante de proporcionalidade de Planck = $6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s

c = velocidade da luz = $3 \cdot 10^8$ m/s

λ = comprimento de onda da radiação [\AA]

$\frac{c}{\lambda} = \nu$ = frequência da radiação [s^{-1}]

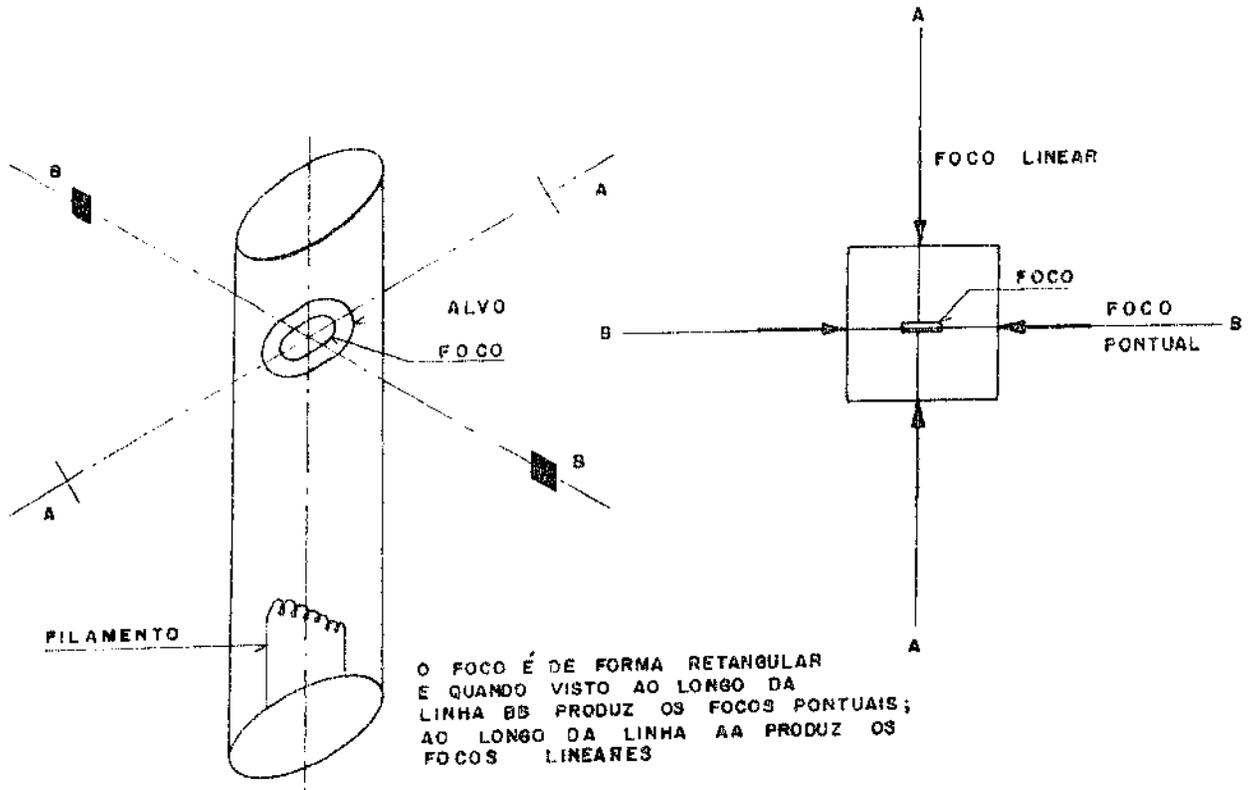


Figura 2.2. Determinação dos focos linear e pontual [2,6].

Radiação	Comprimento de Onda (Å)
Raios- γ	0,0056 - 0,1
Raios-X	0,1 - 45
Raios Ultravioleta	45 - 3500
Luz Visível	3500 - 7000
Raios Infravermelhos	7000 - 2000000

Tabela 2.a. Comprimento de onda dos diversos tipos de radiações eletromagnéticas [3].

Um elétron ao entrar no campo elétrico ao redor do núcleo de um átomo do alvo do tubo de raios-X sofre uma perda de energia. Como consequência há emissão de um quantum de radiação-X, cujo comprimento é dado pela equação (2.1).

Se o elétron for freiado instantaneamente, o quantum de energia emitido é igual a energia do elétron (e.V) onde e é igual a carga do elétron ($1,602 \cdot 10^{-19}C$) e V a diferença de potencial entre o cátodo e ânodo. Portanto a radiação tem comprimento de onda (λ_{\min}), calculado pela equação (2.1):

$$\lambda_{\min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot V} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J-s} \cdot 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,602 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{V} \cdot V \text{ (volts)}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{12.400}{V(\text{volts})} \quad [\text{\AA}] \quad (2.2)$$

ou frequência máxima (ν_{\max}) dada pela relação

$$\nu_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

Entretanto, nem todos os elétrons são desacelerados instantaneamente, e a energia destes é perdida em degraus por uma série de choques. Portanto, somente uma fração de sua energia total (e.V) é emitida como radiação e o fóton produzido tem energia menor do que (e.V). Os raios-X correspondentes tem uma frequência menor do que ν_{\max} e portanto comprimento de onda maior do que λ_{\min} .

O gráfico da intensidade da radiação versus comprimento de onda (fig. 2.3) é uma curva suave que começa com o comprimento de onda mínimo (energia quântica máxima), passa por um máximo (energia quântica média) e decresce novamente com o aumento do comprimento de onda. Um aumento na tensão do tubo de raios-X aumenta a velocidade de bombardeio dos elétrons; consequentemente a intensidade total da radiação é aumentada e o comprimento de onda limite e a intensidade máxima do espectro saltam para comprimentos de onda menores.

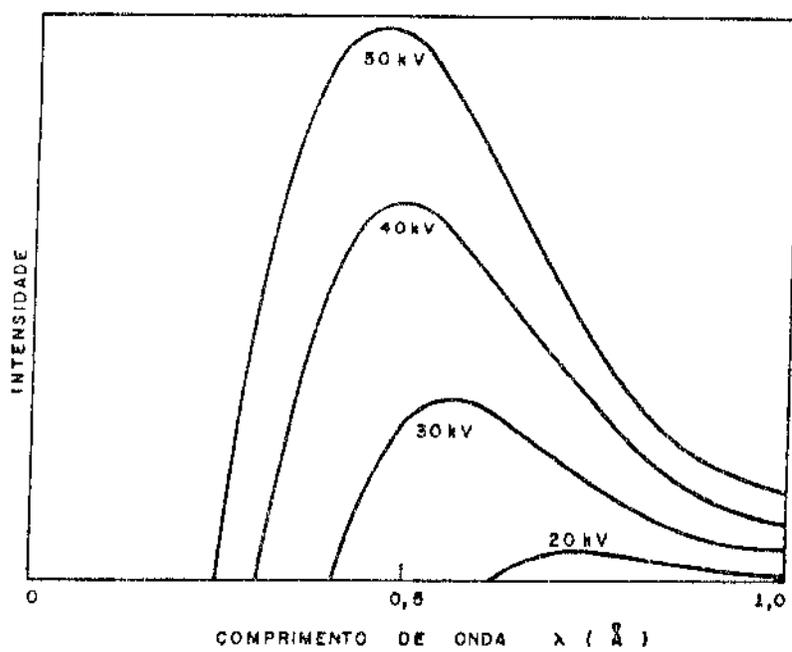


Figura 2.3. Distribuição da intensidade de radiação versus comprimento de onda no espectro contínuo de um tubo submetido a diferentes tensões [3].

A distribuição do comprimento de onda do espectro contínuo independe do material do alvo. Já a intensidade total da radiação é proporcional ao número atômico do material. O alvo num tubo de raios-X que funciona como emissor do espectro contínuo é feito de um elemento pesado (exemplo: tungstênio, molibdênio).

2.1.3. Espectro característico de raios-X

Ào se aumentar a voltagem até um valor crítico, que depende do elemento do alvo, começam a aparecer picos pontiagudos na curva do espectro contínuo. Os mesmos ocorrem em séries designadas por K, L, M e N em ordem de aumento de comprimento de onda.

Os picos para um dado elemento do alvo sempre ocorrem com os mesmos comprimentos de onda e formam o espectro característico.

O espectro característico é produzido quando os elétrons de bombardeamento tem energia suficiente para penetrar o interior dos átomos do alvo e deslocar elétrons dos níveis de energia mais interno.

Um átomo pode ser imaginado como contendo um núcleo em torno do qual giram os elétrons. A camada K apresenta-se com dois elétrons, a camada L com oito elétrons, a camada M com dezoito elétrons e a N com trinta e dois elétrons. Os elétrons da camada K são os mais difíceis de se arrancar. Um elétron expelido deve ser substituído, e a probabilidade é que este vazio seja preenchido por elétrons da camada próxima mais externa. Isto cria um novo vazio, que é preenchido por um elétron da próxima camada, e então o átomo volta ao seu estado normal numa série de degraus.

As intensidades relativas dos picos numa série K, L, M e N são devidas à probabilidade relativa dos elétrons de várias camadas se deslocarem para substituírem elétrons arrancados das camadas mais internas. Portanto, esta intensidade depende do número de elétrons em cada subnível de energia. Os elétrons ao se deslocarem para uma camada mais interna, passam para um nível de energia menor e esta mudança é acompanhada pela emissão de energia na forma de radiação-X, cujo comprimento de onda é precisamente dado pela diferença de energia entre os níveis eletrônicos correspondentes. Os elétrons da camada L, ao substituírem

elétrons da camada K, geram o pico K_{α} que é um pico duplo, constituído por $K_{\alpha 1}$ e $K_{\alpha 2}$. Os elétrons dos níveis energéticos M, N ao substituírem elétrons da camada K, geram os picos K_{β} e K_{γ} , os quais são picos duplos também. O total destas transferências dá origem ao espectro característico K.

Os valores práticos e úteis dos comprimentos de onda utilizados nos experimentos de difração de raios-X, localizam-se numa faixa entre 0,7 a 2,3 Å, uma vez que as radiações de comprimento de onda maiores são fortemente absorvidas pelas janelas do tubo de raios-X e pelo ar [8] e as radiações de comprimentos de onda menores do que 0,5 Å são acompanhadas por quantidade grande de radiação policromática (radiação com a presença de vários comprimentos de onda) [8].

A explanação supracitada justifica porque somente o espectro K, particularmente os picos K_{α} e K_{β} tem significado no estudo da difração de raios-X.

A tensão mínima a ser aplicada no tubo de raios-X (também chamado potencial de excitação) a fim de fornecer energia suficiente para a corrente de elétrons excitar o espectro K é dada pela equação 2.2

$$V_{\min} = \frac{12.400}{\lambda_K} \quad (2.2)$$

onde: $V = \text{Volts}$ e $\lambda = \text{Å}$.

λ_K corresponde ao comprimento de onda característico do elemento do alvo. Estes valores de λ_K e de V_{\min} são tabelados.

Um feixe de raios-X submetidos a um potencial de excitação maior do que V_{\min} contém não somente a linha característica K_{α} , como também a linha K_{β} mais fraca e o espectro contínuo.

2.1.4. Filtros para Raios-X

A maior parte das experiências de difração de raios-X necessita de radiação monocromática. Há necessidade de se diminuir as intensidades das radiações indesejáveis como a da linha K_{β} e do espectro contínuo em relação à intensidade da

radiação característica K_{α} . Por isso, passamos o feixe de raios-X por um filtro feito de um material, cujo coeficiente de borda de absorção situa-se entre os comprimentos de onda das linhas características K_{α} e K_{β} do material do alvo. Um filtro assim escolhido absorverá a componente K_{β} mais do que a componente K_{α} . O elemento Níquel (Ni) por exemplo, tem um coeficiente de absorção de $1,49 \text{ \AA}$ entre os comprimentos de onda de radiação $\text{Cu}_{K_{\alpha}}$ ($1,5418 \text{ \AA}$) e $\text{Cu}_{K_{\beta}}$ ($1,3922 \text{ \AA}$) (fig. 2.4).

O elemento níquel é transparente a radiação K_{α} absorvendo fortemente a componente K_{β} do feixe de raios-X de um alvo de cobre. Ele também reduz a intensidade do espectro contínuo e naturalmente a intensidade da componente K_{α} do feixe.

Denominamos as intensidades de um feixe de raios-X, incidindo em um material de espessura \underline{x} , antes e depois de I_0 e I respectivamente, então [9]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

onde:

- I_0 = intensidade do feixe incidente
- I = intensidade do feixe transmitido
- μ = coeficiente de absorção linear do material

Este coeficiente (μ) depende da densidade (ρ) do absorvedor. O coeficiente de absorção de massa (μ/ρ) é uma constante do material, independente do seu estado físico (sólido, líquido ou gás). Uma fórmula mais útil de apresentar a relação de absorção é:

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho \cdot x} \quad (2.4)$$

A maneira como o coeficiente de absorção de massa varia com o comprimento de onda é uma indicação da interação dos raios-X e os átomos do material. A fig. (2.5) mostra esta variação para um filtro de níquel, (esta curva é típica para

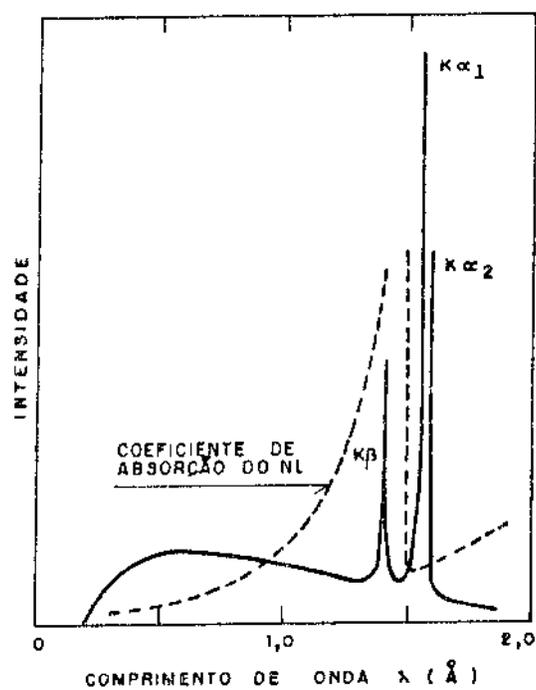


Figura 2.4. Curva de absorção para o filtro de níquel superposta ao espectro contínuo e característico de um tubo com alvo de cobre [8].

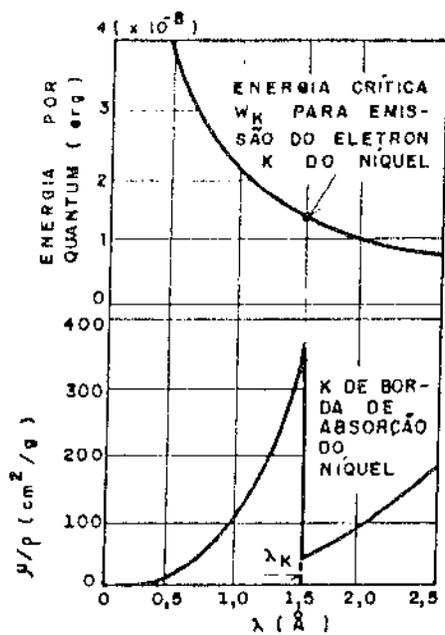


Figura 2.5. Variação com comprimento de onda da energia por quantum de raios-X e do coeficiente de absorção de massa do níquel [9]. O alvo do tubo de raios-X é de cobre.

todos os materiais)[9]. A curva consiste de dois ramos separados por uma descontinuidade, chamado coeficiente de borda de absorção.

Em cada ramo o coeficiente de absorção de massa varia com o comprimento de onda aproximadamente de acordo com a relação [9]

$$\frac{\mu}{\rho} = K \lambda^3 Z^3 \quad (2.5)$$

onde:

K = é uma constante com valores diferentes para cada ramo da curva

Z = número atômico do material.

Os raios-X de comprimento de onda curtos são mais penetrantes e são chamados duros (hard), já os de comprimento de onda longos são facilmente absorvidos e são chamados moles (soft).

Uma espessura de filtro que aumenta a razão de intensidade K_{α}/K_{β} a um valor de 100/1 no feixe transmitido, geralmente é recomendado [10]. Infortunadamente, a intensidade da componente K_{α} é mais do que dividida ao meio no processo (fig.2.6).

Convém lembrar que diferentes espessuras requeridas e fatores de transmissão para a linha K_{α} destes filtros são projetados em função do material que constitui o alvo do tubo de raios-X. Estes valores estão contidos nas Tabelas Internacionais de Raios-X (tabela 2.b).

Parrish e Taylor [13] sugeriram uma espessura de filtro suficiente somente para aumentar a razão de 100/1. Os efeitos de difração K_{β} não são suprimidos, aparecendo em associação com os efeitos fortes de K_{α} sendo facilmente reconhecidos. A perda da intensidade de K_{α} é considerável segundo se vê na tabela (2.c).

