

EVANDRO JESUS PIRES

DETERMINAÇÃO DO RIPPLE DE GERADORES DE RAIOS-X  
"A POTENCIAL CONSTANTE" PELO MÉTODO ESPECTROMÉTRICO

Tese de

MESTRADO

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS  
Rio de Janeiro, de de 1980

- a meus pais
- à Bernadete
- a Leonardo e Felipe

## AGRADECIMENTOS

- ao Prof. Jader Benuzzi Martins, pela orientação eficiente e dedicação;

- ao Prof. Hans Peter Nette, idealizador deste trabalho, pela indispensável e segura colaboração com valiosas críticas em todas as suas etapas;

- ao Prof. Luiz Tauhata, pela amizade e valiosas discussões, que tanto me ajudaram;

- ao Dr. Rex Nazaré Alves, ex-Diretor do Instituto de Radioproteção e Dosimetria, e à Dra. Dagmar Carneiro da Cunha, atual Diretora, pelas oportunidades e facilidades concedidas;

- ao colega Roberto Poledna, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, pela colaboração na realização deste trabalho;

- a todos os colegas da Divisão de Calibração, em especial a Pedro Barbosa Teixeira, Carlos A.A.L. Campos, Teógenes Augusto da Silva, Julio J.S. Estrada, Aparecida M.S. Campos e Isis Ferreira, pela amizade e colaboração nesta tese;

- à Helena S. Ferreira, pela excelente composição dactilográfica deste trabalho;

- aos colegas do IRD e CBPF, pela amizade e apoio;

- ao Gesellschaft für Strahlen-und Umweltforschung mbH - München, pela concessão de licença de estágio naquele conceituado Instituto;

- ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria, pelo apoio recebido.

## RESUMO

O espectro de fótons de um feixe de raios-X tem uma distribuição contínua, cuja intensidade atinge o valor zero para energias iguais ou maiores do que uma determinada energia, chamada energia máxima. Esse valor de energia máxima é equivalente à quilovoltagem aplicada ao tubo de raios-X. Entretanto, a oscilação desta quilovoltagem ("ripple") está relacionada ao tipo de retificação e à insuficiência do circuito de filtro, causando variações no valor de energia máxima do espectro.

Neste trabalho foi utilizado um método espectrométrico para medir a variação da energia máxima a fim de determinar o "ripple" de voltagem de geradores de raios-X tipo "Potencial constante". Para isso o feixe foi monitorado por um detetor de Ge intrínseco e analisado em termos de energia máxima por um analisador multicanal disparado por um pulso de controle periódico ("gate") de 0,5 ms de duração. Varrendo o período do "ripple" com o pulso de controle e medindo a variação correspondente da energia máxima do espectro, o "ripple" de voltagem é determinado em forma e amplitude. Um Siemens Stabilipan 250 F, um Siemens Stabilipan 300 F e um Siemens HG 150 de janela de berílio foram testados usando a voltagem e a corrente, especificadas pela forma de fabricação, como parâmetro. O "ripple" de voltagem medido variou de 0,6% para 2 mA e 120 kV, até 15,9% para 20 mA e 20 kV. O método permitiu a determinação do "ripple" de voltagem dos geradores de raios-X com uma precisão melhor que 1%.

## ABSTRACT

The photon spectrum of a X-ray beam has a continuous distribution with a cut-off at the high energy end. This maximum value of energy is equivalent to the kilovoltage applied to the X-ray tube. Therefore, oscillation of this kilovoltage (ripple) related to the type of rectification and insufficient filtration in the circuit causes oscillations of the maximum energy value of the spectrum.

In this paper a spectrometric method was used to measure the variation of the maximum energy in order to determine the voltage ripple of "Constant potential" X-ray generators. For that the spectrum was monitored by an intrinsic Ge detector and analyzed for its maximum energy by a multichannel analyzer triggered with a period control gate pulse of 0,5 ms duration. Sweeping the period of the ripple with the control pulse and thus measuring the corresponding change of the maximum energy of the spectrum determined the voltage ripple in amplitude and form. A Siemens Stabilipan 250 F, a Siemens Stabilipan 300 F and a Siemens HG 150 beryllium window were tested using the voltage and current specified by the manufacturers as parameter. The ripple measured changed from 0,6% for 2 mA and 120 kV; up to 15,9% for 20 mA and 20 kV. The method allowed the determination of the ripple with a precision better than 1%.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
AGRADECIMENTOS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
<u>CAPÍTULO I</u> - INTRODUÇÃO .....	1
<u>CAPÍTULO II</u> - FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	11
2.1 - PRODUÇÃO DE RAIOS-X .....	11
2.2 - TUBOS DE RAIOS-X .....	12
2.2.1 - Tubos de Radioterapia .....	12
2.2.2 - Tubos de Radiodiagnóstico .....	14
2.3 - TIPOS DE RETIFICAÇÃO .....	15
2.3.1 - Retificação de Meia-Onda .....	16
2.3.2 - Retificação de Onda Completa .....	19
A) - Circuito Retificador de Onda Completa .....	19
B) - Retificação em Ponte ou Circuito de Graetz .....	21
C) - Circuito Greinacher a Potencial Constante .....	21
2.3.3 - Circuito de Retificação Tri-Fásico .....	22
2.4 - FLUTUAÇÃO PERIÓDICA (RIPPLE) .....	24
2.5 - ESPECTROMETRIA DE RAIOS-X .....	28
<u>CAPÍTULO III</u> - MÉTODO UTILIZADO .....	32
3.1 - SISTEMA EXPERIMENTAL .....	32
3.2 - INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA MÁXIMA .....	38
3.3 - INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO RIPPLE .....	39
<u>CAPÍTULO IV</u> - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
4.1 - RESULTADOS .....	40

4.2 - DISCUSSÃO .....	42
<u>CAPÍTULO V</u> - CONCLUSÃO .....	51
<u>APÊNDICE A</u> - PROPAGAÇÃO DE ERROS .....	53
<u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	58

## LISTA DE FIGURAS

<u>Fig.</u>	<u>Pág.</u>
1.1 - Montagem experimental para detecção de radiação característica .....	8
1.2 - Detecção do limiar da quilovoltagem a partir do valor da energia característica da camada K do Ta e do Pb .....	9
2.2.1.1 - Tubo de raios-X terapêutico .....	13
2.2.2.1 - Tubo de raios-X diagnóstico de anodo giratório .....	15
2.3.1.1 - Circuito básico de raios-X usando retificação de meia-onda .....	16
2.3.1.2 - Variação da corrente através de um tubo de raios-X de anodo giratório da General Electric CRT-1 com a variação de voltagem .....	17
2.3.1.3 - Variação da corrente, através de um retificador Philips, com a variação da voltagem .....	17
2.3.1.4 - Variação com o tempo da voltagem desenvolvida no primário do transformador, a voltagem no tubo de raios-X, corrente no tubo de raios-X e intensidade dos raios-X. As correntes possíveis A e B vão depender da construção do catodo do tubo. A retificação utilizada é a de meia-onda .....	19
2.3.2.1 - Circuito retificador de onda completa .....	20
2.3.2.2 - Forma de onda da voltagem com retificação de onda completa .....	20
2.3.2.3 - a) Circuito de onda completa; b) Variação da corrente do pulso de raios-X com o tempo; c) Variação da corrente e do pulso de raios-X com o tempo, quando um condensador é colocado em paralelo com o tubo .....	21
2.3.2.4 - Circuito Greinacher a potencial constante com duas válvulas retificadoras .....	22
2.3.3.1 - Circuito retificador tri-fásico .....	23
2.3.3.2 - Forma de onda da voltagem do circuito tri-fásico .....	23