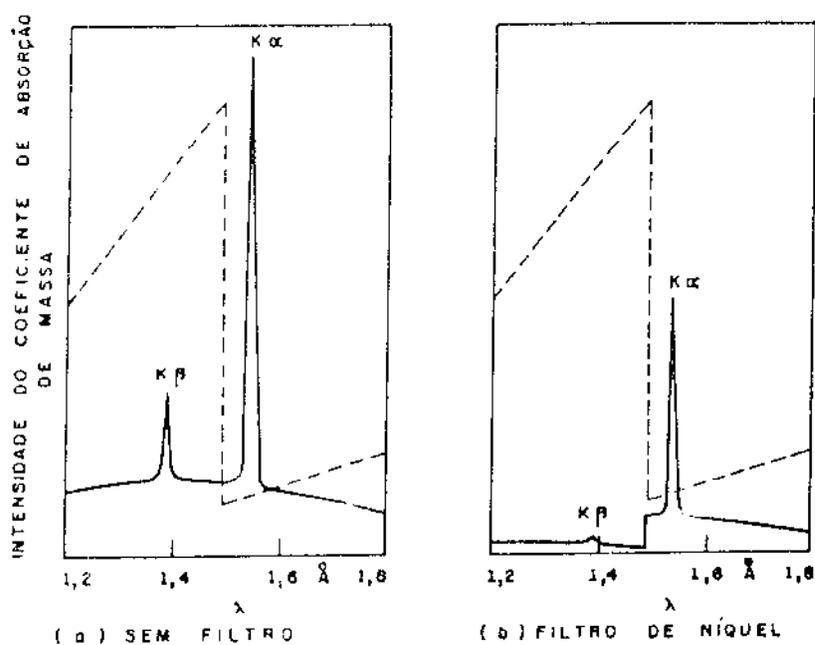


Figura 2.6. Comparação do espectro de radiação do cobre a) sem filtro e b) após a passagem através de um filtro de níquel [11] (esquemático).
A linha pontilhada é o coeficiente de absorção de massa do níquel.

Alvo	Filtro	Espessura do filtro para $I(K\beta_1)/I(K\alpha_1)=1/500$ no feixe transmitido		% de perda $K\alpha_1$
		mg/cm ²	mm	
Mb	Zr	78	0,120	71
Cu	Ni	20	0,023	60
Co	Fe	15	0,019	54
Fe	Mn	13	0,018	53
Cr	V	10	0,017	51

Tabela 2.b. Filtros para supressão da radiação $K\beta$ [12].

Alvo	Filtro	Espessura do filtro para $I(K\beta_1)/I(K\alpha_1)=1/100$ no feixe transmitido		% de perda $K\alpha_1$
		mg/cm ²	mm	
Mo	Zr	53	0,081	57
Cu	Ni	13	0,015	45
Co	Fe	9	0,012	39
Fe	Mn	8	0,011	38
Cr	V	7	0,011	37

Tabela 2.c. Perda da intensidade de radiação $K\alpha$ com o uso de filtros [12].

2.2. Detecção dos raios-X

As medidas das intensidades de raios-X, indispensáveis para a análise dos materiais pode ser feita com filmes fotográficos ou contadores quânticos. Também, usam-se telas fluorescentes que são usadas para observar a localização do feixe direto de raios-X.

2.2.1. Filmes utilizados em raios-X

Os filmes comuns utilizados em raios-X apresentam as seguintes características [14]: a) são formados por uma base transparente com espessura da ordem de 200 μm ; b) são constituídos por uma camada de emulsão foto sensível em ambos os lados da base, com espessura de aproximadamente 20 μm . Esta emulsão é formada por uma suspensão de pequenos cristais de brometo de prata embebidos em gelatina. Em alguns casos, usa-se filmes com apenas uma camada de emulsão depositada sobre a base, sendo que os mesmos possuem além da base e da emulsão uma camada de gelatina para proteção de mais ou menos 10 μm de espessura.

Após ser submetido a ação da radiação o filme fotográfico passa pelo processo de revelação, através do qual os cristais expostos separam-se da emulsão contendo brometo de prata e escurecem o filme, permitindo obter uma imagem em negativo, que é um conjunto de pontilhados formados de grãos negros de prata metálica. De acordo com o tipo de radiação empregada são usados diferentes tipos de filmes, segundo a tabela 2.d.

As vantagens que se obtêm com a utilização de filmes na detecção de radiações são:

- a) Pode-se acumular por várias horas a ação das radiações, permitindo detectar intensidades muito fracas.
- b) O filme conserva o registro preciso e permanente da ação das radiações.
- c) A medida das densidades de enegrecimento podem ser feitas, posteriormente ao registro.

Tipo de radiação	Tipo de filme
Luz visível e Raios-X	filmes comuns com gelatina e brometo de prata
Radiações Ultravioletas	filmes com substâncias fluorescentes a essa radiação depositadas sobre a camada de gelatina
Radiações Vermelhas até Infravermelhas	filmes com sensibilizadores, que são matérias corantes acrescentadas à emulsão comum

Tabela 2.d. Filmes usados para os diversos tipos de radiações [14].

2.2.2. Contadores quânticos para difratometria

Os contadores quânticos fornecem a detecção e a medida da intensidade dos raios-X, baseando-se na conversão dos fótons individuais de raios-X em pulsos de voltagem. Os mesmos são contados e integrados por equipamento de contagem dando várias formas de indicação visual da intensidade de raios-X. Há dois tipos de detectores que são usados:

- os detectores de ionização (câmara de ionização, contador proporcional, contador Geiger-Müller);
- e os detectores de estado sólido (telas fluorescentes, contadores de cintilação, detectores fotoelétricos).

2.2.2.1. Detectores de ionização

Os detectores de ionização consistem de um tubo com gás rarefeito, cuja superfície externa funciona como cátodo. O ânodo consiste de um fio fino metálico coaxial com esta superfície cilíndrica (fig. 2.4). O gás rarefeito ao ser penetrado por um quantum de raios-X sofre ionização, gerando elétrons livres e íons positivos. Na presença de um campo elétrico os mesmos se separam, indo os íons positivos para a superfície externa (cátodo) e os elétrons para o ânodo, gerando um pulso elétrico no circuito externo. A amplitude deste pulso é fixada pela ionização inicial, sendo proporcional à energia do fóton de raios-X que iniciou a ionização.

Câmara de ionização

A uma diferença de potencial de 200 V, os elétrons e íons serão coletados nos eletrodos e, se a intensidade dos raios-X for constante, uma pequena corrente da ordem de 10^{-12} A passará pela resistência R (fig. 2.7). Esta corrente é uma medida da intensidade dos raios-X.

Contador proporcional

A câmara de ionização pode tornar-se um contador proporcional se a voltagem aplicada nos eletrodos variar em torno de 600 a 900 V. Este fato é devido a ionização por colisão que, se a diferença de potencial for suficiente alta, é cumulativa e conduz a uma avalanche de elétrons.

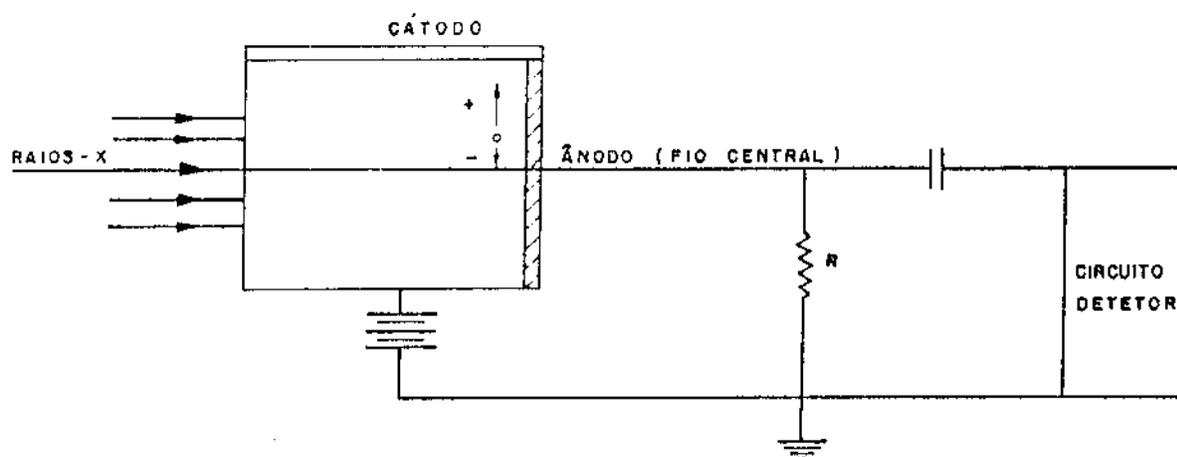


Figura 2.7. Detetor de ionização [1].

O número de íons produzido por íon primário, constitui o que se chama fator de ampliação a gás (A) podendo assumir valores acima de 10^4 ou 10^5 (fig. 2.8).

Contador Geiger-Müller

Se a diferença de potencial num contador proporcional for aumentada acima de um valor, a proporcionalidade desaparece. Eventualmente, uma escala de diferenças de potencial é atingida de tal modo que o tamanho do pulso é independente do número de íons primários formados. Esta região de Geiger-Müller, cujas características são melhores compreendidas pela medida do número de pulsos por segundo (fig. 2.9).

2.2.2.2. Detetores de estado sólido

Os detetores de estado sólido são compostos, basicamente de dois elementos: um cristal e um tubo fotomultiplicador. A conversão da energia dos fótons de raios-X em pulsos de voltagem é feita em duas etapas. Na primeira etapa os fótons de raios-X são convertidos em flashes de radiação luminosa por uma substância fosforescente que é capaz de absorver radiação de um certo comprimento de onda e depois reemitir a um comprimento de onda maior. A substância fosforescente é o cristal de iodeto de sódio dopado com tálio que emite comprimento de onda da ordem de 4100 \AA . Na segunda etapa a luz azul procedente da substância fosforescente é convertida em pulsos de voltagem por meio de um tubo fotomultiplicador (fig. 2.10).

Os fótons de luz passam pelo cátodo do tubo fotomultiplicador e, aproximadamente para dez fótons um elétron é liberado do mesmo, que ao incidir no primeiro dínodo produz um número definido de elétrons secundários que por sua vez ao incidirem no segundo dínodo produzirão novos elétrons que incidirão no terceiro dínodo e assim por diante. Esta série de eletrodos chamados dínodos estão mantidos a um potencial de aproximadamente 100 V em relação ao precedente, estando o último dínodo conectado ao circuito de medida onde o pulso é amplificado. O fator de ampliação ou ganho total num tubo fotomultiplicador com dez estágios de dínodos é da ordem de 10^7 [15]. O ânodo recebe a avalanche de elétrons, resultando um pulso que é amplificado para operar os circuitos de contagem no difratômetro.

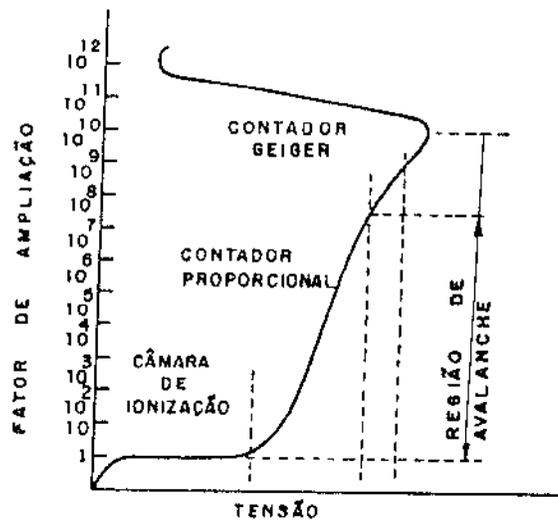


Figura 2.8. Fator de ampliação em função da tensão aplicada [1].

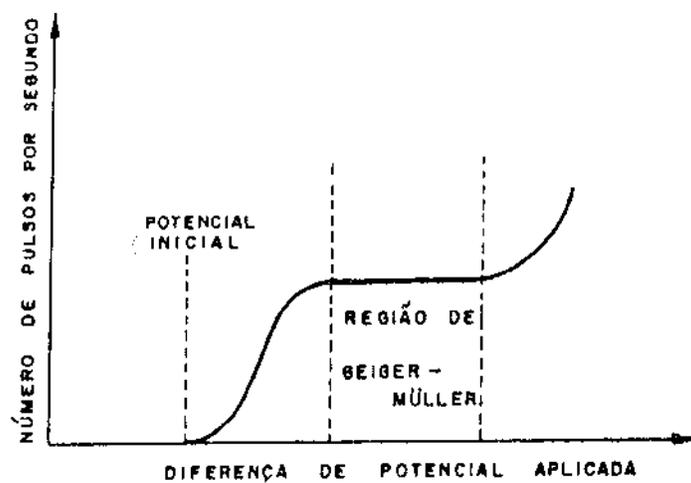


Figura 2.9. O contador de Geiger Müller [4].

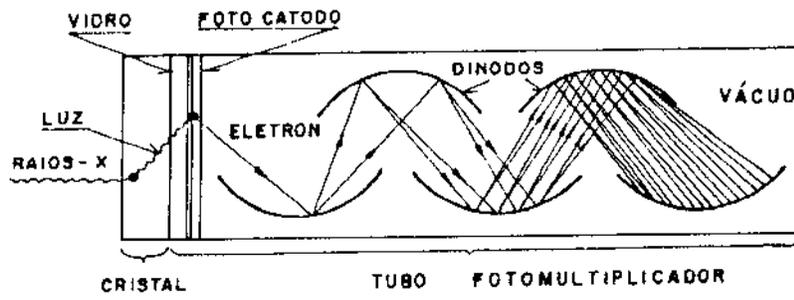


Figura 2.10. Detetor de estado sólido [1].

2.3. Aplicações dos raios-X

2.3.1. Radiografia

A radiografia foi a primeira aplicação dos raios-X e é ainda hoje uma das mais importante. O princípio da mesma é simples; consiste em passar um feixe de radiação através de um objeto (fig. 2.11); a radiação transmitida é recebida num filme ou num anteparo fluorescente.

Pode-se medir ou detetar: - defeitos internos, porosidades, inclusões, trincas, variações de geometria, corrosão, variações de densidade.

2.3.2 Difração

Provavelmente a difração, constitui a maior parte das aplicações do raio-X, indo desde a determinação real da estrutura dos cristais e a orientação dos mesmos até a análise química, investigação do equilíbrio de fase, o estudo da deformação plástica, etc... A difração ocorre quando a lei de Bragg, for satisfeita [17]

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.6)$$

Uma maneira de se obter todos os raios difratados é variar continuamente λ (comprimento de onda da radiação utilizada) ou θ (ângulo de incidência da radiação sobre o cristal) durante o experimento. O modo como essas grandezas são variadas distingue os métodos de difração (tabela 2.e).

2.3.3. Espectrometria

A espectrometria dos raios-X, baseia-se no seguinte princípio: qualquer elemento ao ser bombardeado com elétrons de elevada energia emite o espectro de linha característica. Elas são chamadas de linha característica para enfatizar o fa-

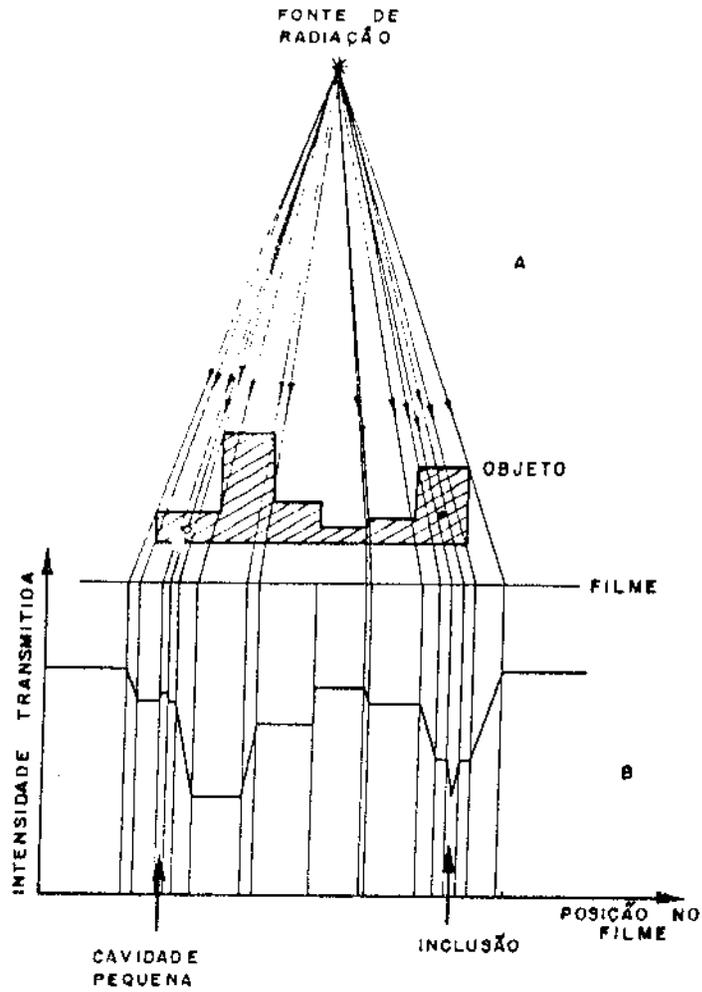


Figura 2.11. Ilustração do princípio da radiografia [16]:

A - Arranjo experimental;

B - Intensidade transmitida em função da posição do filme.

Nome da técnica	λ	θ	Registro
Método do Cristal Fixo (Laue)	Variável	Fixo	Fotografia
Rotação do Cristal e filme estacionário ou detector	Fixo	Variável	Fotografia ou contador Geiger
Rotação do Cristal e movimento do filme ou detector	Fixo	Variável	Filme cilíndrico ou contador Geiger Filme plano
Orientação ao acaso	Fixo	Variável	Fotografia ou contador Geiger

Tabela 2.e. Classificação das principais técnicas de difração dos raios-X [18].

to de que seus comprimentos de onda são fixados, característicos do elemento emissor. Neste fenômeno temos a base para um método de análise química. Se os vários elementos na amostra a ser analisada emitirem suas linhas características por bombardeamento de raios-X, esses elementos podem ser identificados, analisando-se a radiação emitida e mostrando que estes comprimentos de onda específicos estão presente. A análise é feita num espectrômetro de raios-X, pela difração da radiação pelos planos da rede de espaçamento d conhecido num cristal analisador (fig. 2.12). Segundo a lei de Bragg, a radiação de um comprimento de onda definido é refletida para cada conjunto angular do cristal e a intensidade desta radiação pode ser medida com um detetor (fig.2.10). A análise da amostra pode ser qualitativa, se as várias linhas características no espectro emitido são simplesmente identificadas, ou quantitativa, se as intensidades dessas linhas são comparadas com as intensidades das linhas de um padrão.