<u>Fig.</u>	<u>Pág.</u>
2.3.3.3 - Forma de onda do potencial do anodo e do filamento e da voltagem através do tubo de raios-X .....	24
2.5.1 - Espectros de raios-X antes (linha tracejada) e depois (linha cheia) de atravessar a filtragem inerente .....	29
2.5.2 - Curva da eficiência do detector em função da energia....	30
2.5.3 - Espectro de contagem .....	31
3.1.1 - Forma de onda do ripple e varredura com o pulso do gate .....	33
3.1.2 - Diagrama de bloco do sistema experimental utilizado....	34
3.1.3 - Circuito elétrico do gerador de pulsos (gate) .....	37
4.1.1 - Curva do ripple em função do inverso da quilovoltagem aplicada ao tubo HG 150 tendo a corrente como parâmetro .....	43
4.1.2 - Curva do ripple em função do inverso da quilovoltagem aplicada ao tubo 250 F, tendo a corrente como parâmetro .....	44
4.1.3 - Curva do ripple em função do inverso da quilovoltagem aplicada ao tubo 300 F, tendo a corrente como parâmetro .....	45
4.1.4 - Curva do ripple em função da corrente do tubo HG 150 tendo a quilovoltagem aplicada ao tubo como parâmetro .....	46
4.1.5 - Curva do ripple em função da corrente do tubo 250 F tendo a quilovoltagem como parâmetro .....	47
4.1.6 - Curva do ripple em função da corrente do tubo do Stabilipan 300 F tendo a quilovoltagem aplicada ao tubo como parâmetro .....	48
4.1.7 - Flutuação da energia máxima em função do tempo de retardo para 120 kV e correntes de 2,6 e 20 mA.....	49

LISTA DE TABELAS

<u>Tab.</u>	<u>Pág.</u>
4.1.1 - Incerteza na determinação da energia máxima .....	41
4.1.2 - 300 F (GSF) .....	41
4.1.3 - 250 F (IRD) .....	41
4.1.4 - Baixa Energia - HG 150 .....	42
A.1 - 300 F .....	54
A.2 - 250 F .....	55
A.3 - HG 150 .....	56-57

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Os raios-X foram descobertos em 8 de novembro de 1895 por Wilhelm Konrad Röntgen<sup>(1)</sup>, professor de Física da Universidade de Würzburg, Alemanha. O equipamento era constituído de um tubo de Crookes (para se estudar os raios catódicos) conectado a uma bobina de indução. Röntgen mostrou que a radiação-X atravessava vários tipos de materiais como papel, madeira, vidro, alumínio e outros metais demonstrando o seu poder de penetração. Ele observou que essa radiação obedecia à lei do inverso do quadrado da distância, fenómeno esse bem conhecido das experiências com ondas eletromagnéticas. Em 1909, Barkla<sup>(2)</sup> mostrou por meio de um duplo espalhamento que os raios-X poderiam ser polarizados, isto é, a radiação após o segundo espalhamento era anisotrópica. Ele mediu a dependência angular da intensidade da radiação e encontrou que ela, após o segundo espalhamento, alcançava um máximo quando as direções de propagação do feixe primário e do segundo espalhamento eram paralelas, e um mínimo, quando elas formavam um ângulo reto. Como a polarização das ondas eletromagnéticas era um fato bem conhecido, esse evento deu uma forte indicação da natureza dos raios-X.

Constatou-se que os raios-X eram ondas eletromagnéticas de pequeno comprimento de onda em 1912, quando M. von Laue e colaboradores<sup>(3)</sup> descobriram que os cristais atuam como gra -

des para difratar os raios-X. Eles incidiram um estreito feixe de raios-X num cristal (ZnS) e coletaram os raios resultantes numa placa fotográfica. Foi observado uma intensa imagem central circundada por pontos devido aos feixes que haviam sido desviados do feixe primário. Laue provou que a imagem observada somente poderia ser resultante de uma difração por arranjos cúbicos de centros espalhadores. Isto porque, pelo tipo de resultado, mostrou que os raios-X, ã semelhança das ondas luminosas, sofriam difração e que o comprimento de onda associado deveria ser da ordem de grandeza da distância entre os átomos do cristal que compõem a rede de difração. As mesmas conclusões, Débye e Scherrer<sup>(4)</sup> obtiveram por outro método. Um feixe de raios-X incidiu num tubo contendo um pó cristalino, onde os pequenos cristais individuais são orientados ao acaso e entre eles alguns tem orientação para produzir reflexão num dado plano. Claramente, tais cristais podem ter um ângulo em todas as direções, em relação ao feixe incidente, tal que os feixes difratados num dado plano formam uma superfície de um cone. Com isso, os raios difratados produzem uma imagem de anéis concêntricos numa placa fotográfica colocada perpendicular ao feixe primário. Esses anéis, provenientes dos diferentes planos, permitiram calcular a distância interatômica da rede cristalina.

Embora a física dos raios-X tivesse um grande impulso nos seus primeiros dias, somente em 1913, W.H. Bragg<sup>(5)</sup> e W.L. Bragg<sup>(6)</sup> desenvolveram o método do espectrômetro de ionização, que media as reflexões nos planos dos cristais. Esse método é de interesse histórico uma vez que se mediu pela primeira vez o comprimento de onda dos raios-X. Comparado com o método fotográfico, esse método é trabalhoso e lento, mas tem a grande vanta-

gem sobre os outros de fornecer medidas quantitativas precisas da intensidade dos feixes refletidos, sem o uso intermediário de microfotômetros, que sempre introduzem erros. Com isso em 1913, Moseley (<sup>Z</sup>) enunciou uma importante lei relacionando o espectro de raios-X com o número atômico. Essa lei foi obtida após a análise de espectros de raios-X de um grande número de elementos. Nela encontrou uma relação simples entre a energia das linhas K de um elemento e seu número atômico Z. Representou, em gráfico, a raiz quadrada da energia das linhas K contra o número atômico Z, para as linhas  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$  e obteve curvas muito próximas de linhas retas. Ele concluiu que a relação entre o número atômico e a energia indica a existência, no átomo, de uma grandeza fundamental que aumenta regularmente na tabela periódica. Essa quantidade é a carga positiva do núcleo. Essa experiência foi consistente com o conceito da tabela periódica de M. Mendelēeff.

Os raios-X são produzidos num tubo contendo dois eletrodos, onde se faz vácuo e é aplicado uma diferença de potencial entre eles. Um dos eletrodos emite elétrons termoionicamente e esses são acelerados para o outro. Na interação dos elétrons com o outro eletrodo, raios-X são originados. Eles não possuem uma só energia mas constituem um espectro complexo que é formado por duas partes distintas resultantes de dois diferentes mecanismos. Um espectro contínuo que possui todas as energias até um valor máximo equivalente à voltagem aplicada e, superposta a este, um espectro de linhas discretas. O espectro contínuo é chamado de "Bremsstrahlung" ou radiação de frenagem. Ele é originário da interação do elétron incidente com os elétrons ligados dos átomos do material alvo, isto é, a interação é com todo o

átomo. O espectro de linhas ou característico, tem origem da interação com os elétrons individuais mais ligados ao núcleo do átomo do alvo, principalmente os das camadas K e L.

Quando os raios-X passam através da matéria, sua intensidade é reduzida. Parte da sua energia é absorvida pelo material e parte é espalhada. O fato físico importante é que, para um dado material, reduções fracionárias constantes acontecem para iguais espessuras adicionais desse material. Este fator de atenuação constante é chamado de coeficiente de atenuação linear. Ele é uma função da energia dos fótons incidentes e do número atômico do material atenuador. Para a atenuação dos fótons, tem-se que considerar os mecanismos de interação dos fótons com o material. Na faixa de energia de 1 keV a 10 MeV a maioria das interações são devido a três mecanismos: o Efeito Fotoelétrico, o Efeito Compton e a Produção de Pares. O coeficiente de atenuação  $\mu$  é a soma dos coeficientes de atenuação Fotoelétrico ( $\tau$ ), Compton ( $\sigma$ ) e Produção de Pares ( $\kappa$ ).

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (1.1)$$

Os efeitos Fotoelétrico e Compton envolvem interações somente com os elétrons orbitais do material absorvedor e predominam quando a energia dos fótons não ultrapassa 1.02 MeV, que é equivalente a  $2m_e c^2$ , onde  $m_e$  é a massa de repouso do elétron. O efeito Fotoelétrico<sup>(8)</sup>, no qual o fóton desaparece, é a interação entre o campo eletromagnético do fóton e o campo elétrico de um elétron fortemente ligado ao núcleo. Para que o elétron seja ejetado, o fóton incidente tem que ter uma energia maior do que sua energia de ligação. A probabilidade deste efeito

umenta com a energia de ligação, é maior para elétrons na camada K do que na camada L e M, e predomina nos fótons de baixa energia.

Quando a energia do fóton é muito maior do que as energias de ligação dos elétrons, eles podem ser considerados livres. Logo, o efeito Compton<sup>(9)</sup> pode ser descrito como uma colisão entre um fóton e um elétron livre. O fóton é espalhado com uma energia  $E'$ , menor do que a energia  $E$  do fóton incidente, e depende do ângulo de espalhamento. A diferença de energia é transferida para o elétron, que sai do átomo com uma energia cinética  $E_e = E - E'$ . A probabilidade de ocorrer esse efeito é proporcional à concentração de elétrons no absorvedor, logo ao número atômico  $Z$ , mas diminui com a energia do fóton.

Na produção de pares<sup>(10)</sup> a interação é entre o fóton e o campo coulombiano do núcleo. Um fóton com energia  $E$  maior do que  $2m_e c^2$  quando passa na vizinhança do núcleo, se transforma num par elétron-pósitron ( $2m_e c^2 = 1.02$  MeV), com energia cinética igual a  $E_c = E - 2m_e c^2$ . O elétron e o pósitron perdem sua energia cinética dentro do absorvedor. Quando o pósitron perde sua energia cinética, ele se aniquila com outro elétron produzindo dois gamas com energias de 0.51 MeV. A adequada utilização desses fatos permite estender sua aplicação em radioterapia e radiodiagnóstico.

O espectro dos fótons produzidos por uma máquina de raios-X é uma função complexa do tipo de tubo, do material do alvo, do potencial acelerador e sua forma de onda e das filtros inerente e adicional que modificam, entre outros parâmetros, o feixe primário. Na prática, dependendo da aplicação, o conhecimento exato da distribuição espectral não é necessário,

e parâmetros mais simples são usados para a sua caracterização. A camada semi-redutora e a quilovoltagem aplicada através do tubo, juntamente com a taxa de exposição, por exemplo, poderiam descrever suficientemente um feixe de raios-X para radiodiagnóstico.

O estudo dos raios-X tem apresentado resultados importantes em pesquisas realizadas em Física fundamental, Física aplicada e tecnologia. Provocou grande impacto no campo da instrumentação e grandes avanços ocorreram entre 1940 e 1950, por exemplo, em contadores proporcionais e cintiladores. No ramo da medicina, ele provocou a ampliação de meios de terapia e diagnóstico, sendo hoje um dos ramos importantes na medicina moderna, chamado radioterapia e radiodiagnóstico. Aplicações mais específicas são as irradiações de materiais biológicos em pesquisa e a calibração de monitores pessoais e dosímetros. Em radioterapia, entretanto, além da penetração, a energia máxima absorvida numa região de tecido muito bem definida é da maior importância, devido à necessidade da correta aplicação de doses em locais pré-determinados. As variações cíclicas na energia dos fótons e na forma do espectro como um resultado da variação cíclica na alta tensão, acarretam uma mudança na sua energia efetiva e, conseqüentemente, na sua penetração no tecido irradiado. Essa variação da alta tensão é chamada de "flutuação (ripple) de tensão". Ela é uma função da corrente, da voltagem aplicada ao tubo e depende do tipo de fonte de alta tensão do gerador de raios-X empregado. O tipo de fonte varia da retificação de meia onda, não estável, até os de potencial constantemente estabilizados. A flutuação da fonte de corrente que alimenta o filamento do tubo, também pode dar origem a um ripple

de corrente.

Nas aplicações de raios-X que necessitam de precisão de exposição ou dose absorvida, o ripple precisa ser avaliado e pode ser determinado através de métodos usados basicamente para determinar a alta voltagem aplicada aos tubos de raios-X.

Greening em 1955<sup>(11)</sup> utilizou um método de medir a quilovoltagem dos tubos de raios-X, conectando altas resistências em série entre os seus terminais, na cabeça do tubo, e medindo uma pequena fração dessa alta voltagem numa resistência (divisor de tensão). Com esse método ele observou diretamente a quilovoltagem aplicada e o seu ripple, através de um voltímetro ou osciloscópio calibrado. Esse método, embora direto, requer certos cuidados, como por exemplo, os resistores devem ter grande estabilidade e a corrente através deles deve ser pequena (0.1 mA), comparada com a do tubo, para que este trabalhe em condições normais de operação. Além disso as resistências devem ter as mínimas indutância e capacitância possíveis, a fim de evitar distorções na forma de onda da quilovoltagem, com um apreciável ripple, principalmente quando é usado o osciloscópio. Outra dificuldade implícita nesse método é o difícil acesso a circuito de alta voltagem na cabeça do tubo, geralmente selado, que necessita para isso de uma adaptação especial.

Greening (1959)<sup>(12)</sup> utilizou uma câmara de ionização e um osciloscópio calibrado para medir as variações no fluxo dos fótons que ocorrem com a frequência da fonte da máquina de raios-X. Ele precisou de uma câmara de ionização com um grande volume sensível para gerar um sinal suficiente para ser medido diretamente com o osciloscópio. Uma câmara de ionização de grande volume teria o eletrodo central e a parede muito distancia -

dos. O tempo em que os elétrons gastariam para ir para os eletrodos seria maior do que o período da tensão alternada da máquina de raios-X impossibilitando, assim, de determinar o seu ripple. Para superar essa dificuldade ele introduziu um grande número de eletrodos para coletar os íons. Utilizou placas paralelas de alumínio, de 0,13 mm de espessura e espaçadas de 0.5cm. Aplicou uma diferença de potencial de 100 a 200 volts distribuídos uniformemente entre as placas através de divisores de tensão, possibilitando um tempo de voo dos elétrons bem menor do que o tempo do período do ripple.

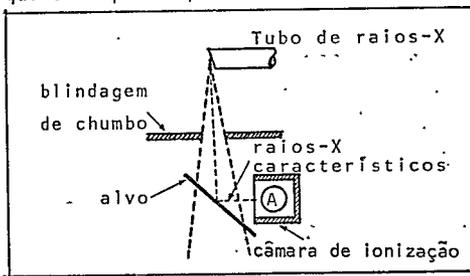


Fig. 1.1 - Montagem experimental para detecção de radiação característica.

A desvantagem de medir o ripple pela flutuação da exposição é que não se consegue diferenciar o ripple de voltagem do de corrente, uma vez que ambos, são medidos simultaneamente.

Matérias expostas a um feixe de raios-X de energia adequada emitem raios-X característicos por fluorescência. Trew (1972)<sup>(3)</sup> utilizou a variação da intensidade desses raios-X característicos em função da energia do feixe para determinar o valor da energia máxima dos fótons do feixe, com o auxílio de uma câmara de ionização.

Os materiais alvos foram posicionados no feixe primário inclinados de 45° em relação ao feixe, conforme a Fig. 1.1. Uma câmara de ionização de grande volume foi posicionada em A com sua janela inclinada de 45° em relação ao alvo, próximo deste, mas fora do feixe. Ela foi blindada adequadamente com chum-

bo para diminuir a contribuição da radiação espalhada. Os elementos alvos escolhidos foram o tântalo e o chumbo, por possuírem a radiação K de 67,7 keV e 88 keV, respectivamente. Verificou-se que a leitura da câmara aumentava sensivelmente com um aumento da quilovoltagem aplicada a partir do valor da energia característica da camada K do material. Foram efetuadas medidas da taxa de exposição dos raios-X característicos, variando a quilovoltagem aplicada ao tubo de 50 kV a 80 kV para o tântalo, e de 70 a 105 kV para o chumbo. O valor da quilovoltagem máxima foi determinado a partir da descontinuidade da curva para cada alvo. Utilizando-se vários alvos obteve-se uma curva de calibração da leitura do voltímetro do aparelho de raios-X em relação aos valores padrões de energia máxima dos alvos. A Fig. 1.2 mostra as curvas do tântalo e do chumbo, como material alvo.

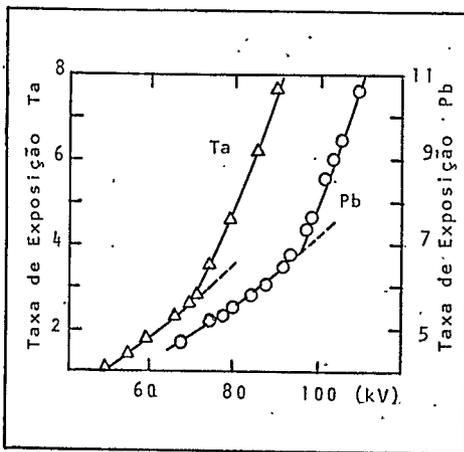


Fig. 1.2 - Detecção do limiar da quilovoltagem a partir do valor da energia característica da camada K do Ta e do Pb.