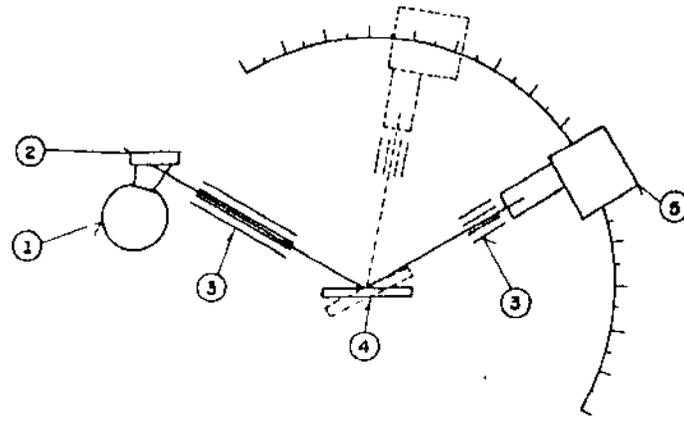


Figura 2.12. Espectrômetro com cristal analisador plano [19].

2.4. Referências bibliográficas

- [1] CULLITY, B.D. Elements of x-ray diffraction. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967, p. 4, 10-11, 16-17, 190-202.
- [2] DIFFRACTION X-Ray Tubes. Rigaku Denki, Kogyo Co. Ltd. (Instruction Manual n. ME 910 AB), p. 4-8.
- [3] NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966, p. 42-44.
- [4] BROWN, J.G. X-rays and their applications. New York, Plenum Press, 1966, p. 20, 44.
- [5] NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966, p. 43.
- [6] JENKINS, R. & VRIES, J.L. X-ray powder diffractometry; an introduction to Eindhoven-Holland, N.V. Philips Gloeilampenfabrieken, p. 20.
- [7] BRANSON, L.K. Introduction to electronics. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1967, p. 237.
- [8] NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966, p. 35, 39.
- [9] CULLITY, B.D. Elements of x-ray diffraction. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967, p. 11.
- [10] NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966, p. 40.
- [11] CULLITY, B.D. Elements of x-ray diffraction. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967, p. 16.

- [12] INTERNATIONAL, Tables for X-ray crystallography. Birmingham England, Kynoch Press, 1968, v. 3, p. 75.
- [13] PARRISH, W. & TAYLOR J. Norelco Reporter, 3,(6): 105, 1956.
- [14] CARIXOSO, L.P. Microdensitometria de filmes de raios-X, usando raios-X. Campinas (SP), Instituto de Física, 1976, p. 11-13, Tese (Mestrado), Instituto Física Gleb Wataghin - UNICAMP.
- [15] AZAROFF, L.V. Elements of x-ray crystallography. New York, Mc-Graw-Hill, 1968, p. 351.
- [16] BROWN, J.G. X-rays and their applications. New York, Plenum Press, 1966, p. 166.
- [17] WOOLFSON, M.M. An introduction to x-ray crystallography. London, Cambridge University Press, 1970, p. 75-78.
- [18] INTERNATIONAL Tables for X-ray Crystallography. Birmingham England, Kynoch Press, 1972, v. 2, p. 161-163.
- [19] MÜLLER, R.O. Spectrochemical analysis by x-ray fluorescence. New York, Plenum Press, 1972, p. 92.

CAPÍTULO 3

PROJETO E CONSTRUÇÃO DO GERADOR DE RAIOS-X

3.1. Vista geral

O gerador de raios-X cujo projeto e construção formam a parte fundamental deste trabalho será descrito neste capítulo. Na figura 3.1 é apresentada uma vista geral do equipamento, mostrando as diversas partes que o compõe:

- Componentes Estruturais e Acessórios
- Torre de Raios-X
- Circuito Elétrico
- Circuito de Refrigeração

A estrutura da mesa é feita com aço em perfil LI (fig. 3.2) de modo que as tam_{pas} dianteira e traseira foram usadas para sustentar os circuitos elétricos e de refrigeração. Na tampa desta mesa encontra-se fixada a torre (fig. 3.3), que contém as janelas por onde saem os feixes de raios-X passando a seguir pelos colimadores. Na fig. 3.4 tem-se o transformador de alta tensão e os componentes elétricos do painel. Na fig. 3.5 observa-se o cabo do transformador de alta tensão proveniente do transformador e terminando no acoplamento com a base da torre de raios-X.

3.2. Construção da torre de raios-X

A torre de raios-X, cuja função é a de alojar o tubo de raios-X, é uma peça fun_{damental} do equipamento (fig. 3.8). Na sua parte superior se localiza o dispositivo da janela dos raios-X. Lateralmente, na parte médio inferior se localiza o trilho-guia, feito de latão laminado [1,2], para a montagem do experimento das técnicas de raios-X. Em sua base é rosqueado o cabo de alta tensão.

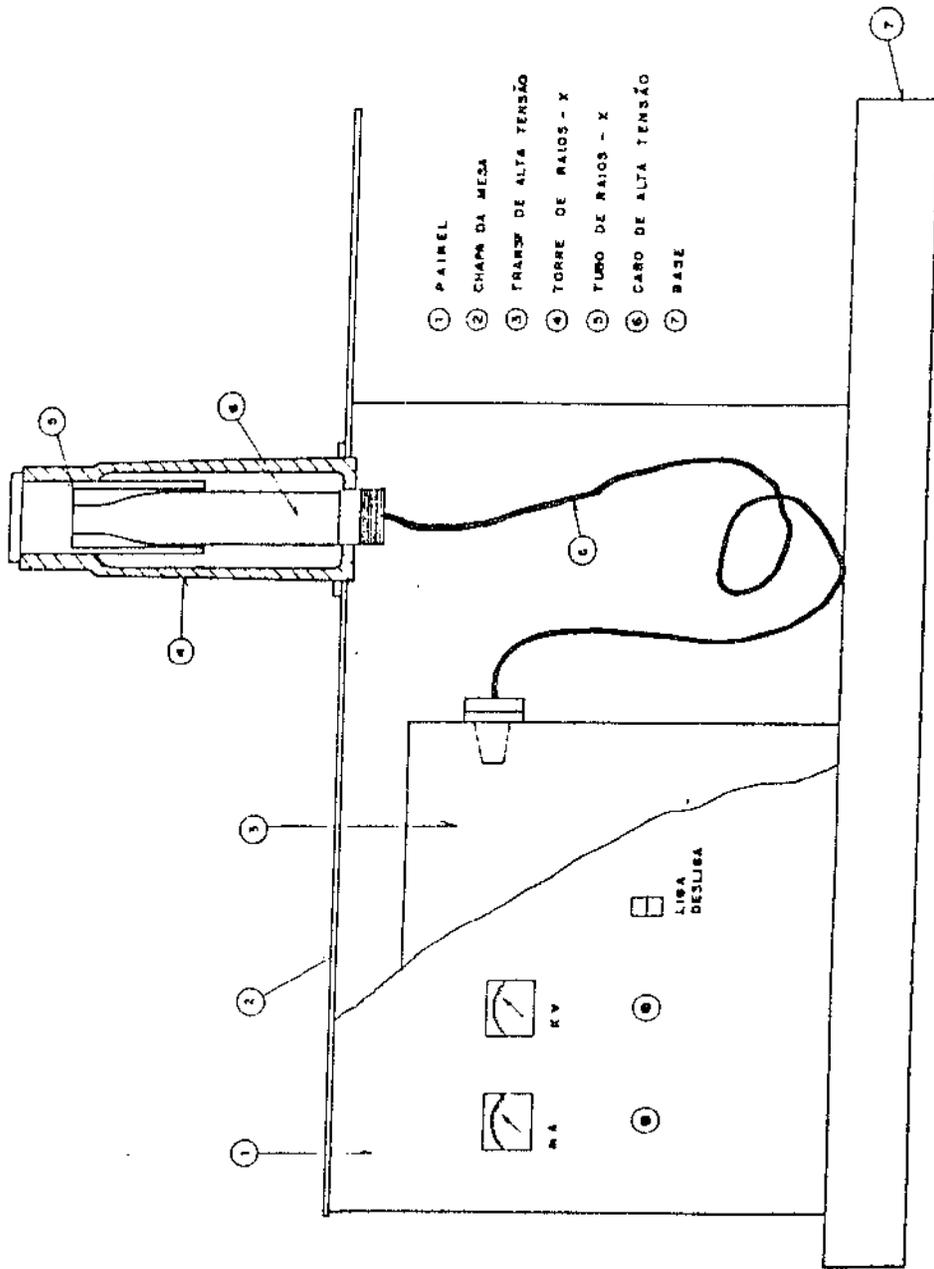


Figura 3.1. Vista geral do gerador de Raios-X.

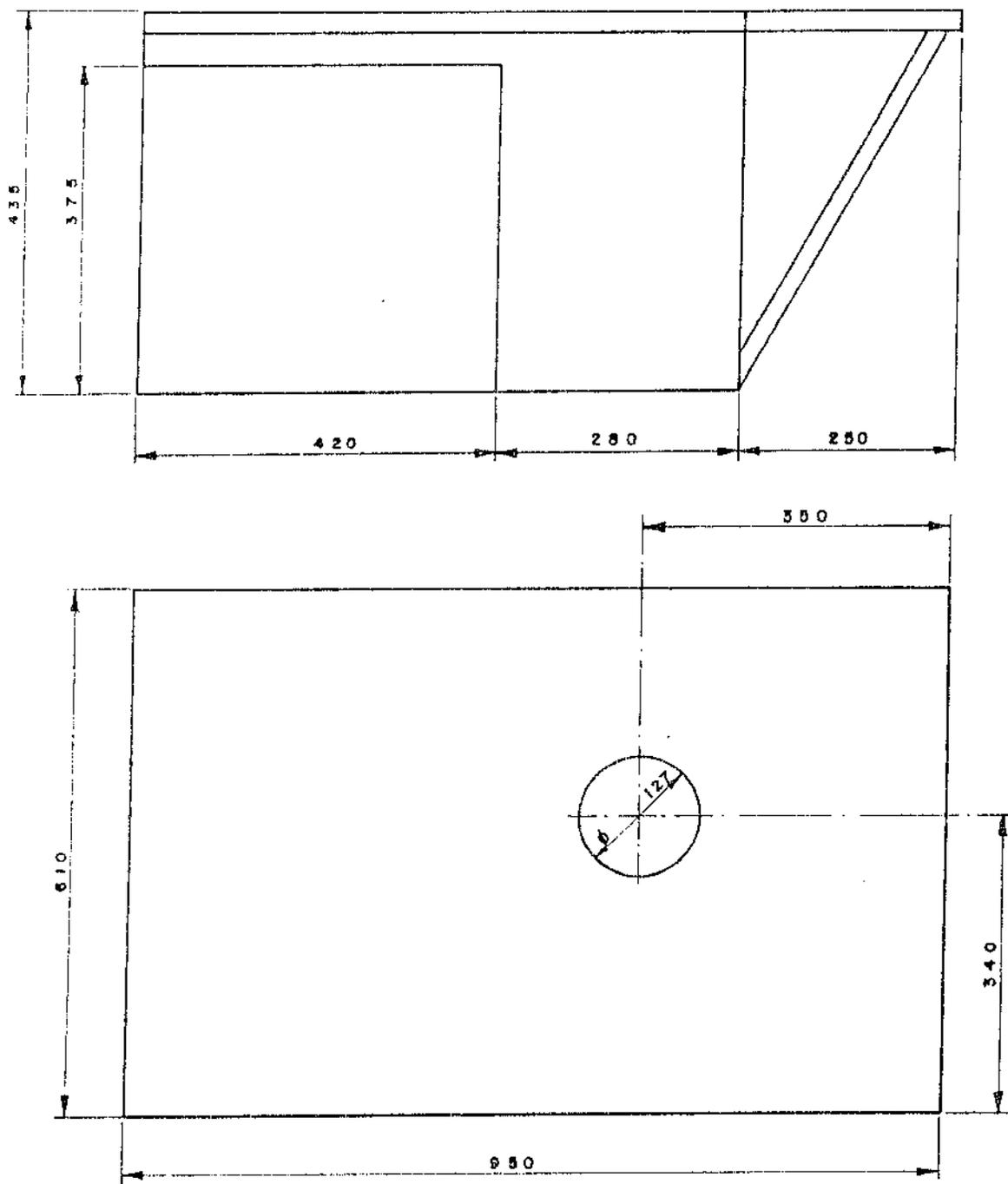


Figura 3.2. Estrutura e tampa da mesa.
Material: aço ABNT - 1020
Espessura: 3,17 mm (1/8")
Escala: 1:5

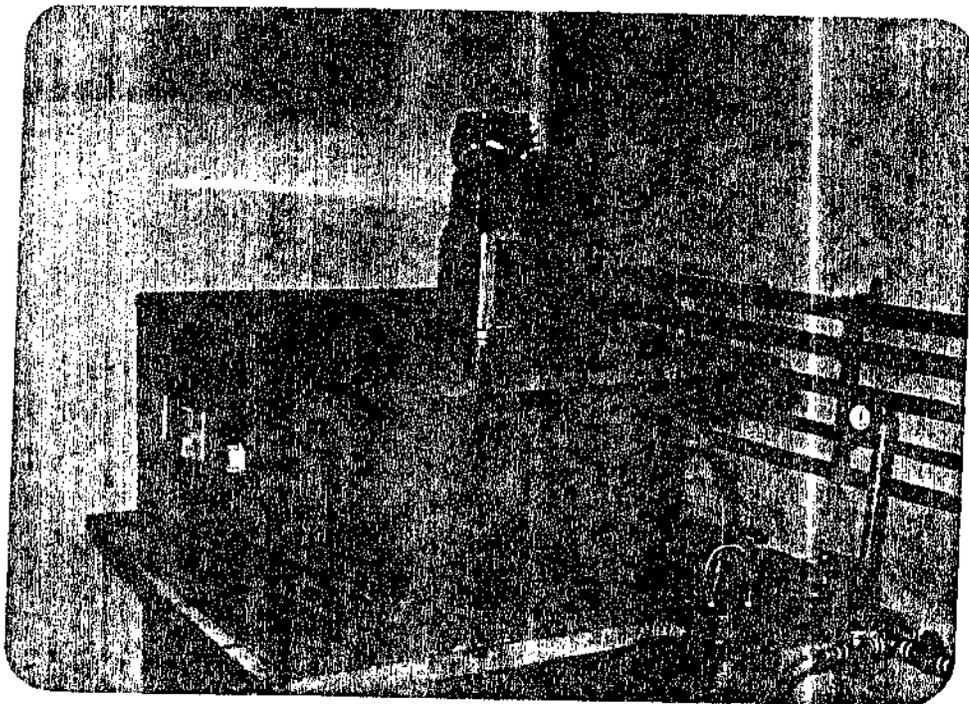


Figura 3.3. Vista geral do equipamento montado.

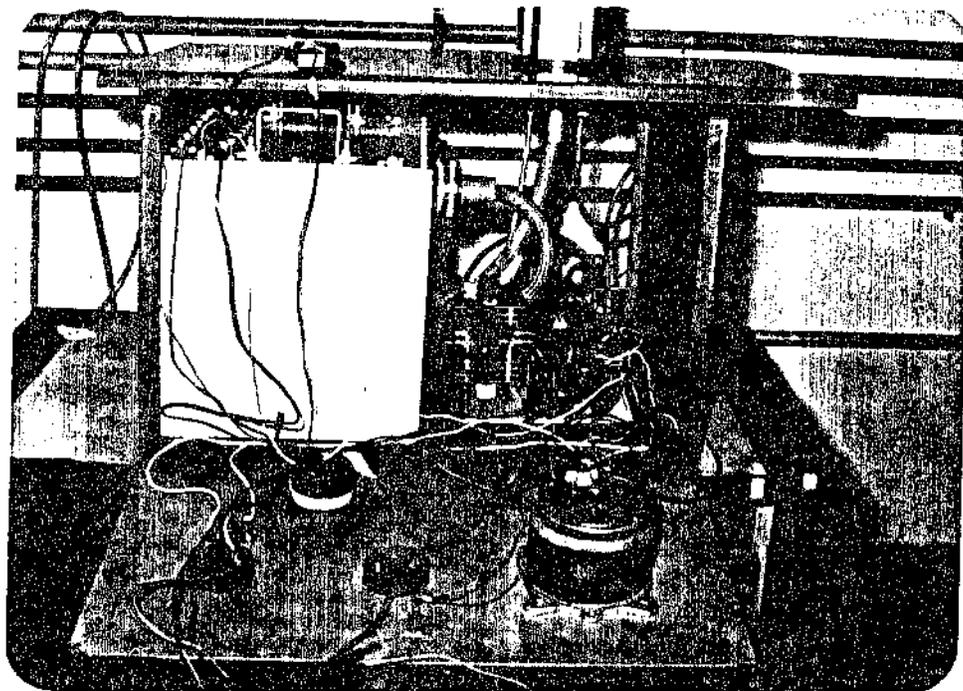


Figura 3.4. Transformador de alta tensão e os componentes elétricos do painel.

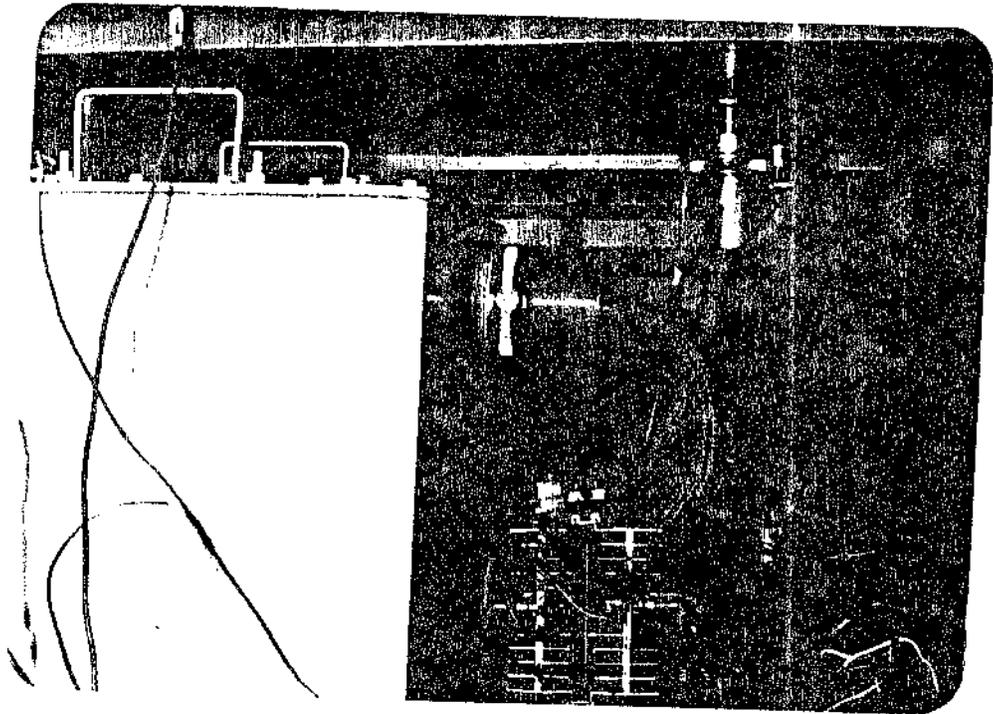


Figura 3.5. Trajeto do cabo de alta tensão para a torre.

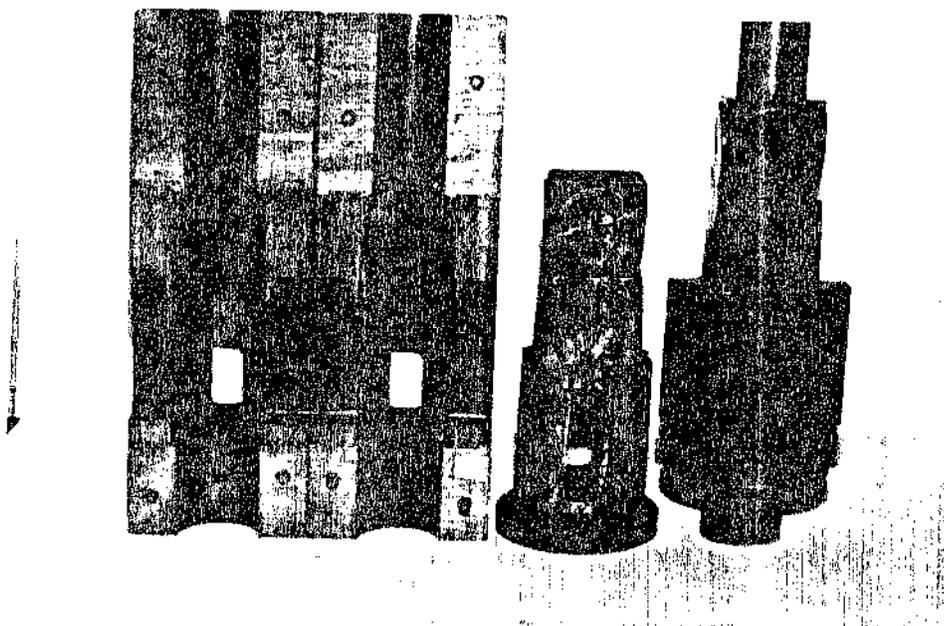


Figura 3.6. Vista da parte interna da caixa de macho (duas metades), torre fundida e o modelo.

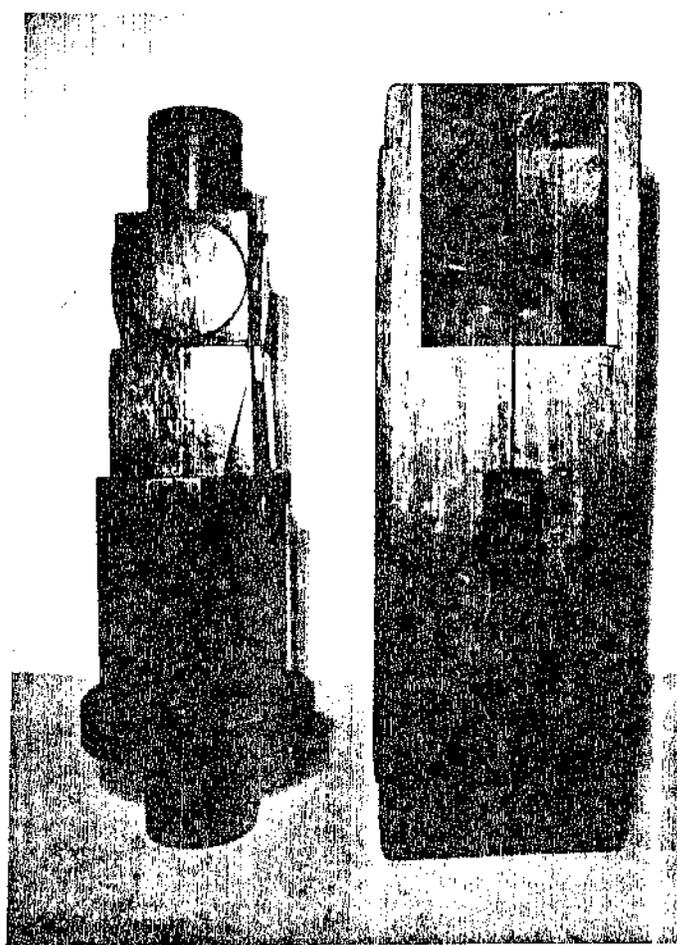


Figura 3.7. Vista externa do modelo e da caixa de macho.

A forma geométrica da torre é simples, apresentando simetria nas quatro faces externas (figs. 3.6 e 3.7). Internamente é ôca, permitindo a passagem do tubo e do cabo de alta tensão.

Essa torre foi fundida em ferro fundido nodular [3] utilizando-se a moldagem em areia verde [4].

A confecção do modelo e da caixa de macho foram feitos de madeira mogno bruto. As dimensões externas do modelo foram acrescidas de 1,0% para compensar a contração durante a solidificação da mesma [5].

Após a fundição a torre foi usinada nos seguintes locais:

- Na parte superior (fig. 3.8). Inicialmente, foi executada a operação de faceamento; depois a abertura dos quatro furos e execução de roscas. Em seguida realizou-se a operação de torneamento (diâmetro de 68 mm) para encaixe do tubo de raios-X.
A flange do tubo de raios-X deve ser assentada perfeitamente nesta parte superior da torre, uma vez que o circuito de água de refrigeração passa pela flange do tubo.
- Lateralmente, foram executados quatro furos, nas posições onde saem os raios-X, mostrando-se aí o dispositivo de abertura e vedação dos raios-X, vulgarmente conhecido como janela dos raios-X.
- Na parte médio-inferior da torre, nas quatro faces, foram executados os quatro furos com roscas, para fixação do trilho-guia para a montagem dos experimentos das técnicas de raios-X.
- Na base da torre foram executadas as operações de faceamento, torneamento, rosqueamento. Nesta região ocorre o contato do tubo de raios-X com o cabo de alta tensão, graças ao movimento do parafuso de ajuste.

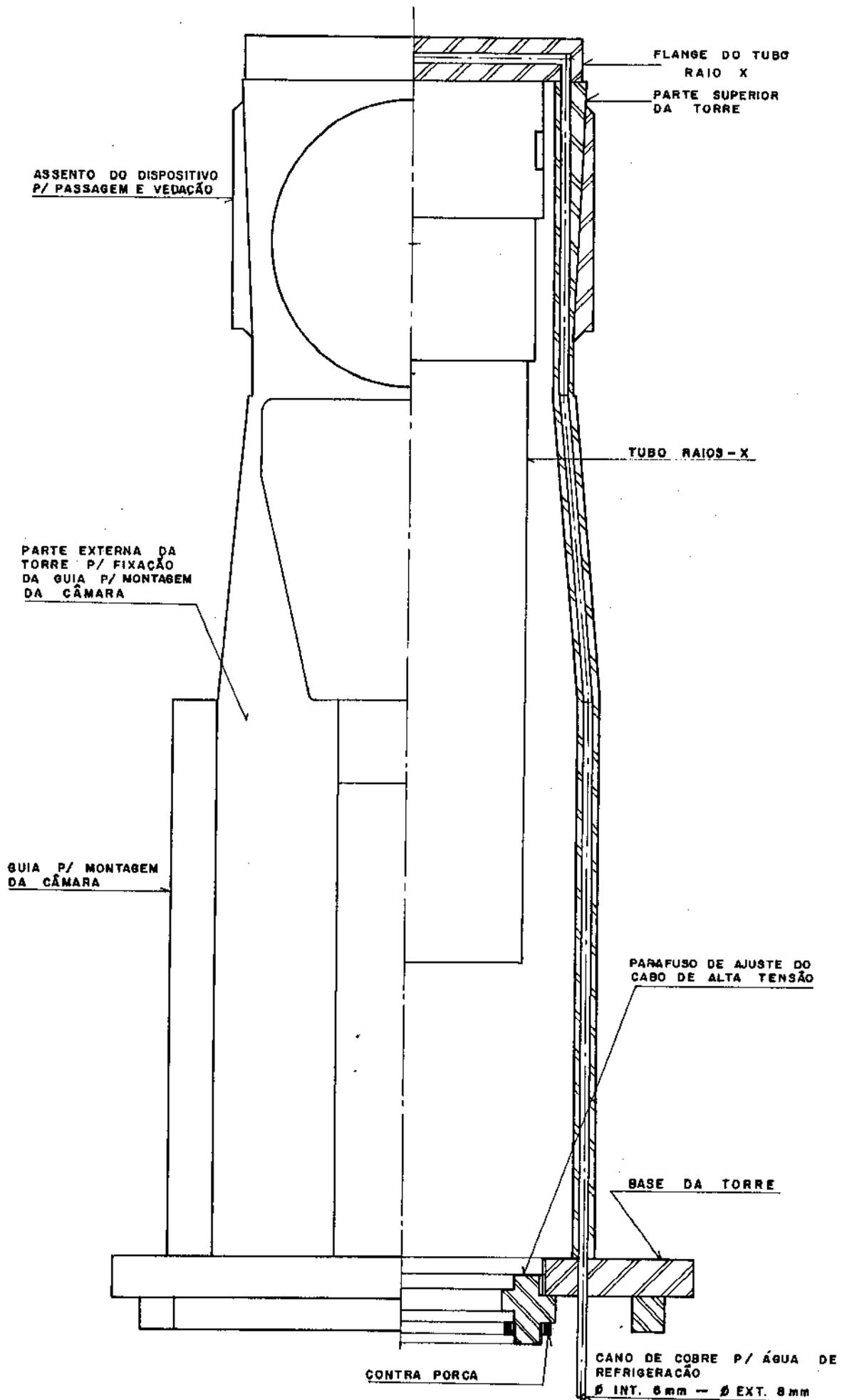


Figura 3.8. Torre de Raios-X.

3.3. Dispositivo de abertura e fechamento para os raios-X

O mesmo consta de duas partes: - o seletor de filtro e de um disco cilíndrico, contendo uma manopla (fig. 3.9).

Ocorrerá passagem dos raios-X quando a haste for deslocada até uma posição que permita que o furo de abertura no disco coincida com o furo localizado na torre, por onde saem os raios-X. A esta abertura será conectado o colimador de laue que ao ser retirado, imediatamente o disco volta para a sua posição normal, vedando a passagem dos raios-X. O seletor de filtro é um disco cilíndrico, contendo quatro filtros e a posição fechado. Os filtros são de: Níquel, Ferro, Manganês e Vanádio.

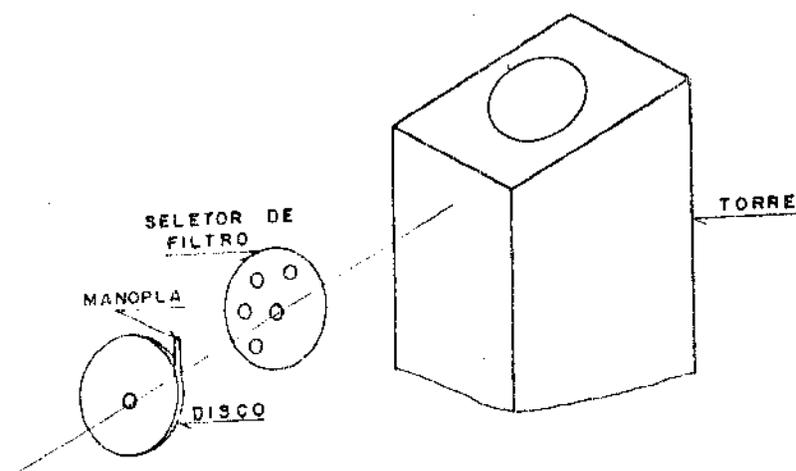
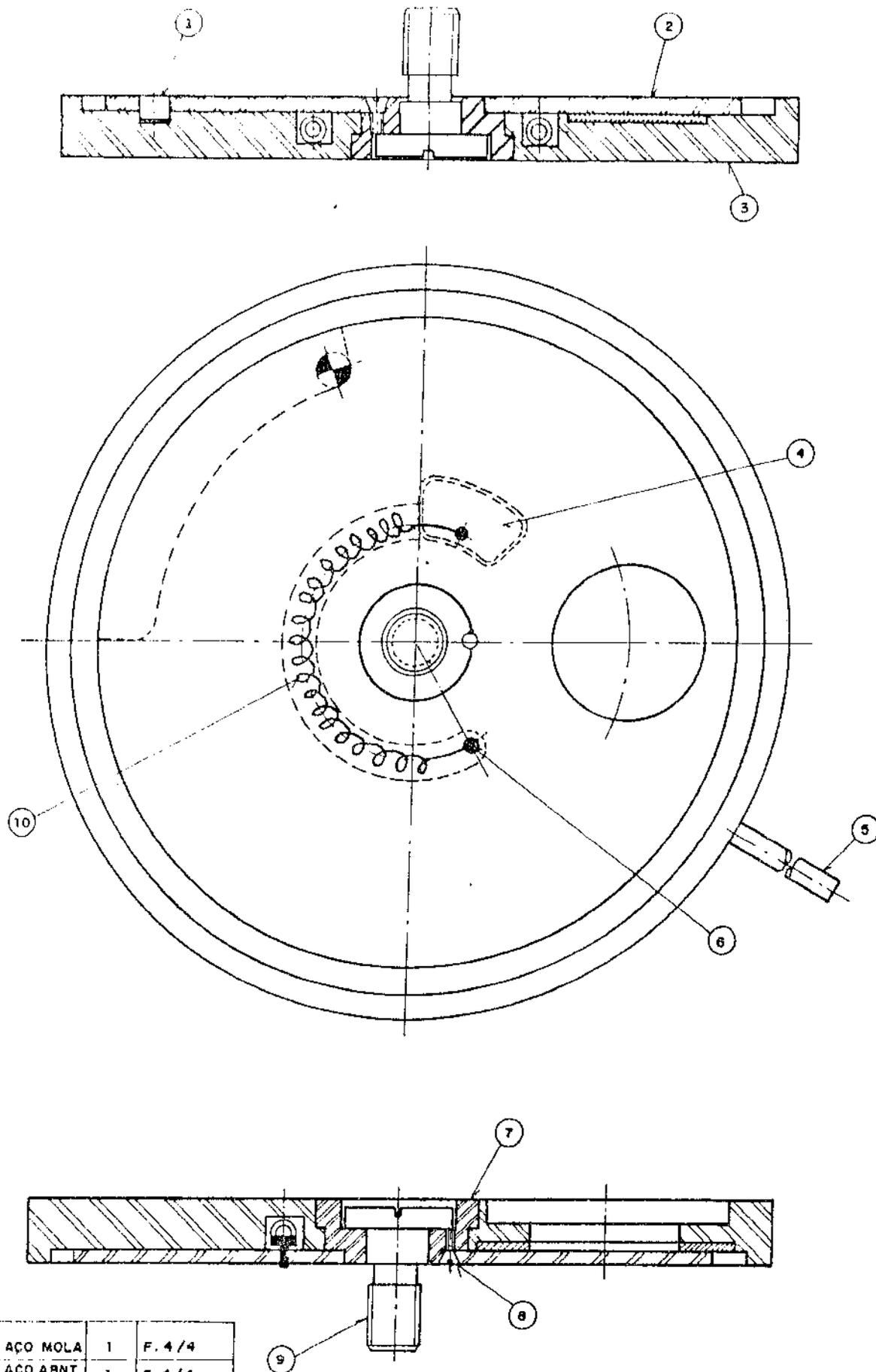


Figura 3.9 Desenho esquemático do dispositivo de abertura e fechamento dos raios-X.

O desenho de conjunto da janela de raios-X é apresentado na Fig. 3.10.