Esse método só permite a determinação da energia máxima de um aparelho de raios-X até a energia de 116,3 keV, que corresponde à radiação K do Urânio. O ripple correspondente pode ser determinado com modificações que serão descritas posteriormente,

no método utilizado no presente trabalho.

Drexler and Perzl em 1966<sup>(14)</sup> usaram um sistema espec

trométrico com um detetor calibrado de Ge (Li) de alta resolução, para obter os espectros de raios-X. A parte final desse espectro é uma região linear que diminui de intensidade, com o aumento da energia. A energia máxima<sup>(\*)</sup> é obtida extrapolando-se a região linear até o nível de background. Para isso, a parte final deve estar bem definida e o sistema de detecção calibrado em termos de energia. Na região de mais alta energia esse decréscimo forma uma "cauda", devido, principalmente, à resolução do sistema, à excessiva taxa de contagem e ao ripple da tensão aplicada ao tubo. Como esse sistema tem uma alta resolução e utiliza normalmente uma baixa taxa de contagem, a cauda formada é somente devida ao ripple. Por esse método não se pode determinar quantitativamente o ripple, mas permite observar qualitativamente a sua influência na parte final do espectro.

O presente trabalho utilizou o método espectrométrico desenvolvido por Drexler e Perzl<sup>(14)</sup> e por Birch et al.<sup>(15)</sup> em 1976, com pequenas modificações, para se medir o ripple. Os espectros foram analisados somente em pequenos intervalos periódicos selecionados da frequência.

Os pulsos do detetor foram amplificados e analisados por um analisador multicanal, em coincidência com esses pulsos de pequeno intervalo provenientes de um gerador, que selecionaram a região do ripple a medir. Esse método foi aplicado com sucesso para determinar o ripple de voltagem de geradores de raios-X a "potencial constante"<sup>(\*\*)</sup>.

(\*) Neste trabalho a energia máxima dos espectros dos fótons será chamada Energia (E).

(\*\*) Segundo o International Standardization Organization (ISO)<sup>(6)</sup> geradores de raios-X a "potencial constante" são os que possuem um ripple igual ou menor do que 10%, para todas as correntes do tubo.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 - PRODUÇÃO DE RAIOS-X

Raios-X são produzidos quando elétrons altamente acelerados são freiados por um material. Os fótons de raios-X têm energia variável de zero até um valor máximo dado pela quilovoltagem do tubo. A distribuição energética dos fótons constitui seu espectro. Num tubo de raios-X tem-se um filamento, onde os elétrons são liberados por emissão termoiónica. Essa emissão ocorre quando elétrons numa substância têm energia térmica suficiente para superar as forças que os mantêm preso a ela.

Os elétrons liberados pelo filamento são acelerados para o alvo, através de um alto potencial. Para que os fótons de raios-X tenham uma energia bem definida, esse potencial deverá ser constante. É possível utilizar um sistema de alta tensão em que a voltagem entre os seus terminais permaneça perfeitamente constante (Van de Graaff)<sup>(17)</sup>. A desvantagem desses sistemas são: o custo altíssimo, dificuldades de isolamento e perigo para o operador, uma vez que altas correntes podem fluir através delas requerendo grandes cuidados operacionais. Devido a essas desvantagens, utiliza-se a tensão alternada da rede e um auto-transformador elevador de tensão. Essa alta tensão é retificada e filtrada. Tendo-se em vista a insuficiência dos fil-

tros, permanecerã uma pequena flutuaçãõ.

## 2.2 - TUBOS DE RAIOS-X

Um tubo de raios-X consiste de um anodo e um catodo , sob alta tensãõ colocados dentro de um recipiente de vidro onde se fez vãcuo. A presençã de ar dentro do tubo evitarã que os elẽtrons atinjam total velocidade na viagem do catodo para o anodo, em virtude das colisões com as molẽculas de gãs existentes, alẽm de levar o filamento a oxidaçãõ. O anodo ẽ um pequeno alvo de tungstẽnio ou molibdẽnio incrustado numa peçã maciça de cobre, e o catodo um filamento de tungstẽnio. Quando este ẽ aquecido, elẽtrons sãõ liberados por efeito termoiõnico e sofrem a açãõ do campo elẽtrico produzido pela alta tensãõ entre os eletrodos, sendo acelerados para o alvo onde interagem e produzem raios-X e calor por colisãõ com o anodo. Mais de 99% da energia dos elẽtrons ẽ convertida em calor e o restante ẽ transformado em raios-X. Essa enorme parcela transformada em calor no anodo ẽ removida por um sistema de refrigeraçãõ para evitar que se danifique por superaquecimento.

### 2.2.1 - Tubos de Radioterapia

Para os tubos de radioterapia, os anodos possuem uma peçã maciça de cobre, por ser um excelente condutor tẽrmico , transportando para o exterior o calor gerado no alvo de tungstẽnio.

Nesses tubos o ângulo do alvo varia de 26 a 32 graus<sup>(18)</sup>, dando assim um grande cone útil de radiaçãõ, que ẽ

utilizado em terapia de uma grande área numa pequena distância fonte-alvo.

Os tubos terapêuticos modernos são imersos em óleo e a energia térmica desenvolvida no anodo é transferida pela peça maciça de cobre para o óleo. Esse circula para fora do tubo passando por um trocador de calor e ali, através de refrigeração à água, o calor é removido. Esse sistema de refrigeração é necessário porque, embora a taxa de energia entregue ao alvo seja baixa, o tempo de exposição é longo.

Na construção dos anodos desses tubos devem ser tomados certos cuidados, pois para energia acima de 200 keV ocorre emissão secundária. Os elétrons secundários são ejetados e podem alcançar o invólucro de vidro ou outra parte do tubo, gerando raios-X secundários indesejáveis. Esse problema pode ser tornado usando um copo protetor conforme ilustra a Fig. 2:2.1.1.

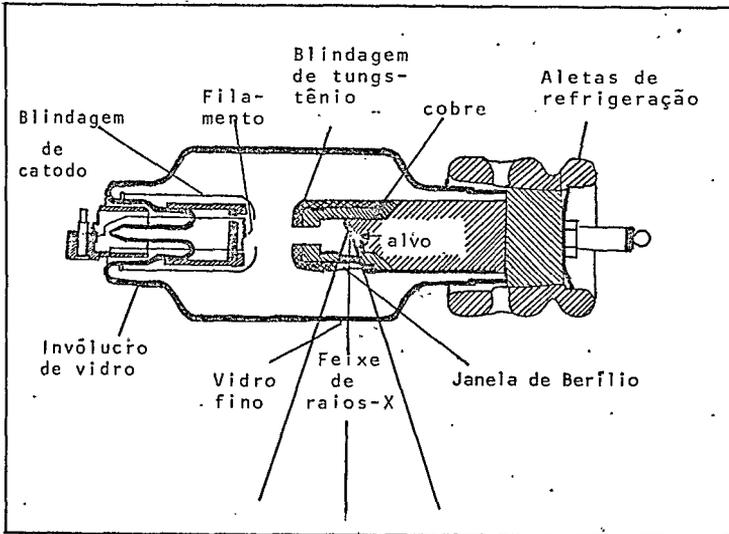


Fig. 2.2.1.1 - Tubo de raios-X terapêutico.

Este copo é constituído de uma camada de cobre revestido de tungstênio, que por possuir um alto número atômico e alta densidade, absorve os raios-X indesejáveis. Por isso não é necessário uma grande proteção de chumbo em volta do tubo. Nesse copo existe uma janela de berílio, que tem um Z baixo, por onde os elétrons e fótons de raios-X de baixíssima energia são filtrados. O invólucro de vidro na parte onde emergem os fótons é mais fino do que no resto, para não atenuar apreciavelmente os fótons de raios-X.

Para que esses tubos possam operar com uma margem de segurança sem serem danificados, existem curvas de dissipação máxima dadas pela forma de fabricação, que dependem da voltagem aplicada, da corrente e do tipo de retificação utilizada.