10	MOLA	ACO MOLA	1	F. 4/4
9	PARAF	ACO ABNT 1020	1	F. 4/4
8	PARAF	ACO ABNT 1020	1	F. 4/4
7	BUCHA	ACO ABNT 1020	1	F. 4/4
6	SOLDA	PRATA	—	—
5	HASTE	ACO ABNT 316	1	F. 4/4
4	PASTILHA	ACO ABNT 316	1	F. 4/4
3	TAMPA	ACO ABNT 316	1	F. 3/4
2	DISCO	ACO ABNT 316	1	F. 2/4
1	PINO	ACO ABNT 316	1	F. 4/4
Nº	NOME	MATERIAL	QUAN	DETALHES

Figura 3.10 Conjunto da janela de raio-X.

3.4. Circuito elétrico

3.4.1. Introdução

Os componentes elétricos principais utilizados no gerador de raios-X são: transformador de baixa tensão (para aquecer o filamento) e transformador de alta tensão (para fornecer a diferença de potencial entre o alvo e o filamento, acelerando os elétrons). Além destes componentes principais existem outros componentes acessórios para: estabilizar a tensão aplicada ao tubo, medir a corrente aplicada ao mesmo e medir a corrente do filamento.

No esquema mostrado na figura 3.11 tem-se uma noção da distribuição dos componentes elétricos do gerador de raios-X.

O tubo de raios-X está ligado diretamente ao secundário do transformador de alta tensão, e os raios-X são emitidos durante o meio ciclo alternado de onda quando o ânodo (alvo) é positivo em relação ao cátodo. Durante os meios ciclos negativos de onda o tubo está inativo [6]. De fato, o tubo funciona como um diodo. Os transformadores de alta tensão usados com tubos de raios-X são geralmente montados em tanque metálico cheio com óleo com duas funções distintas: uma é de natureza isolante e a outra é a de transferir para as paredes do tanque o calor produzido pelas perdas que ocorrem no núcleo do transformador.

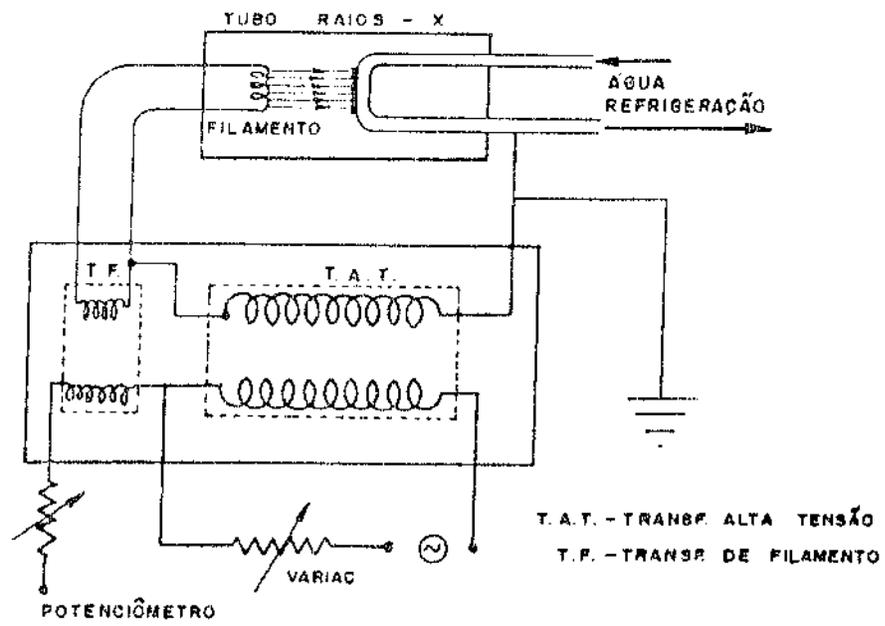


Figura 3.11. Esquema elétrico do gerador de Raios-X.

Um tubo de raios-X, operando com corrente alternada tem a vantagem da simplicidade, pois utiliza diretamente a tensão da rede. Entretanto, existe uma desvantagem: os raios-X são emitidos em pulsos, um em cada meio ciclo (fig. 3.12). Se o tubo for usado para trabalhos de cristalografia onde a radiação característica é usada, a preocupação reside na intensidade da radiação característica emitida. Como vimos anteriormente, esta radiação é emitida somente quando a tensão do tubo for maior do que um certo valor mínimo (capítulo 2, equação 2.2), chamada tensão de excitação (V_e). Essa intensidade emitida aumenta com o aumento da tensão ($V - V_e$) onde V é a tensão no tubo. Logo, quanto mais positiva for a relação ($V - V_e$) maior será a intensidade média da radiação característica. Desde que a excitação da linha característica somente ocorre quando o valor de tensão de excitação (V_e) for excedido, portanto, a emissão da radiação característica se dá numa parte definida no ciclo de tensão. No caso de um gerador empregado a um potencial constante aplicado ao tubo este tempo é de 100%. Entretanto, no caso de um gerador a um potencial de meia-onda aplicado ao tubo, este tempo é de 30% do ciclo de onda [7].

No gerador construído foi utilizada a retificação completa de onda [8,9] (fig. 3.13). O circuito retificador foi especificado para uma tensão reversa de 45 kV. A ponte de retificação é composta de quarenta e quatro diodos, geometricamente distribuídos segundo um losângo. Há onde diodos que estão em série em cada lado do losângo, ligados em paralelo com resistência, para distribuir a tensão reversa a cada conjunto diodo-resistor. Os diodos retificadores usados foram de silício [3,4] especificados para uma tensão reversa de 7,5 kV, corrente de 40 mA. Os resistores foram especificados para valores de 47 M Ω , potência de 1,2 W \pm 10%.

Figura 3.12.

Forma da tensão do tubo de raios-X, no gerador convencional (Retificação de meia onda)

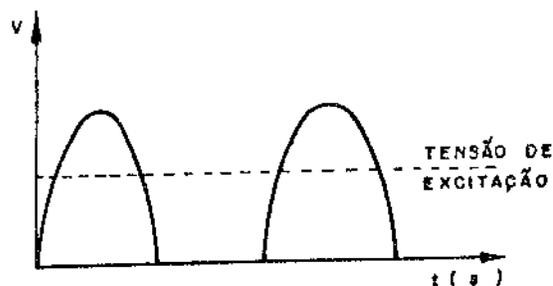


Figura 3.13.

Forma da tensão no tubo de raios-X no gerador construído (Retificação de onda completa)

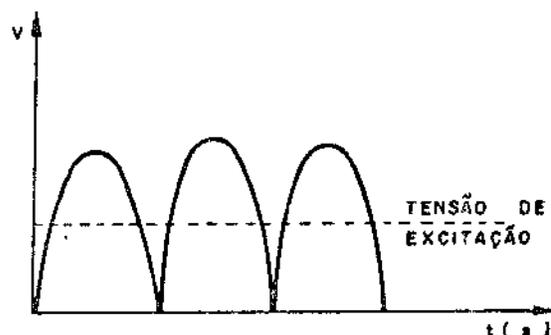
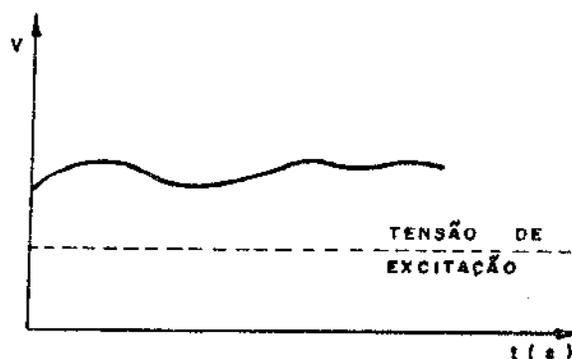


Figura 3.14.

Uma solução mais aperfeiçoada ainda consistiria em aproximar a um valor constante a tensão aplicada ao tubo através de um circuito com capacitores. Entretanto, o mesmo não foi usado neste trabalho devido ao seu custo mais elevado.



3.4.1.1. Dados de projeto do circuito retificador a ponte

A tensão obtida nos terminais do secundário do transformador do circuito do gerador de raios-X (fig. 3.15) é alternada e ao necessitarmos de uma tensão direta precisamos de retificadores.

A característica de se conseguir um fluxo de corrente num sentido (polarização direta) e de não se conseguir no outro (polarização reversa) é indispensável para que um dispositivo funcione como retificador. Durante o meio ciclo que o diodo não conduz, a tensão de pico do transformador aparece nos terminais do diodo. Analogamente, quando o diodo conduz, toda a corrente que alimenta a carga, passa por ele. Deve-se, então, ao se especificar um diodo fazer referência à máxima tensão de pico reversa e a máxima corrente direta a que o mesmo fica sujeito. Para proteção dos mesmos monta-se resistores em paralelo com os diodos, a fim de distribuir a tensão reversa por igual a cada conjunto diodo-resistor. Os diodos usados são os de silício, que consomem menos energia, produzem menos calor, requerem menos substituições e necessitam de menor espaço.

No circuito da figura 3.15 usa-se uma ponte retificadora, consistindo de quatro blocos de material isolante unidos entre si, segundo a forma de um losango. Em cada bloco há onze diodos de silício em paralelo com onze resistores, com as respectivas especificações: - diodos de silício para tensão de 7,5 KV e corrente direta de 40 mA; e resistores de 47 M Ω e potência de 1,2 W.

- Tensão de trabalho do diodo:

$$\frac{45 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2}}{11} = 5727 \text{ V}$$

- Potência média dissipada no diodo.

$$P = \text{tensão eficaz} \times \text{corrente eficaz}$$

$$P = \frac{45000}{11} \times 0,025 \times 10^{-3}$$

$$P = 0,11 \text{ W}$$

- Potência média total dissipada sobre os diodos dentro do óleo:

$$0,11 \times 44 = 5 \text{ W}$$

Solução prática: 44 diodos retificadores de silício,
tensão de pico reversa de 7,5 kV,
corrente direta de 40 mA.

- Resistências:

$$R = \frac{V}{i} = \frac{5727}{0,1 \times 10^{-3}} = 57 \times 10^6$$

$$R = 57 \text{ M}\Omega$$

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{(5727)^2}{57 \times 10^6} = 0,57 \text{ W}$$

Solução prática: 44 resistores de 47 M Ω
potência de 1,2 W \pm 10%.

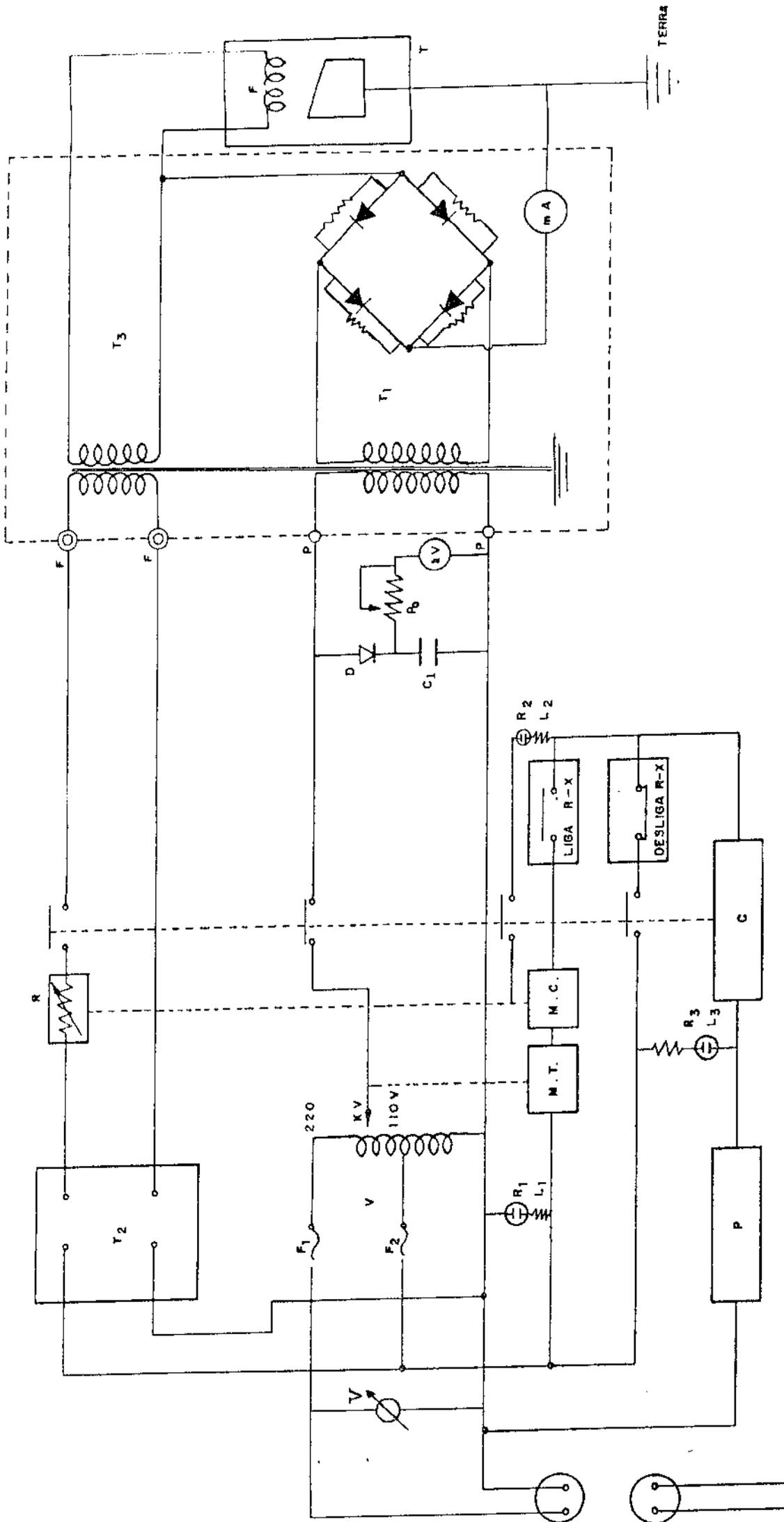


Figura 3.15. Circuito do gerador de Raios-X.

Dados do Circuito Elétrico (vide figura 3.15.)

- C = Contator Siemens com quatro contatos normal aberto. Bobina para 110 V.
- C₁ = Capacitor Eletrolítico. Capacidade: 3,3 μ F
 Voltagem: 350 V
- D = Diodo BY 126 - tensão reversa 400 V, 1A
- F = Fonte de 220 V
 Frequência 60 hertz
- F₁ = Fusível de 15 A
- F₂ = Fusível de 5 A
- L₁, L₂, L₃ = Lâmpadas piloto para painel Neon para 110 V
- mA = Miliamperímetro de painel de forma quadrada 3"
 Escala 0 - 40 mA
- M.C. = Microcomutador com rolete para corrente: 250 V - 5 A
- M.T. = Microcomutador com rolete para tensão: 250 V - 5 A
- P = Pressostato para painel com um contato normal aberto e um contato normal fechado, para ajustagem de pressão de água de 0 a 4,5 Kg/cm²
- P_o = Potenciômetro de 100 K Ω
- Ponte retificadora formada por diodos de Silício, em paralelo com resistências:
- tensão pico inversa: 7,5 KV
 - resistência: 47 M Ω
 - potência: 1,2 W

- R = Reostato: - resistência 100 Ω
 - potência 100 W
- R_1 , R_2 e R_3 = Resistência de 47 K Ω ; 0,5 W
- T = Tubo de raios-X: tensão: 0 - 45 kV
 corrente: 0 - 40 mA
- T_1 = Transformador de Alta Tensão
 - tensão de entrada: 220 V
 - tensão de saída: 45000 V
- T_2 = Transformador de Filamento
 - tensão de entrada: 100 V
 - tensão de saída: 5 V
- T_3 = Transformador de Núcleo Saturado
 - tensão de entrada: 80 - 110 V
 - tensão de saída: 100 V
- V = Variac - tensão: 0 - 220 V
 - corrente: 7,5 A
 - potência: 1750 W
 - tape em 110 V
- 1 Voltímetro de painel (quadrado) 3" escala de 0 - 45 kV com excitação de 220 V
- 2 Barras de terminais com 12 parafusos
- 1 Tomada liga-desliga

3.4.2. Projeto do transformador de alta tensão

3.4.2.1. Introdução

O transformador tem como função transformar a corrente alternada de baixa (220 V) para alta tensão (45.000 V) e vice-versa. Basicamente, ele é constituído de um núcleo de ferro e de duas bobinas isoladas entre si.

O transformador foi dimensionado para uma potência de 3 kW, uma vez que os tubos de raios-X usados nos experimentos de cristalografia são de potência de 2 kW. Em qualquer transformador construído ocorrem perdas de energia em seus enrolamentos e no núcleo devido às correntes parasitas e pela histerese magnética [10].

Para minimizar as perdas por correntes parasitas é necessário construir o núcleo com lâminas de ferro isoladas entre si. Para reduzir as perdas por histerese magnética se adicionam ao ferro o silício. A liga Fe-Si apresenta uma elevada permeabilidade magnética [11] e baixa força coerciva.

O resfriamento do transformador é feito com óleo. A este respeito, distinguem-se os transformadores em óleo com resfriamento natural e com resfriamento artificial. O resfriamento natural do óleo obtém-se construindo uma caixa do transformador com dimensões suficiente para transmitir ao ar a quantidade de calor correspondente às perdas do transformador, sem que o óleo interno exceda a temperatura de 75°C [10]. A caixa do transformador possui dimensões maiores que as do transformador nela contido; de modo que ao redor do transformador se formam colunas ascendentes de óleo quente que, em contato com as paredes da caixa, se resfria. Entre os enrolamentos e o núcleo devem existir espaços suficientes para formar vários canais, entre os quais a circulação do óleo possa ocorrer livremente.

O óleo mineral empregado além de apresentar uma elevada capacidade térmica e um excelente coeficiente de transmissão do calor, é um ótimo isolante, que apresenta uma rigidez dielétrica quase cinco vezes maior do que o ar [10], baixa viscosidade, baixo ponto de congelação e alto ponto de queima. Ele deve ser livre de ácidos corrosivos, alcalinos e de enxofre. Também não deve oxidar-se. A

presença de pequenas quantidades de umidade ou de partículas suspensa diminuem a rigidez dielétrica do óleo [12].

O transformador construído foi hermeticamente fechado em uma caixa de aço 1020, com juntas de borracha em todo o contorno da tampa e com buchas isolantes na saída do cabo de alta tensão. O mesmo foi enrolado, segundo esquema da fig. 3.16. Os enrolamentos são concêntricos; o enrolamento primário é bobinado sobre um papelão isolante que envolve o núcleo de ferro-silício. As suas camadas estão isoladas entre si com um material isolante denominado couro cru. O enrolamento secundário foi bobinado sobre um vidro cilíndrico. Suas camadas estão isoladas entre si com material isolante denominado mayler. No término da bobina secundária foram enroladas três camadas de poliéster, seguido de quatro camadas de nomex, protegendo contra possíveis faíscas.

3.4.2.2. Cálculo do transformador

O cálculo do transformador foi feito como se segue:

- Dados do transformador

$$\text{Potência } (W_2) = 3 \text{ kVA} = 3000 \text{ W}$$

$$\text{Tensão de saída } (V_2) = 45000$$

$$\text{Tensão de entrada } (V_1) = 220 \text{ V}$$

. Cálculo das correntes primária (I_1) e secundária (I_2)

$$\begin{aligned} \text{- Potência primária: } W_1 &= W_2 \\ W_1 &= 3000 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{- Corrente primária: } I_1 = \frac{W_1}{V_1} = \frac{3000}{220} = 13,6$$

$$I_1 = 13,6 \text{ A}$$

$$\text{- Corrente secundária: } I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{3000}{45000}$$

$$I_2 = 0,067 \text{ A}$$

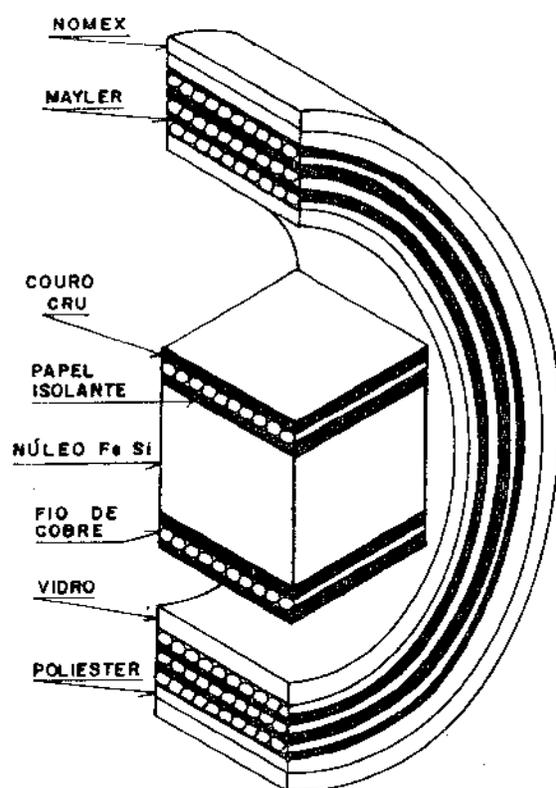


Figura 3.16. Desenho esquemático do enrolamento do transformador de alta tensão.

Cálculo da seção dos condutores

Para se calcular a seção dos condutores (S) é preciso fixar a densidade de corrente. Em geral, aumentando-se o volume do transformador, torna-se mais crítico a sua refrigeração, e por este motivo, é preciso diminuir a densidade de corrente nos condutores. Geralmente, usa-se na prática os valores observados na tabela 3.a.

Condições	densidade de corrente A/mm ²
sem ventilação	2
má ventilação	4
ventilação regular	6
ventilação boa	8

Tabela 3.a Valores de densidade de corrente fornecida [13].

Em nossos cálculos adotamos o valor $d = 4 \text{ A/mm}^2$.

- Cálculo da Seção do Condutor Primário (S_1)

$$S_1 = \frac{I_1}{d} = \frac{13,6}{4} = 3,4 \text{ mm}^2$$

∴ Fio 12 AWG (3,30 mm², ϕ 2,05 mm)

- Cálculo da Seção do Condutor Secundário (S_2)

$$S_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{0,067}{4} = 0,017 \text{ mm}^2$$

∴ Fio 34 AWG (0,020 mm², ϕ 0,160 mm)

Cálculo da seção geométrica do núcleo do transformador (fig. 3.17)

S_g = seção geométrica do núcleo do transformador

$$S_g = a \cdot b \quad [S_g = \text{cm}^2]$$

S_m = seção magnética $[S_m = \text{cm}^2]$

Para transformadores de um primário e de um secundário [10] é válida a seguinte relação:

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}}$$

onde:

W_2 = potência do transformador $[W_2] = \text{Watt}$

f = frequência da rede $[f] = \text{hertz}$

$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{3000}{60}}$$

$$S_m = 53,03 \text{ cm}^2$$

Foi adotado o valor de $S_g = 1,2 S_m$, baseado na bibliografia [10]

$$\therefore S_g = 1,2 \cdot 53,03$$

$$S_g = 63,63$$

$$\therefore S_g = 68 \text{ cm}^2 \text{ (lâminas de ferro-silício de dimensões } 85 \text{ mm x } 80 \text{ mm)}$$

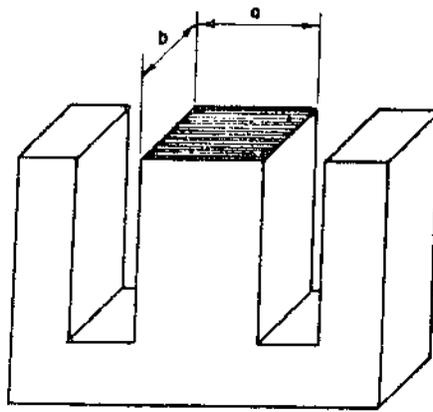


Figura 3.17. Seção geométrica do núcleo do transformador (hachurado).

Cálculo do número de espiras no enrolamento primário (N_1)

Da literatura [10], temos que

$$N_1 = \frac{V_1}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} \cdot 10^8 \quad (3.1)$$

onde:

V_1 = tensão no enrolamento primário [V_1] = Volt

B_M = indução máxima no ferro (para lâminas de ferro-silício, de boa qualidade com resfriamento natural. $B_M = 11300$ Gauss)[10]

S_m = seção magnética [S_m] = cm^2

f = frequência. $f = 60$ hertz

$$N_1 = \frac{220 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11300 \cdot 53,03 \cdot 60}$$

$$N_1 = 138 \text{ espiras}$$

Cálculo do número de espiras no enrolamento secundário

$$N_2 = \frac{V_2}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} \cdot 10^8$$

$$N_2 = \frac{45000}{4,44 \cdot 11300 \cdot 53,03 \cdot 60} \cdot 10^8$$

$$N_2 = 28000 \text{ espiras}$$

Possibilidade de execução

Cálculo da seção do cobre enrolado (S_{cu})

Para um transformador com um primário e um secundário, esta seção resulta:

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 \quad [S_{cu}] = \text{mm}^2$$

$$S_{cu} = 138 \times 3,30 + 28000 \times 0,02$$

$$S_{cu} = 1015,40 \text{ mm}^2$$

Para que a montagem do transformador seja possível [10], a seção da janela (fig. 3.18) deve obedecer a relação:

$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} \geq 3$

$$\therefore \text{Seção da janela} \geq 3 \cdot S_{cu}$$

$$S_j \geq 3 \cdot 875,40$$

$S_j \geq 2626,20 \text{ mm}^2$

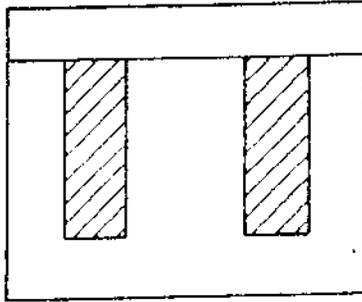


Figura 3.18. Seção da janela (hachurado).

Resumo dos dados obtidos anteriores para a Construção do Transformador de Alta Tensão.

Características do enrolamento primário

- . tensão de entrada : 220 V
- . corrente : 13,6 A
- . potência : 3000 W
- . nº espiras : 138
- . especificação do fio: fio de cobre de $\phi = 2,05$ mm

Características do enrolamento secundário

- . tensão de saída : 45 kV
- . corrente : 0,018 A
- . nº espiras : 28000
- . especificação do fio: fio de cobre de $\phi = 0,16$ mm

Características do óleo isolante

- . volume : 40 l
- . acidez : 0,1 mg KOH/g de óleo
- . rigidez dielétrica: 45 kV

3.4.3. Projeto do transformador de filamento

Dados do projeto do transformador de filamento:

- Dados do transformador

$$\text{Potência } (W_2) = 60 \text{ W}$$

$$\text{Tensão de saída } (V_2) = 5 \text{ V}$$

$$\text{Tensão de entrada } (V_1) = 100 \text{ V}$$

Cálculo das correntes primária (I_1) e secundária (I_2):

$$\begin{aligned} \text{- Potência primária: } W_1 &= W_2 \\ W_1 &= 60 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{- Corrente primária: } I_1 = \frac{W_1}{V_1} = \frac{60}{100}$$

$$I_1 = 0,6 \text{ A}$$

$$\text{- Corrente secundária: } I_2 = \frac{W_2}{V_2} = \frac{60}{5}$$

$$I_2 = 12 \text{ A}$$

Cálculo da seção dos condutores:

Escolhendo-se a densidade de corrente = 4 A/mm^2 , obtêm-se:

$$\text{- Seção do condutor primário: } S_1 = \frac{I_1}{d} = \frac{0,6}{4}$$

$$S_1 = 0,15 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio 25 AWG ($0,159 \text{ mm}^2$, ϕ $0,45 \text{ mm}$)

- Seção do condutor secundário: $S_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{12}{4}$

$$S_2 = 3 \text{ mm}^2$$

Usa-se fio 12 AWG (3,30 mm², ϕ 2,05 mm)

Cálculo da seção geométrica do núcleo do transformador (Sg):

$$S_g = a \cdot b \text{ cm}^2$$

$$S_m = \frac{S_g}{1,2} \quad \text{onde } S_m = \text{seção magnética}$$

mas
$$S_m = 7,5 \sqrt{\frac{W_2}{f}}$$

$$\therefore S_m = 7,5 \sqrt{\frac{60}{60}} = 7,5$$

$$S_m = 7,5 \text{ cm}^2$$

$$S_g = 1,2 S_m$$

$$S_g = 1,2 \cdot 7,5$$

$$S_g = 9,0 \text{ cm}^2 \text{ (lâmina de ferro-silício de dimensões 30 mm x 30 mm)}$$

Cálculo do nº de espiras:

- Número de espiras no enrolamento primário (N_1)

$$N_1 = \frac{V_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} \Rightarrow N_1 = \frac{100 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11.300 \cdot 7,5 \cdot 60}$$

O valor adotado para $N_1 = 446$ espiras.

- Número de espiras no enrolamento secundário (N_2)

$$N_2 = \frac{V_2 \cdot 10^8}{4,44 \cdot B_M \cdot S_m \cdot f} \Rightarrow N_2 = \frac{5 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 11.300 \cdot 7,5 \cdot 60}$$

O valor adotado para $N_2 = 23$ espiras.

Possibilidade de execução

Cálculo da seção do cobre enrolado (S_{cu}):

Para um transformador com um primário e um secundário, esta seção resulta:

$$S_{cu} = N_1 S_1 + N_2 S_2 \quad [S_{cu}] = \text{mm}^2$$

$$S_{cu} = 446 \cdot 0,159 + 23 \cdot 3,30$$

$$S_{cu} = 70,91 + 75,90$$

$$S_{cu} = 146,814 \text{ mm}^2$$

Para que a montagem do transformador seja possível, a seção da janela deve obedecer a relação:

$\frac{\text{Seção da janela}}{\text{Seção do cobre}} \geq 3$

$$S_j \geq 3 \cdot S_{cu}$$

$$S_j \geq 440,44 \text{ mm}^2$$

Resumo dos dados obtidos para a construção do transformador de filamento.

Características do enrolamento primário

- . tensão de entrada: 100 V
- . corrente : 0,6 A
- . potência : 60 W
- . nº de espiras : 446
- . especificação do fio: fio de cobre de $\phi = 0,45$ mm

Características do enrolamento secundário

- . tensão de saída : 5 V
- . corrente : 12 A
- . nº de espiras : 23
- . especificação do fio: fio de cobre de $\phi = 2,05$ mm

3.5. Operação do gerador de raios-X

O princípio de operação deste equipamento é explicado com o auxílio do circuito da fig. 3.15.

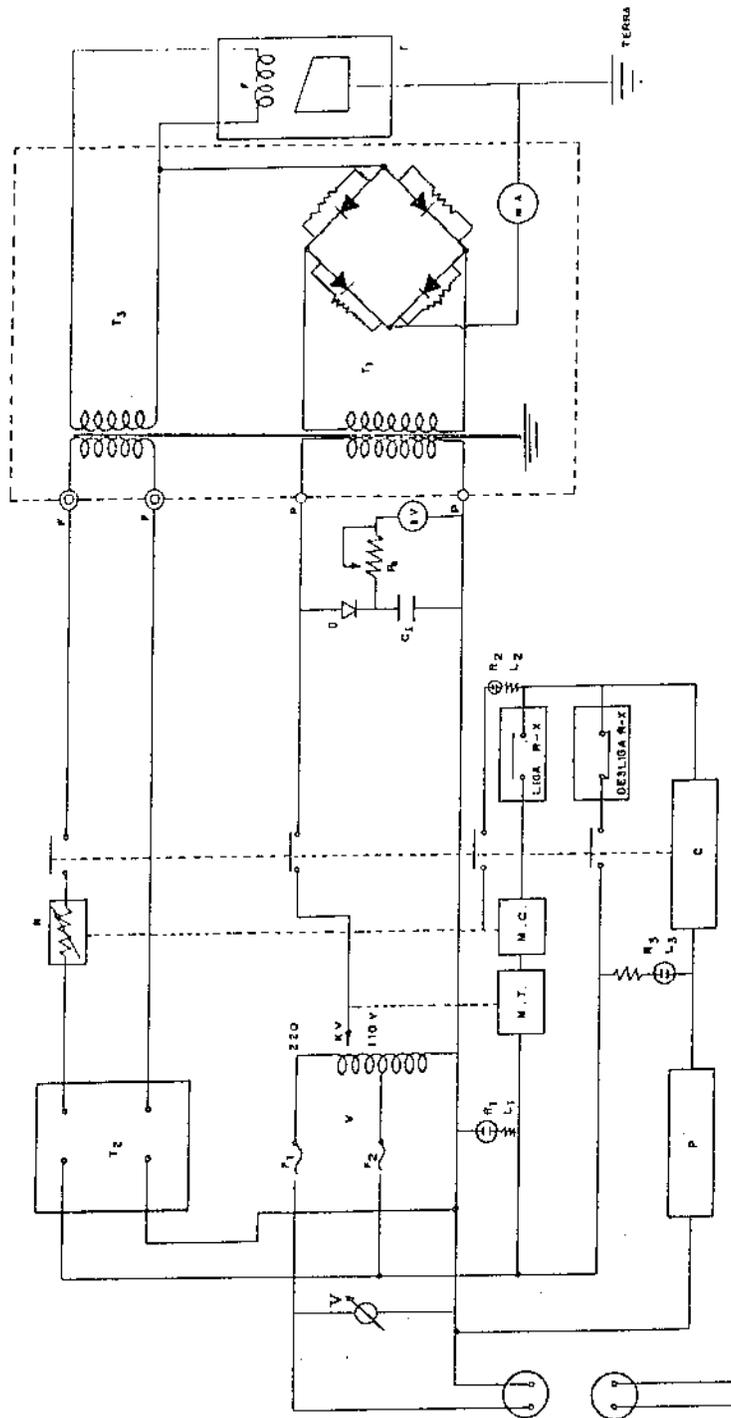


Figura 3.15. Circuito do gerador de Raios-X.

1. Liga-se a tomada à rede, fornecendo energia ao variac (V) e ao estabilizador de tensão (T_2).
2. Ao pressionar-se o botão "raios-X ligado", o contato do relê é fechado, energizando o mesmo. Se a pressão de água no circuito de refrigeração for adequada e os botões de controle do variac (kV) e do reostato estiverem ajustados convenientemente, ou seja, em posição nula a tensão é fornecida ao transformador de alta tensão. O variac alimenta o enrolamento primário do transformador de alta tensão com tensão entre 0 e 220 V; no enrolamento secundário induz-se a tensão entre 0 e 45 kV. Esta tensão é retificada e aplicada ao tubo de raios-X. A saída do estabilizador de tensão é usada como fonte de energia para aquecer o filamento do tubo de raios-X. Quando uma corrente adequada flui pelo filamento e uma tensão negativa é aplicada entre o ânodo e cátodo, os elétrons fluem do filamento ao ânodo do tubo, gerando os raios-X.