### 2.2.2 - Tubos de Radiodiagnóstico

Os tubos de radiodiagnóstico são projetados para produzir uma imagem bem definida em materiais biológicos. Para isso, é necessário que os raios-X emergjam de uma pequena área do anodo, isto é, que este seja praticamente pontual. A intensidade deve ser muito grande para que o tempo de exposição seja menor possível devido ao movimento do material biológico. Caso contrário, não se obtém uma boa definição na imagem. A maioria dos alvos dos tubos de raios-X diagnósticos possui um ângulo de inclinação entre 16 e 17.5 graus<sup>(18)</sup>. Com essa inclinação pode-se aumentar a área do alvo onde os elétrons vão colidir, facilitando a refrigeração, embora o campo de radiação permaneça praticamente pontual. Para evitar que o alvo seja danificado pela alta corrente entregue sempre na mesma área, foi introduzido o anodo

giratório. Nestes, o anodo é um disco de metal preso a um eixo, em cujo final está um rotor que gira cerca de 3000 r.p.m. Fora do invólucro de vidro encontra-se o estator do motor: A Fig. 2.2.2.1 mostra esse tubo. Com isso a energia térmica pode ser dissipada mais facilmente, pois a área de dissipação é maior, e é possível aumentar a carga de utilização desses tubos de raios-X.

Em máquinas de raios-X diagnóstico a taxa de energia entregue ao alvo é maior do que nos tubos terapêuticos. Embora o tempo de exposição seja muito curto, a energia térmica é muito alta.

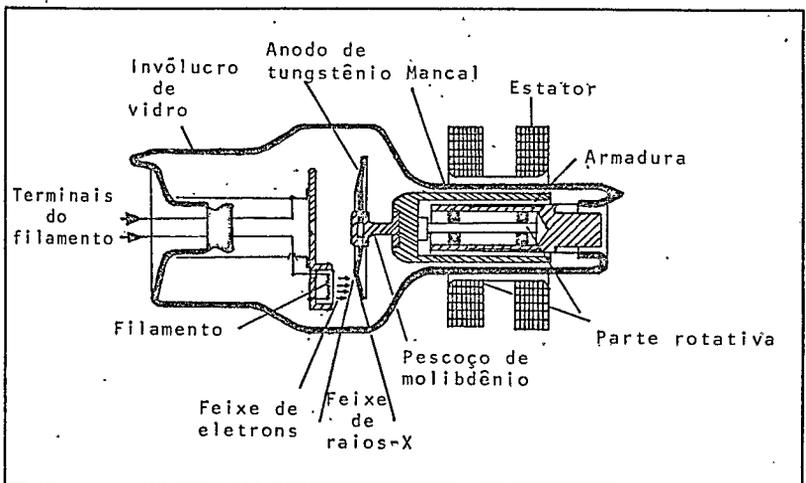


Fig. 2.2.2.1 - Tubo de raios-X diagnóstico de anodo giratório.

### 2.3 - TIPOS DE RETIFICAÇÃO

Um tubo de raios-X pode trabalhar como um retificador devido à sua estrutura. Para evitar a corrente no ciclo inverso

opera-se somente a valores mais baixos de corrente ou adiciona-se um circuito extra de retificação em série com o tubo.

### 2.3.1 - Retificação de Meia-Onda

A retificação de meia-onda é o mais simples tipo de retificação. Na Fig. 2.3.1.1 uma válvula retificadora é colocada entre o transformador de alta tensão e o tubo de raios-X.

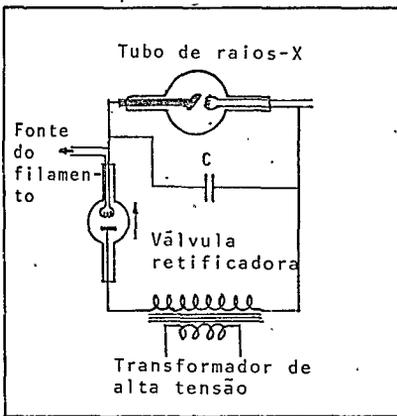


Fig. 2.3.1.1 - Circuito básico de raios-X usando retificação de meia-onda.

A válvula retificadora possui dois eletrodos, um cátodo e um ânodo, dentro de um invólucro de vidro evacuado. O eletrodo emissor de elétrons quando é aquecido libera elétrons por emissão termoiónica.

Quando se polariza o eletrodo coletor positivo em relação ao emissor, elétrons serão acelerados para o coletor, estabelecendo-se uma corrente através da válvula. No ciclo inverso, não se tem corrente pois o coletor não emite elétrons.

Pode-se observar que o diodo e o tubo de raios-X têm o mesmo funcionamento, inclusive como válvula retificadora. Mas o diodo, ao contrário do tubo, não conduz no ciclo inverso. Isso pode ser em parte explicado observando-se as curvas características de cada um. As Figs. 2.3.1.2 e 2.3.1.3 mostram essas curvas. Se, por exemplo, no secundário do transformador exis

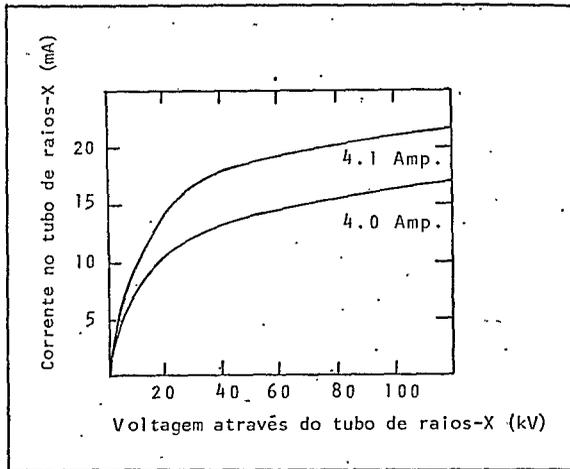


Fig. 2.3.1.2 - Variação da corrente através de um tubo de raios-X de anodo giratório da General Elétrica CRT-1 com a variação da voltagem.

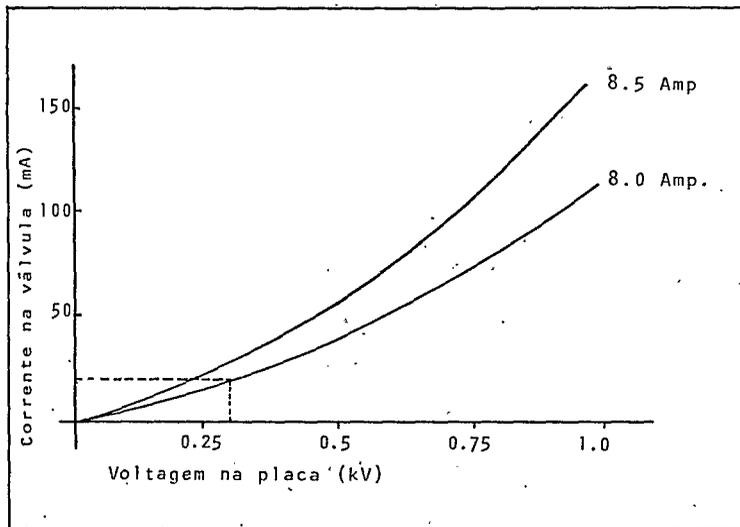


Fig. 2.3.1.3 - Variação da corrente, através de um retificador Philips, com a variação da voltagem.

tir 80 kV e as correntes forem de 8 ampères no filamento do diodo, e 4 ampères no tubo de raios-X, observa-se pela curva característica do tubo de raios-X mostrada na Fig. 2.3.1.2 que sua corrente será de 15,5 mA.

Observando-se a curva característica do diodo para corrente de 15,5 mA, Fig. 2.3.1.3 a voltagem entre o anodo e catodo será de 0,3 kV, isto é, dos 80 kV aplicados entre as duas válvulas, 79,7 kV é aplicado ao tubo de raios-X e 0,3 kV no diodo. Assim, praticamente toda a energia será entregue ao tubo de raios-X e não haverá corrente no ciclo inverso. Como a potência dissipada no diodo é muito pequena e o alvo muito grande, ao contrário do alvo do tubo de raios-X, seu anodo não aquecerá e não liberará elétrons no ciclo inverso para o catodo. Raios-X também são produzidos pela válvula retificadora, mas devido à sua baixa energia (0,3 keV), eles são absorvidos.

A Fig. 2.3.1.4 mostra as formas de onda da voltagem e da corrente deste tipo de retificação.

Depois de retificada, coloca-se um capacitor em paralelo com o tubo de raios-X cuja descarga é função da impedância do circuito. Esta descarga, por unidade de tempo, será menor quando maior for o valor da constante de tempo RC para uma dada corrente.

Para melhorar a determinação da energia, utiliza-se filtros de Pb, Sn, Cu e Al que estreitam e concentram o espectro em torno de seu valor máximo, devido à dependência do coeficiente de atenuação de massa desses materiais com a energia.

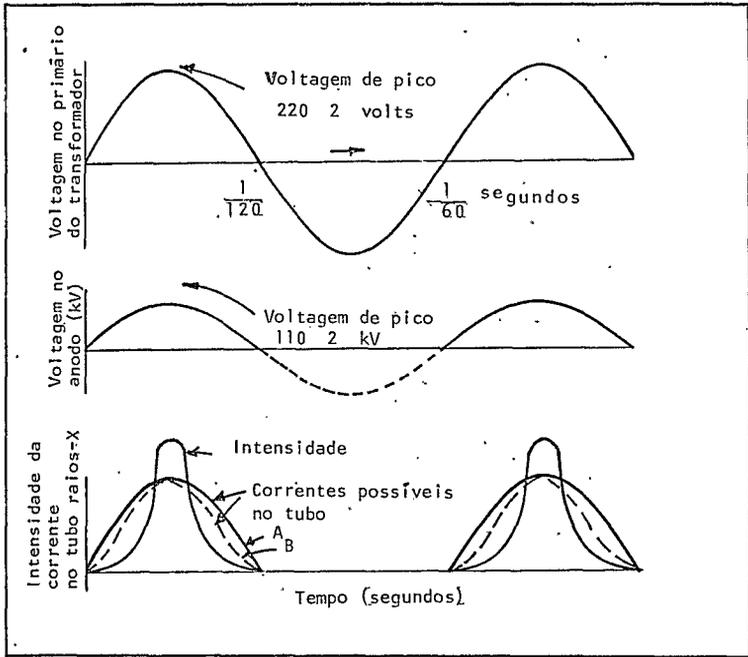


Fig. 2.3.1.4 - Variação com o tempo da voltagem desenvolvida no primário do transformador, a voltagem no tubo de raios-X, corrente no tubo de raios-X e intensidade dos raios-X. As correntes possíveis A e B vão depender da construção do catodo do tubo. A retificação utilizada é de meia-onda.

### 2.3.2 - Retificação de Onda Completa

A retificação de meia-onda não é eficiente pois no ciclo inverso e na ausência do circuito de filtro, raios-X não são produzidos.

Para se ter maior eficiência, usa-se a retificação de onda completa.

A) Circuito retificador de onda completa.

A Fig. 2.3.2.1 mostra esse circuito.

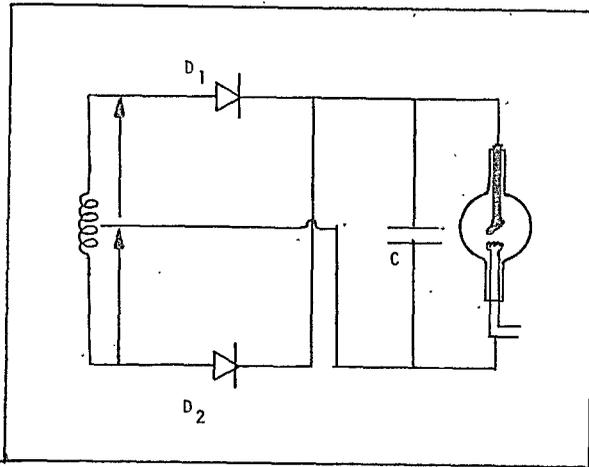


Fig. 2.3.2.1 - Circuito retificador de onda completa.

No semi-ciclo positivo quando um dos diodos está conduzindo, o outro está cortado. No ciclo inverso haverá uma inversão nos estados dos diodos e a forma de onda na saída é mostrada na Fig. 2.3.2.2.

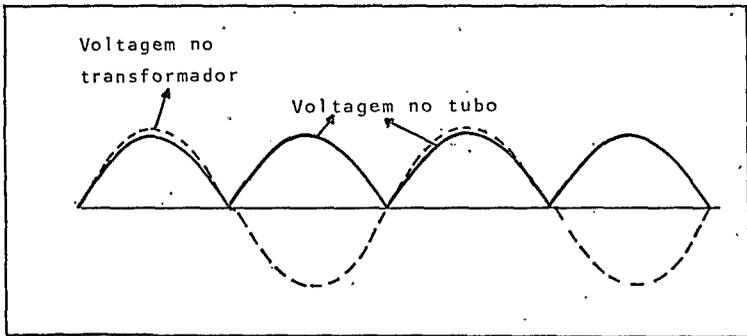


Fig. 2.3.2.2 - Forma de onda da voltagem com retificação de onda completa.

A desvantagem desse tipo de retificador é que somente metade da tensão desenvolvida no secundário é aplicada ao tubo.

B) Retificação em ponte ou circuito de Graetz

A Fig. 2.3.2.3 mostra o circuito. A retificação em ponte é formada por dois pares de diodos (1 e 3; 2 e 4). No semi-ciclo positivo o par (1 e 3) está conduzindo enquanto o par (2 e 4) está cortado. No semi-ciclo inverso haverá inversão nos estados desses pares e a forma de onda é a mesma na Fig.2.3.2.2.

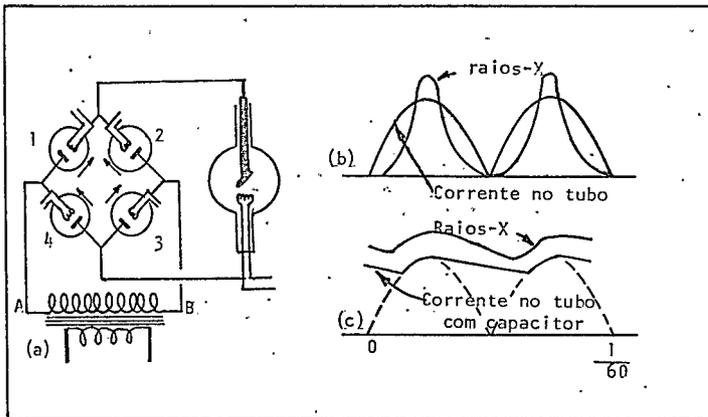


Fig. 2.3.2.3 - a) Circuito de onda completa; b) Variação da corrente do pulso de raios-X com o tempo; c) Variação da corrente e do pulso de raios-X com o tempo, quando um condensador é colocado em paralelo com o tubo.

A vantagem desse tipo de retificação é que, ao contrário do de onda completa anterior, toda a alta tensão desenvolvida no secundário do transformador é aplicada ao tubo.

c) Circuito Greinacher a potencial constante

Esse circuito é o melhor que se conhece para a polarização de tubos de Raios-X pois duplica a alta tensão (V) e realiza a retificação de onda completa (17). Como se observa na

Fig. 2.3.2.4, as duas vlvulas retificadoras conectadas em sentido oposto, no final do secundrio do transformador, geram uma diferena de potencial de 2V entre os terminais do tubo de raios-X. Essas vlvulas retificadoras devem ser apropriadas para resistir a essa alta tenso.

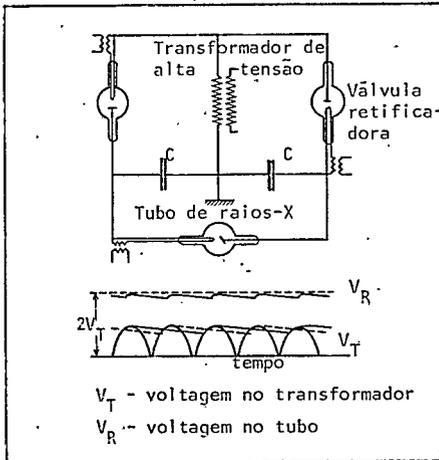


Fig. 2.3.2.4 - Circuito Greinacher a potencial constante com duas vlvulas retificadoras.