3.6. Referências bibliográficas

- [1] Properties and Selection of Metals. in: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), Metals Handbook. 8 ed, Ohio, ASM, 1964. V. 1, p. 1157-1172.
- [2] RENNÓ, M.G. & BRESCIANI, F^o, E. Propriedades e usos de metais não ferrosos. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1974, p. 153-157.
- [3] COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3 ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974 p. 391-392.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, Curso de fundição, 5 ed. São Paulo, ABM, 1974, Cap. 10, p. 10.1-10.22.
- [5] TORRE, J. Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão, São Paulo, Hemus, 1975, p. 11-16.
- [6] BROWN, J.G. X-Rays and their applications. New York, Plenum Press, 1966, p. 13-39.
- [7] JENKINS, R. & VRIES, J.L. X-Ray powder diffractometry; an introduction to. Eindhoven - Holland N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, p. 20
- [8] NOVO, D.D. Eletrônica aplicada. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1973, p. 99-101.
- [9] MELLO, H.A. & BIASI, R.S. Introdução à física dos semicondutores. São Paulo, Edgard Blücher, 1975, p. 27-41.
- [10] MARTIGNONI, A. Transformadores 4 ed., Porto Alegre, Globo, 1974, p. 22-25, 79, 80, 82, 83.
- [11] ANZENHOFER, K. et al. Eletrotécnica para escolas profissionais. 2 ed. São Paulo, Mestre Jou, 1974, p. 12.

- [12] MASSACHUSETT INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) Electrical Engineering Staff. Magnetic circuits and transformer. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1965, p. 278-307.
- [13] GRANDLA, B. & NEVONI, N. Departamento Técnico da C.P.F.L., Comunicação Privada.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE LAUE PARA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

Uma vez que a avaliação do funcionamento do gerador de raios-X construído foi feita pela aplicação da técnica de Laue, julga-se necessário descrever este método.

4.1. Método de Laue - parte teórica

4.1.1. Introdução

O método de Laue, o primeiro método a ser usado no estudo da difração dos raios-X pelos cristais, consiste no registro sobre um filme fotográfico dos feixes de raios-X policromáticos (radiação branca) espalhados por um monocristal fixo em relação ao feixe incidente.

Esta difração dos raios-X por uma família de planos do cristal (h k l) ocorre segundo a lei de Bragg [1] (fig. 4.1).

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin \theta$$

onde:

- n = qualquer número inteiro
- λ = comprimento de onda da radiação
- d = distância entre os planos
- θ = ângulo de incidência da radiação.

O ângulo θ é fixado para todos os conjuntos de planos no cristal. Cada conjunto de planos seleciona e difrata aquele particular comprimento de onda que satisfaz a Lei de Bragg para valores particulares de d e θ envolvido. Portanto, cada raio difratado tem um comprimento de onda diferente:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 2 d_{hkl} \sin \theta \\ \lambda_2 &= 2 d_{2h2k2l} \sin \theta \\ &\vdots \\ \lambda_n &= 2 d_{nhnknl} \sin \theta \end{aligned}$$

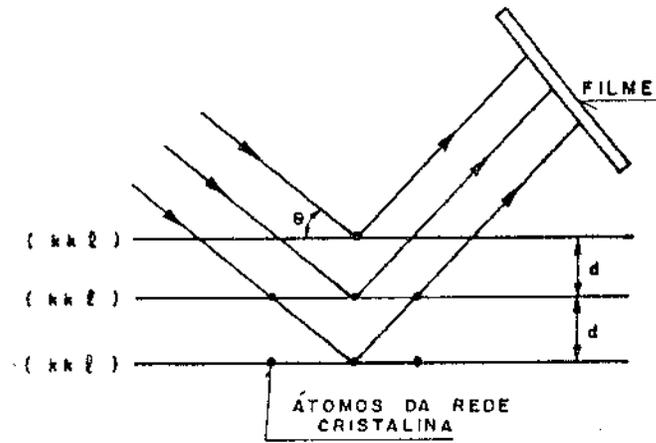


Figura 4.1. Feixes de raios-X, incidindo em um cristal.

Em outras palavras, as várias ordens de difração são emitidas no mesmo ângulo, produzindo a mesma mancha no filme.

A utilidade do método baseia-se no fato de que um cristal que se encontra orientado simetricamente em torno do feixe de raios-X incidente difratará feixes que preservam essa simetria [2,3]. Um desvio pequeno da posição de simetria é detectado, possibilitando orientar cristais com uma precisão razoável.

Há duas variações do método de Laue, dependendo da posição relativa entre fonte, cristal e filme. Existem os métodos de transmissão e de retro-reflexão. O método de retro-reflexão é o mais usado porque ele não requer preparação especial da amostra, podendo ser de qualquer espessura. O método de transmissão requer cristais finos e de baixo coeficiente de absorção [3,4]. No método de transmissão de Laue o filme é colocado atrás do cristal, ao passo que no método de retro-reflexão o filme é colocado entre o cristal e a fonte de raios-X.

4.2. Aplicações da técnica de Laue

4.2.1. Introdução

A utilidade principal do método é o de orientar cristais [5]. De fato, um cristal que se encontra orientado simetricamente em torno do feixe incidente de raios-X, mostrará feixes difratados que mantêm essa simetria. Um pequeno desvio da posição de simetria é detectado, facilmente, permitindo orientar cristais com uma precisão razoável.

O método permite também verificar se o material é monocristalino ou policristalino.

4.2.2. Instrumentação

A montagem da experiência utiliza a Câmara de Laue instalada sobre o gerador de raios-X. Os componentes desta câmara são (fig. 4.2):

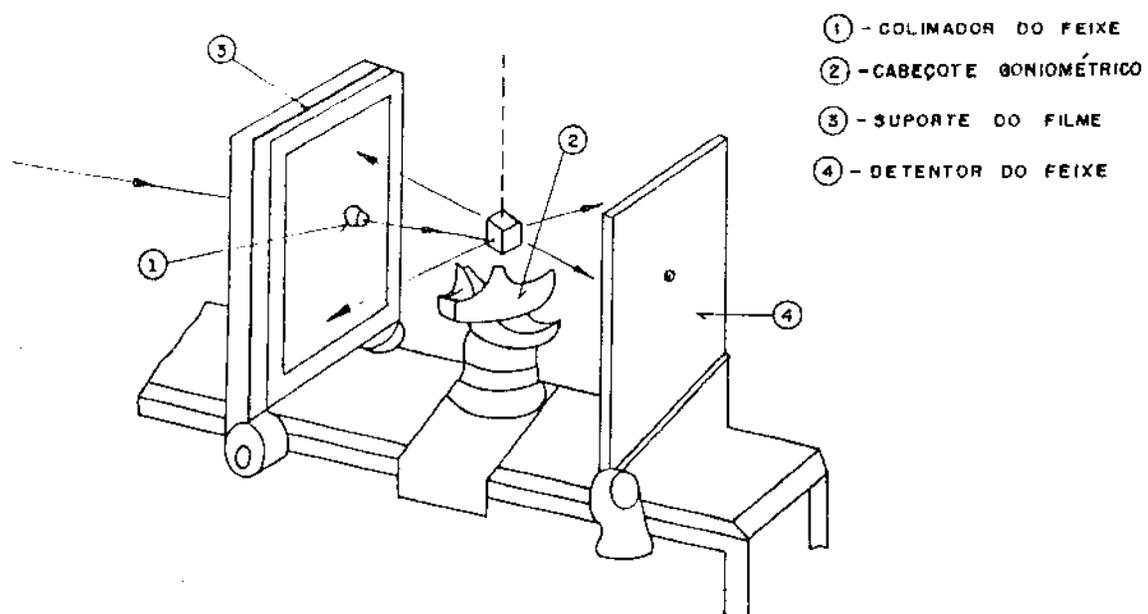


Figura 4.2. Montagem para o experimento de Laue por retro reflexão.

1. Colimador de feixe incidente.
2. Cabeçote goniométrico para ajustar a orientação do cristal.
3. Suporte contendo o filme. O mesmo pode ser colocado após o cristal (método de transmissão) e antes do cristal (método de retro-reflexão).
4. Detentor do feixe de raios-X.

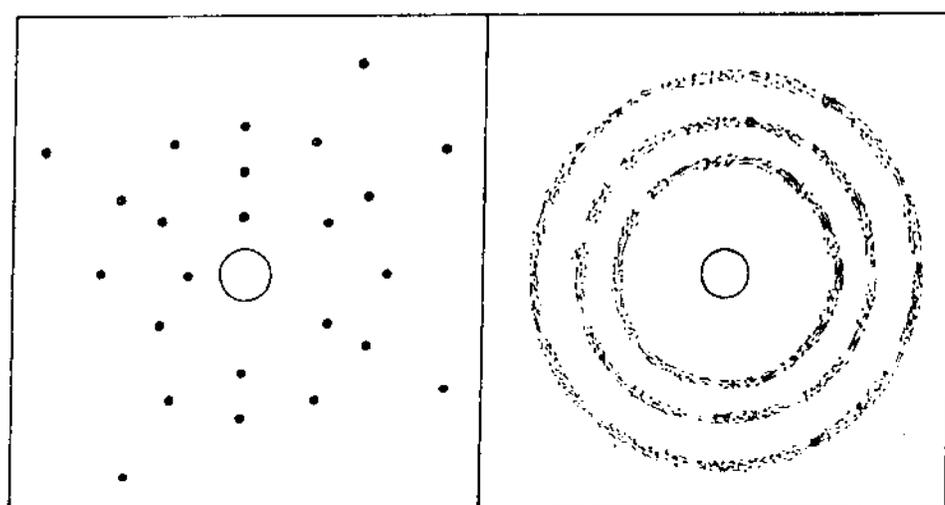
4.2.3. Realização da experiência

Na montagem para o experimento de Laue, o cristal é colocado no cabeçote goniométrico, de modo que uma das faces fique perpendicular à direção do feixe incidente. Corta-se um ou dois cantos do filme a fim de marcar a posição do mesmo relativamente ao cristal. A distância (D) entre o filme e o cristal deve ser o mais próximo possível de 3 cm, pois as cartas que são utilizadas para medir ângulos interplanares no diagrama de difração, estão calculadas para uma distância filme-amostra de 3 cm.

A seguir coloca-se o detentor do feixe. É indispensável verificar se todas as janelas do tubo de raios-X estão fechadas. Após estes dados preliminares liga-se o gerador de raios-X. Eleva-se a tensão até o valor de 40 kV e a corrente a 20 mA. Retira-se o suporte do filme, abre-se a janela e verifica-se através de uma tela fluorescente se o feixe passa pelo colimador, atinge o cristal e bate no detentor; fecha-se a janela, volta-se o suporte do filme no lugar. A seguir, abre-se a janela e o filme fica exposto durante uma ou duas horas, segundo as condições da experiência. Terminada a exposição, fecha-se a janela e revela-se o filme.

4.2.4. Análise dos resultados

O diagrama de difração obtido permite verificar se o material irradiado com raios-X é monocristalino ou policristalino. Se o material for monocristalino apresentará manchas isoladas, se for policristalino apresentará anéis concêntricos (fig. 4.3).



Monocristalino

Policristalino

Figura 4.3. Diagrama de Laue por retro-reflexão.

No caso de um diagrama de manchas, pode-se observar qual a simetria do cristal na direção perpendicular ao feixe incidente.

É possível orientar o cristal, ou seja corrigir a sua posição na cabeça goniométrica de modo que um eixo cristalográfico coincida com a direção do feixe de raios-X. Utiliza-se a carta de Greninger, determinando os ângulos que devem ser movidos na cabeça goniométrica para levar o cristal a posição correta. A indexação do diagrama consiste em se determinar os índices de Müller das famílias dos planos que deram origem as manchas que aparecem no diagrama. Pode ser feita com a carta de Greninger (para diagramas obtidos pelo método de retro-reflexão) ou pela carta de Leonhardt (para diagramas obtidos pelo método de transmissão).

4.3. Referências bibliográficas

- [1] AZAROFF, L.V. Elements of X-ray crystallography. New York, McGraw-Hill, 1968, p. 79-81.
- [2] NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966, p. 222-234.
- [3] CULLITY, B.D. Elements of X-ray diffraction. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967, p. 215-236.
- [4] KLUG, H.P. & LEROY, E.A. X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials. 2 ed., London, Wiley, 1974, p. 233-240.
- [5] KITTEL, C. Introduction to solid state physics. 4 ed. New York, Wiley, 1971, p. 48-51.

CAPÍTULO 5

AValiação DO DESEMPENHO DO GERADOR DE RAIOS-X FABRICADO

5.1. Avaliação pelo método de Laue

Para avaliação do funcionamento do equipamento foi utilizada a técnica de Laue. As condições do experimento obedeceram à padronização estabelecida para este método, ou seja, tensão de 40 KV e corrente de 20 mA. O tempo de exposição foi de uma hora.

Foi feito um diagrama de difração de um cristal de silício, orientado na direção $[111]$, (Fig. 5.1) pelo método de retro-reflexão no gerador construído.

A forma das manchas no filme da Fig. 5.1 é elíptica, e não circular como era de se esperar. Esta diferença é devida a um pequeno desalinhamento do colimador.

Fez-se, também, um diagrama de difração de raios-X do mesmo cristal, pelo método de retro-reflexão, utilizando-se filme Polaroid (Fig. 5.2). Nesta figura, observa-se que a amostra é invariante sob uma rotação de $2\pi/3$. A invariança ocorre em torno de um eixo 3 de simetria do cristal de silício orientado na direção $[111]$.

5.2. Conclusões

A compreensão dos mecanismos do funcionamento dos tubos de raios-X, e dos geradores representa o estabelecimento, gradativo, de "know-how" para a nacionalização destes equipamentos. Na atual conjuntura econômica, a construção do protótipo do gerador de raios-X, representa uma contribuição na área de desenvolvimento de instrumentação científica.

Procurou-se mostrar a vantagem em se utilizar um gerador com diferença de potencial retificada a onda completa. Para conseguir o diagrama mencionado no Ítem 5.1 foi necessário o tempo de exposição de uma hora. O gerador de raios-X convencional, fabricado pela Rigaku-Denki, utilizado no laboratório de Cristalografia, opera com uma diferença de potencial a meia onda. O tempo de exposição necessário para se conseguir o mesmo diagrama foi de, aproximadamente, três horas. Esta diferença de três vezes no tempo de exposição comprova, cabalmente, o melhor rendimento dos geradores a onda completa.

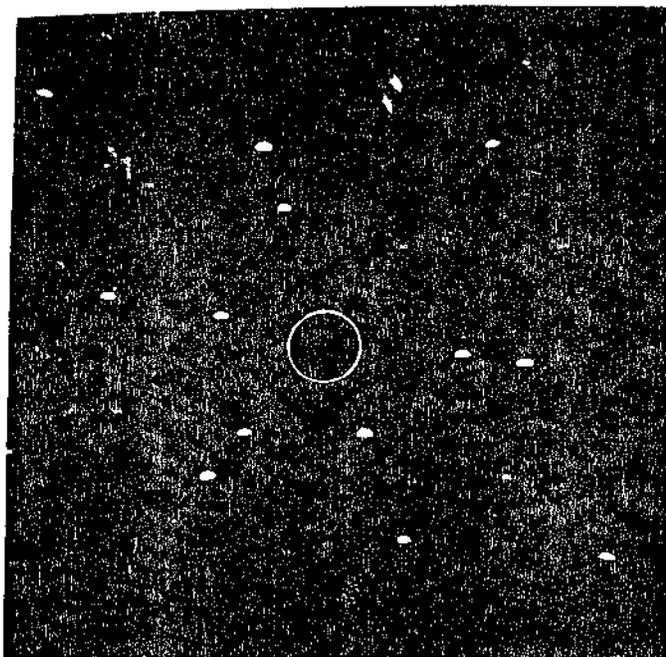


Figura 5.1 - Diagrama de difração de raios-X - Cristal de silício orientado na direção [111].

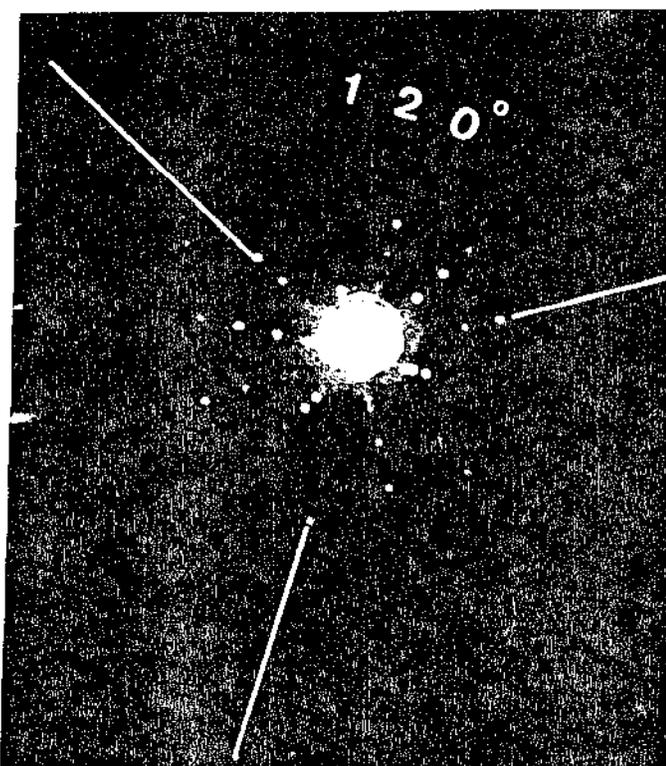


Figura 5.2 - Diagrama de difração de raios-X - Cristal de silício orientado aproximadamente na direção [111].

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostas algumas dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, bem como as soluções encontradas para superá-las.

1. No ítem 3.4.1.1 do capítulo 3 foi enfatizada a conveniência de uso da tensão retificada de onda completa, em relação ao emprego de tensão alternada ou retificada em meia onda.