### 2.3.3 - Circuito de Retificao Tri-Fsico

Na maioria dos geradores de raios-X modernos,  $\text{e}$  usada uma fonte de alimentao tri-fsico ao invs das de fase simples. O funcionamento  $\text{e}$  similar aos j  $\text{a}$  descritos. A Fig.2.3.3.1 mostra, simplificadamente, um circuito retificador de onda completa tri-fsico. As bobinas A,B e C s  $\text{o}$  3 enrolamentos de secundrio do transformador de alta tenso. As formas de onda de tenso nos trs enrolamentos s  $\text{o}$  mostradas na Fig. 2.3.3.2 e p  $\text{o}$  de ser observado que est  $\text{o}$  defasadas entre si.

Considerando que a parte do ciclo, no final de A,  $\text{e}$  mais negativa,  $A_2$  conduzira e a voltagem no catodo do tubo de raios-X ser  $\text{a}$  mesma do final de A. O mesmo ocorre para B e C.

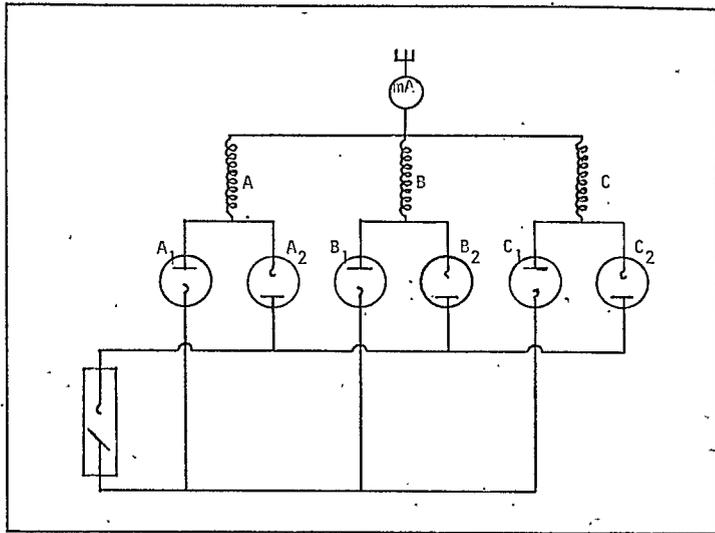


Fig. 2.3.3.1 - Circuito retificador tri-fásico.

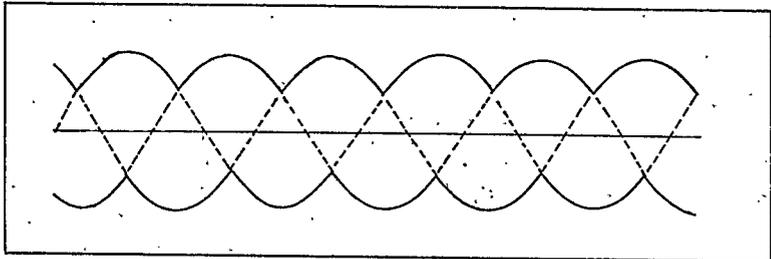


Fig. 2.3.3.2 - Forma de onda da voltagem do circuito tri-fásico.

Supondo que o final do enrolamento A é mais positivo,  $A_1$  conduzirá e a voltagem no alvo será a mesma que a do final do enrolamento A. O mesmo ocorre para os enrolamentos B e C quando o final é mais positivo. Na parte A da Fig. 2.3.3.3, vê-se a voltagem no anodo (alvo) do tubo. A tensão entre o catodo e o alvo num certo instante  $t$  é dada pela separação entre os conjuntos A e B e indicada pelas linhas,  $P_1, P_2 \dots$  A voltagem resultante aplicada ao tubo é mostrada na parte C da mesma figura. Pode

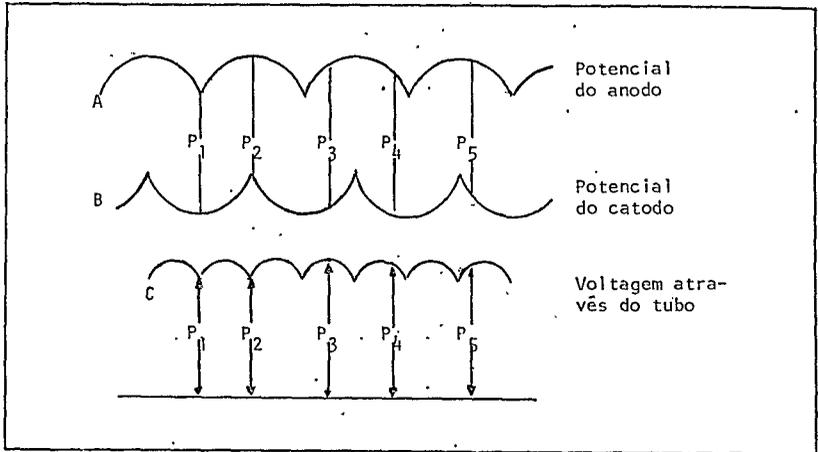


Fig. 2.3.3.3 - Forma de onda do potencial do anodo e do filamento e da voltagem através do tubo de raios-X.

-se observar que ela apresenta um ripple. Adicionando-se um capacitor em paralelo com o tubo pode-se reduzir esse ripple.

## 2.4 - FLUTUAÇÃO PERIÓDICA (RIPPLE)

O ripple é uma flutuação periódica introduzida no rendimento de uma máquina de raios-X proveniente do seu circuito elétrico. Essa flutuação periódica tem a mesma frequência da rede de alimentação. Existem dois tipos de ripple: o de corrente e o de tensão. O ripple de corrente é gerado pela flutuação da voltagem aplicada ao filamento para liberar os elétrons, que se são acelerados contra o alvo. Quando uma diferença de potencial flutuante é aplicada ao filamento para liberar os elétrons, ela poderá induzir-lhe uma flutuação de temperatura, acarretando uma variação na liberação de elétrons. Isso introduz uma flutuação na corrente, chamada ripple de corrente.

Se os elétrons liberados do metal não formarem carga espacial a emissão é função da temperatura <sup>(19)</sup> e obedece à equação de Richardson-Dushman <sup>(20)</sup> que estabelece:

$$J = A_0 T^2 e^{-\phi/kT} \quad (2.4.1)$$

onde:

J = densidade de corrente,

$A_0$  = constante característica do material,

k = constante de Boltzmann,

$\phi$  = função trabalho do material.

Essa equação é baseada na hipótese de que o campo elétrico é suficiente para que todos os elétrons sejam liberados, e que não haja carga espacial.

Para aquecer o filamento utiliza-se uma fonte de tensão, que gera uma corrente I. Através de sua resistência inerente ao próprio metal, a energia dissipada, dada pela lei de Joule, é:

$$E = V_f I t \quad (2.4.2)$$

onde:

E = energia dissipada,

$V_f$  = voltagem aplicada ao filamento,

I = corrente no filamento,

t = tempo.

O ideal é que essa fonte de tensão fosse constante, entretanto, mesmo sendo retificada e filtrada, haverá uma pequena flutuação. Podem acontecer ligeiras flutuações em seus parâmetros intrínsecos em função da temperatura ou de seu projeto. Se

a fonte de tensão aplicada for alternada, os mesmos eventos citados anteriormente podem ocorrer. Se a flutuação da tensão for suficiente para variar a temperatura, induz uma variação no número de elétrons liberados.

O ripple de tensão é definido como a flutuação periódica da alta voltagem aplicada ao tubo de raios-X que ocorre com a frequência da fonte de alimentação, devido à insuficiência do circuito de filtro.

$$r = \text{ripple (\%)} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \times 100 \quad (2.4.3)$$

onde:

$E_{\max}$  e  $E_{\min}$  são os valores máximo e mínimo, respectivamente da alta voltagem aplicada ao tubo de raios-X.

A utilização de  $E_{\max}$  ao invés do valor médio utilizado na definição do ripple em eletrônica se deve à convenção adotada pela ISO(6).

Este ripple é somente devido à variação do potencial acelerador dos elétrons emitidos. Estes elétrons tem uma distribuição estatística de velocidade inicial. Mesmo que fossem acelerados por um potencial constante chegariam ao alvo segundo essa distribuição. Isso implica numa flutuação intrínseca. Essa flutuação é da ordem de eV sendo o potencial acelerador de  $10^5$  eV. Logo, o ripple de tensão é devido somente à variação do potencial acelerador dos elétrons, pois a flutuação intrínseca é desprezível.