Para alcançar este objetivo tivemos que construir um retificador de alta potência. A solução clássica deste retificador consiste no emprego de diodos montados em ponte. Tomou-se como base para projeto uma ponte de diodos empregada em raios-X médico, destinada a retificar tensões de 165 KV. Optou-se por um circuito retificador em ponte composto de onze diodos em série, conforme projeto descrito no capítulo 3.4.1.1.

Durante os testes de funcionamento do equipamento houve queima dos diodos, devido a sobrecarga de tensão na rede. A solução encontrada para protegê-los foi a de colocar em paralelo com cada diodo uma resistência, distribuindo assim, a tensão reversa igualmente em cada conjunto diodo-resistor.

2. Pelo fato de a relação de ampliação do transformador de alta tensão ser grande, necessitou-se de cuidados e técnicas especiais para o enrolamento e, isolamento do bobinado secundário. Este foi enrolado com fio condutor de cobre de secção capilar, composto de vinte e oito mil espiras. Uma explanação esquemática sobre o enrolamento do transformador de alta tensão é mostrada na Figura 3.16 do Capítulo 3. Este trabalho especializado foi feito nas oficinas da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz - Campinas).

3. O equipamento de raios-X construído encontra maior aplicação na área de pesquisa. Entretanto, é usado também na indústria metalúrgica. Por exemplo, na Alemanha, usa-se o método de Debye Scherrer, vulgarmente conhecido como método do pó, para identificação de substância cristalina.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostas algumas dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, bem como as soluções encontradas para superá-las.

1. No ítem 3.4.1.1 do capítulo 3 foi enfatizada a conveniência de uso da tensão retificada de onda completa, em relação ao emprego de tensão alternada ou retificada em meia onda.
Para alcançar este objetivo tivemos que construir um retificador de alta potência. A solução clássica deste retificador consiste no emprego de diodos montados em ponte. Tomou-se como base para projeto uma ponte de diodos empregada em raios-X médico, destinada a retificar tensões de 165 KV. Optou-se por um circuito retificador em ponte composto de onze diodos em série, conforme projeto descrito no capítulo 3.4.1.1.
Durante os testes de funcionamento do equipamento houve queima dos diodos, devido a sobrecarga de tensão na rede. A solução encontrada para protegê-los foi a de colocar em paralelo com cada diodo uma resistência, distribuindo assim, a tensão reversa igualmente em cada conjunto diodo-resistor.
2. Pelo fato de a relação de ampliação do transformador de alta tensão ser grande, necessitou-se de cuidados e técnicas especiais para o enrolamento e, isolamento do bobinado secundário. Este foi enrolado com fio condutor de cobre de secção capilar, composto de vinte e oito mil espiras. Uma explanação esquemática sobre o enrolamento do transformador de alta tensão é mostrada na Figura 3.16 do Capítulo 3. Este trabalho especializado foi feito nas oficinas da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz - Campinas).
3. O equipamento de raios-X construído encontra maior aplicação na área de pesquisa. Entretanto, é usado também na indústria metalúrgica. Por exemplo, na Alemanha, usa-se o método de Debye Scherrer, vulgarmente conhecido como método do pó, para identificação de substância cristalina.

ANEXO I

Precauções de Segurança Contra as Radiações

O operador de um equipamento de raios-X está exposto a dois riscos: o do choque elétrico (alta tensão) e da radiação. Por isso há necessidade de se considerar:

- Precauções de segurança contra o choque elétrico (aparelho de alta voltagem). O ânodo da maior parte dos tubos de raios-X é geralmente aterrado e o cátodo fica numa posição inacessível ao operador.
- Precauções de segurança contra as radiações pelo fato de que o uso das mesmas sempre apresenta algum risco ao ser humano, riscos que podem ser diminuídos ou eliminados, utilizando-se as devidas precauções. Podemos citar o progresso realizado na utilização dos raios-X, o uso das aplicações dos isótopos radioativos em diagnósticos e no tratamento de enfermidades, bem como o uso das radiações procedentes de fontes de Cobalto-60, Césio 137, etc ... e por fim o uso da energia nuclear com fins específicos.

Desde a descoberta dos raios-X por Roentgen foram reconhecidos os efeitos danosos do uso excessivo das radiações. Assim como os tecidos no ser humano reagem diante de uma pequena ferida, a fim de reparar o dano ocasionado, também podem, até certo ponto, recuperar-se dos efeitos causados por doses pequenas de radiação.

O Comitê Internacional de Proteção Radiológica é o organismo criado para estabelecer as normas e guias para a proteção contra as radiações, assim como as doses máximas permissíveis. Em muitos países tem-se designado "comitês" ou grupos científicos constituídos por especialistas na matéria para trabalhar em normas de proteção. Através destes "guias", para o estabelecimento de níveis permissíveis, trata-se de evitar ou reduzir os efeitos danosos que um excesso de radiação pode provocar. Ao se estabelecer estes valores máximos, consideram-se diversos fatores:

- O tipo de radiação
- A quantidade de radiação a que foi exposto o indivíduo
- A natureza química do material radioativo utilizado
- Se o indivíduo foi irradiado externamente ou se a irradiação se deu internamente
- outros fatores possíveis.

Define-se dose absorvida como sendo a quantidade de energia absorvida proveniente de qualquer radiação ionizante por grama de material [1]. Do ponto de vista biológico, algumas radiações são mais eficazes que outras, ou seja, que a mesma dose de radiação (em rad), produzidas por diferentes tipos de radiação, não provocam os mesmos efeitos biológicos ou com a mesma intensidade. Em Radiobiologia usa-se o rem como unidade de dose equivalente. Para se explicar o que se entende por rem é necessário introduzir o conceito de fator de qualidade ou qualidade de uma radiação.

Resumidamente, ao se utilizar o rem como unidade de medida, consideram-se os diferentes tipos de radiações, assim como a efetividade das radiações do ponto de vista biológico. Define-se um rem pela seguinte relação: - 1 rem = 1 rad x fator de qualidade, onde 1 rad é a unidade de dose absorvida por um material e é equivalente a 100 erg de energia absorvida por grama de qualquer substância. Há as seguintes equivalências: - 1 rad = 100 $\frac{\text{erg}}{\text{grama}}$ = 0,01 $\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$.

O conceito de fator de qualidade ou qualidade de uma radiação relaciona o efeito das radiações com os dos raios-gama, provenientes do Co-60. Para explicar melhor o que este fator representa, consideremos o caso de nêutrons rápidos. Para produzir o mesmo efeito biológico com estes, que com raios-gama do Co-60, necessita-se de uma dose igual a 1/10 da que se necessitaria com os penetrantes raios-gama. Diz-se, então que o fator de qualidade dos neutros rápidos é 10. A seguir transcrevemos uma tabela fornecendo os valores do fator de qualidade de [1,2,3].

Radiação	Fator de qualidade
Raios-X, raios- γ Raios- β e elétrons	1,0
Neutrons lentos	2,5
Neutrons rápidos e prótons até 10 MeV	10,0
Partículas alfa	10,0

Tabela I.1 - Fatores de qualidade.

Qualquer pessoa que não trabalhe com radiação, não deve receber irradiação acima de 500 milirem por ano além das radiações naturais e das recebidas por tratamento médico. Para as pessoas que trabalham com radiações este limite é em média 5 rem/ano. No caso de pessoas menores de 18 anos existem normas específicas, a saber:

- 1 - Não devem ser empregados nem treinados em departamentos de raios-X, laboratórios de radioisótopos, etc ... se estão expostos a mais de 500 milirem por ano.
- 2 - Não devem receber ou serem expostos a valores maiores que 0,1 rem por ano devido às atividades do tipo educativo (experiências de laboratório, demonstrações científicas, etc ...), entre tanto se houver experiências no laboratório estas devem ser planejadas de tal modo que os estudantes não recebam mais do que 0,01 rem em cada experiência.

Somos questionados a indagar que fatores podem intervir na exposição às radiações? Como minimizar a radiação durante uma experiência com substâncias radioativas?

- Para responder a estes questionamentos é preciso mencionar quais os fatores relacionados quando há exposição externa e interna das radiações ?

No que diz respeito a exposição externa das radiações há quatro fatores determinantes que são:

- 1 - Tipo e atividade da fonte de radiação
- 2 - Tempo de exposição
- 3 - Distância do observador ou do experimentador
- 4 - Blindagem

- 1.1. Nos equipamentos de raios-X, quanto maior for a voltagem aplicada ao tubo de raios-X, tanto mais penetrantes serão estes raios produzidos e, por conseguinte, maior a dose de radiação na zona aplicada. É importante também o tipo de detetor utilizado para realizar as medidas, pois quanto mais sensível seja este maior será a possibilidade de se utilizar fontes radioativas mais fracas, conseqüentemente o observador estará exposto à dose de radiação menor.
- 1.2. O tempo durante o qual um indivíduo está submetido a radiação é um fator importante. A dose absorvida é diretamente proporcional ao tempo de duração da exposição.
- 1.3. A intensidade ou velocidade de exposição de uma fonte é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o observador.
- 1.4. O uso da blindagem como proteção está baseado na interação da radiação com a matéria. Qualquer substância pode servir para diminuir a intensidade da radiação desde que se utilize a espessura adequada. Entretanto o tipo de material que se utiliza como blindagem depende do tipo de radiação que se deseja absorver. A diminuição da energia destas radiações pela blindagem é do tipo exponencial, conforme já foi explicado no capítulo 2. A espessura ($x 1/2$) de um determinado material que reduz a intensidade inicial à metade de seu valor inicial chama-se meia espessura.

Uma espessura de material equivalente a quatro vezes o valor da meia espessura reduzirá a intensidade dos raios-X ou gama a 1/16 de seu valor inicial ($1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2$). Geralmente, o poder absorvente de um material para os raios-X ou gama aumenta com o nº atômico do material, decorrendo daí o fato de o chumbo ser considerado um dos melhores materiais absorventes para este tipo de radiação.

Um elemento radioativo pode penetrar no corpo humano internamente. As formas possíveis são por inalação, ingestão, injeção e por absorção através da pele. É possível encontrar-se um elemento radioativo em suspensão no ar e, portanto ser inalado por uma pessoa. A precaução a ser feita consiste em que estas amostras radioativas devem ser guardadas em invólucros hermeticamente fechados.

As prevenções contra a ingestão de material radioativo são as mesmas que as das por inalação. Não se deve fumar, comer, beber ou fazer uso de cosméticos em laboratórios de radioisótopos. A manipulação de substâncias radioativas devem ser feitas com luvas plásticas ou de borrachas. Os materiais de laboratório como vasilhames de precipitação, pipetas, etc... não devem ser levados à boca.

A injeção de substâncias radioativas no corpo humano é feita por prescrição médica, entretanto, acidentalmente pode ocorrer por cortes ou rasgos ao se utilizar agulhas, bisturi ou outros instrumentos contaminados de material radioativo. Há casos, por simples feridas provocadas com vidro ou outros materiais impregnados com isótopo radioativo. O acidente neste caso deve ser comunicado ao instrutor de segurança imediatamente.

As substâncias radioativas podem ser absorvidas pelo corpo humano através da pele. Geralmente são os isótopos radioativos que se encontram soltos ou formam partes de certas substâncias, como a água capaz de ser absorvida na forma percutânea. O caso mais típico é o do trítio (isótopo do hidrogênio de nº de massa 3. ^3H) que podem ser encontrado substituindo o hidrogênio estável na molécula de água. No caso de se trabalhar com este tipo de substância devem ser usados o tipo de luvas e botas de laboratório apropriadas.

Procedimento empregados na inspeção ou monitoração das radiações.

Os requisitos necessários de controle para a segurança do ser humano que trabalha com materiais ou fontes radioativas são:

- Uma monitoração cuidadosa das áreas, salas, laboratórios, etc ... no local de trabalho com as radiações.

Por uma monitoração cuidadosa do pessoal exposto às radiações, entende-se o seguinte:

- Supervisão cuidadosa das áreas, salas, laboratórios onde se trabalham com radiação. Sempre que possível, deve-se trabalhar com amostras radioativas que tenham sido secas e cobertas ou, com amostras encapsuladas (estas amostras encapsuladas devem ser inspecionadas, periodicamente, para se detetar possíveis escapes nas mesmas). O uso de aventais de laboratórios e luvas é indispensável nos laboratórios de radioquímica.
- O uso de dosímetros, a fim de controlar a quantidade real de radiações absorvidas pelo pessoal é indispensável. Geralmente, utilizam-se os dosímetros de filme (fig. I.1).

Este dosímetro é formado por uma pequena placa de filme coberta com um material de espessura muito fina para evitar a ação da luz sobre o mesmo. O filme é colocado dentro de uma armação, possuindo uma pequena janela. Uma parte do filme fica coberta por filtros de diferentes materiais que dependem da natureza das radiações a que se expõem a pessoa que trabalha com as mesmas. Os quatro tipos de filtros mais usados são: cádmio, alumínio, cobre e chumbo. Pelo escurecimento que é notado no filme, após a sua revelação, é possível determinar a exposição

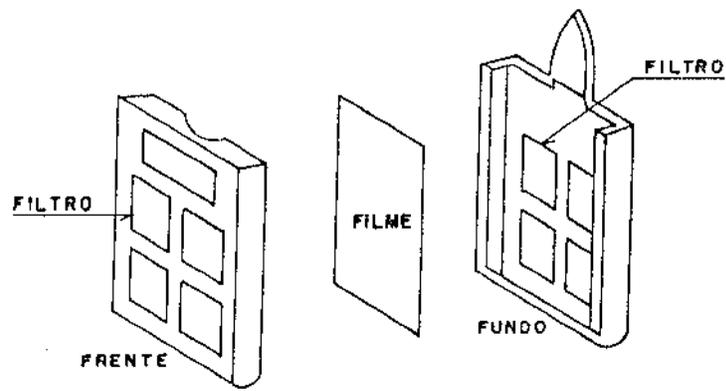


Figura I.1. Esquema de um dosímetro de filme.

aos diferentes tipos de radiações, pois o grau de escurecimento é uma medida da exposição recebida.

Outros tipos de dosímetros utilizados são os que empregam câmaras de ionização simples e eletroscópio. São chamados dosímetros de bolso, complementando o dosímetro de filme, entretanto não o substituem, principalmente se usados onde a exposição pode ser alta.

Referências bibliográficas

- [1] RODRIGUEZ, F., Andrés, ed. Usos pacíficos da energia atômica. Oak Ridge, Tennessee , Instituto de Estudos Nucleares, 1967, p. 111-138.
- [2] HENRY, H.F. Fundamentals of radiation protection. New York, Wiley-Interscience, 1969, p. 88-93.
- [3] MARTIN, A. & HARBISON, S.A. An introduction to radiation protection. London, Chapman and Hall, 1972, p. 22-43.

BIBLIOGRAFIA GERAL

- ANZENHOFER, K. et al. Eletrotécnica para escolas profissionais. 2 ed., São Paulo, Mestre Jou, 1974.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, Curso de fundição, 5 ed. São Paulo, ABM, 1974.
- AZAROFF, L.V. Elements of x-ray crystallography. New York, Mc-Graw-Hill, 1968.
- BRANSON, L.K. Introduction to electronics. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1967.
- BROWN, J.G. X-rays and their applications. New York, Plenum Press, 1966.
- CARDOSO, L.P. Microdensitometria de filmes de raios-X, usando raios-X. Campinas (SP), Instituto de Física, 1976, p. 11-13, Tese (Mestrado), Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP.
- COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3 ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1974.
- CULLITY, B.D. Elements of x-ray diffraction. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1967.
- DIFFRACTION X-Ray Tubes. Rigaku Denki, Kogyo Co. Ltd. (Instruction Manual n. ME 910 AB).
- GRAMOLA, B. & NEVONI, N. Departamento Técnico da C.P.F.L., Comunicação Privada.
- HENRY, H.F. Fundamentals of radiation protection. New York, Wiley-Interscience, 1969.
- INTERNATIONAL Tables for X-ray Crystallography. Birmingham England, Knoch Press, 1972, v. 2.

- JENKINS, R. & VRIES, J.L. X-ray powder diffractometry; an introduction to Eindhoven-Holland, N.V. Philips Gloeilampenfabrieken.
- MARTIGNONI, A. Transformadores 4 e., Porto Alegre, Globo, 1974.
- MARTIN, A. & HARBISON, S.A. An introduction to radiation protection. London, Chapman and Hall, 1972.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) Electrical Engineering Staff. Magnetic circuits and transformer. M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.
- MELLO, H.A. & BIASI, R.S. Introdução à física dos semicondutores. São Paulo, Edgard Blücher, 1975.
- MÜLLER, R.O. Spectrochemical analysis by x-ray fluorescence. New York, Plenum Press, 1972.
- NOVO, D.D. Eletrônica aplicada. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1973.
- NUFFIELD, E.W. X-ray diffraction methods. New York, Wiley, 1966.
- PARRISH, W. & TAYLOR, J. Norelco Reporter, 3,(6): 105, 1956.
- Properties and Selection of Metals. in: AMERICAN SOCIETY FOR METALS (ASM), Metals Handbook. 8 ed. Ohio, ASM, 1964, V.1.
- RENÓ, M.G. & BRESCIANI, Fº, E. Propriedades e usos de metais não ferrosos. São Paulo, Associação Brasileira de Metais, 1974.
- RODRIGUEZ, F., Andrés, ed. Usos pacíficos da energia atômica. Oak Ridge, Tennessee, Instituto de Estudos Nucleares, 1967.
- TORRE, J. Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão. São Paulo, Hemus, 1975.

WOOLFSON, M.M. An introduction to x-ray crystallography. London, Cambridge University Press, 1970.