O ripple de tensão é função da corrente do tubo, isto

é, para a mesma kV, a medida que a corrente aumenta, o ripple aumentará. Isso depende do tipo de retificação utilizado e da eficiência do circuito de filtro.

O ripple de tensão induz uma variação no espectro dos fótons e, conseqüentemente, na exposição. O de corrente induz somente uma variação na exposição. Dependendo do método de medida utilizado, pode-se medir ambos simultaneamente. Nesse caso o ripple de corrente pode mascarar o de tensão, se este for pequeno em relação a aquele. No método utilizado neste trabalho, mediu-se somente o ripple de tensão, através dos espectros dos fótons, como será visto posteriormente.

Pela lei de Duane-Hunt<sup>(21)</sup> a energia máxima de um espectro de raios-X é relacionada com a quilovoltagem aplicada ao tubo (kV)

$$E_{\max} = e \text{ kV} = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} \quad (2.4.4)$$

$$\lambda = \frac{hc}{e \text{ kV}} = \frac{12,4}{\text{kV}} \text{ (Å)}$$

onde:

e = carga do elétron,

kV = quilovoltagem aplicada ao tubo,

h = constante de Planck,

c = velocidade da luz

v = frequência da radiação emitida,

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação emitida.

Para o tipo de circuito de filtro utilizado nessas máquinas com um capacitor em paralelo ao tubo de raios-X pode-se obter pela expressão (2.4.5) retirada da referência (22).

$$r' = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_m} = \frac{I}{420 CR_L} \quad (2.4.5)$$

mas

$$E_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_{\max} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} E_{\max} = 0.637 E_{\max}$$

logo:

$$r' = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{0.637 E_{\max}} \quad \therefore \quad r = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} = \frac{0.637}{420 CR_L} = \frac{1.052 \times 10^{-3}}{CR_L}$$

mas

$$R_L = \frac{E_m}{I} = \frac{0.637 E_{\max}}{I} \quad (2.4.6)$$

$$r = \frac{1.052 \times 10^{-3} I}{C \times 0.637 E_{\max}} \quad r = \frac{1.651 \times 10^{-3} \times I}{C \times E_{\max}} \quad (2.4.7)$$

onde:

$E_m$  = tensão média,

$C$  = capacitância,

$R_L$  = resistência de carga,

$I$  = corrente no tubo.

A expressão do ripple (2.4.7) mostra que ele é uma função linear da corrente quando se fixa a quilovoltagem aplicada ao tubo. O ripple também é uma função linear de  $1/E_{\max}$ , quando se fixa a corrente do tubo.

## 2.5 - ESPECTROMETRIA DE RAIÓS-X

O espectro de raios-X (intensidade  $I$  dos fótons em fun

ção da energia  $E$ ) emitido, ao deixar o alvo e ainda dentro do tubo, possui uma distribuição contínua caracterizada na Fig. 2.5.1 pela linha tracejada. A intensidade desse espectro tende a zero para um valor máximo de energia que é dado pela quilovoltagem aplicada ao tubo. Os fótons ao atravessarem o óleo, que

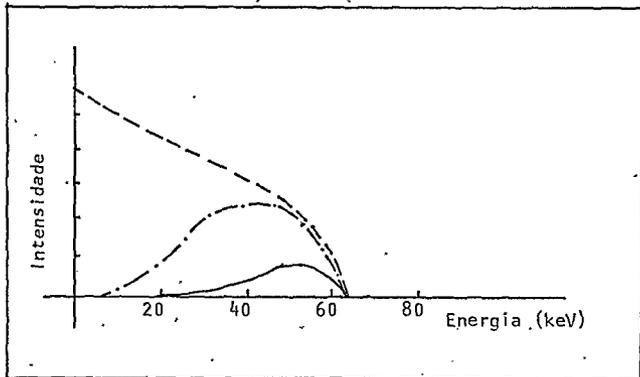


Fig. 2.5.1 - Espectros de raios-X antes (linha tracejada) e depois (linha cheia) de atravessar a filtragem inerente.

refrigera o tubo, e o invólucro de vidro, são atenuados conforme a sua energia, dando origem ao espectro mostrado na Fig. 2.5.1 (linha traço e ponto).

Para medir o espectro emitido pelo tubo de raios-X pode-se utilizar vários tipos de detectores. O Ge intrínseco, devido à sua resolução, com analisador multicanal é um dos mais usados espectrômetros para raios-X.

A interação do espectro dos fótons com o Ge produz um espectro de pulsos de elétrons. Este espectro de pulsos é dependente da eficiência do Ge e do escapamento dos fótons Compton.

A eficiência é dependente do tipo de interação entre os fótons e o material do detetor. Na faixa de energia conside-

rada, as interações são do tipo efeito fotoelétrico e efeito Compton. No caso do Ge intrínseco estes efeitos são responsáveis por uma eficiência perto de um para os fótons de baixa energia e uma diminuição da eficiência com o aumento da energia. A Fig. 2.5.2 mostra sua curva típica de dependência.

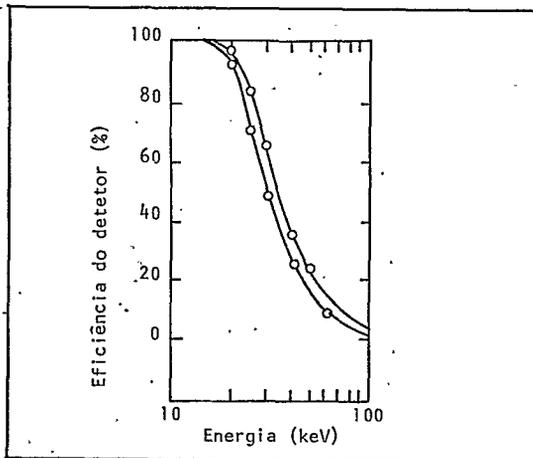


Fig. 2.5.2 - Curva da eficiência do detector em função da energia.

O escape parcial dos fótons Compton gera uma distribuição Compton no espectro dos pulsos analisados pelo multicanal. Este espectro de pulsos é modificado pelo tempo morto e a resolução em tempo do analisador. O tempo morto causa uma perda dos pulsos e é proporcional à intensidade destes. A resolução com o tempo pode acarretar que dois ou mais pulsos não sejam resolvidos, gerando um pulso de um fóton fictício.

Adicionalmente o espectro de contagem tem contribuições provenientes da radiação de fundo (background) e ruídos eletrônicos. A Fig. 2.5.3 mostra essas contribuições.

Por isso a eficiência e a distribuição Compton do de-

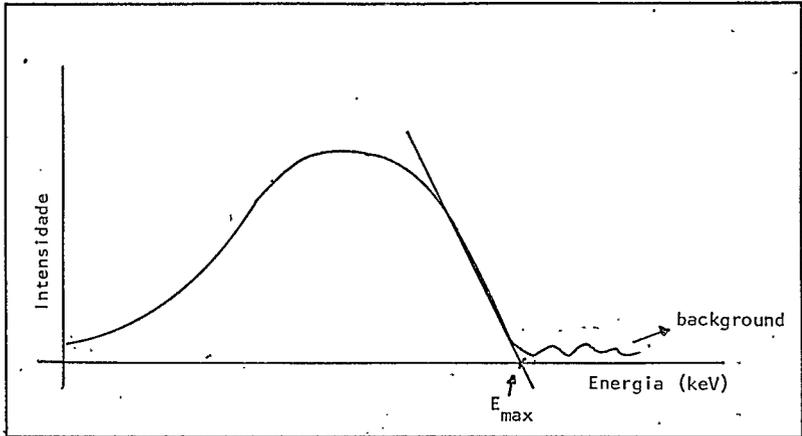


Fig. 2.5.3 - Espectro de contagem.

tetor, bem como a resolução em tempo do analisador vão influenciar o espectro de contagem obtido.

Experimentalmente precisa ser feito um compromisso entre intensidade do feixe na saída do tubo, filtragem e o tempo de contagem para não alterar sensivelmente a parte final do espectro, considerada linear. A determinação da energia máxima é feita extrapolando-se linearmente essa parte final até o nível de background, ajustada pelo método dos mínimos quadrados.

## CAPÍTULO III

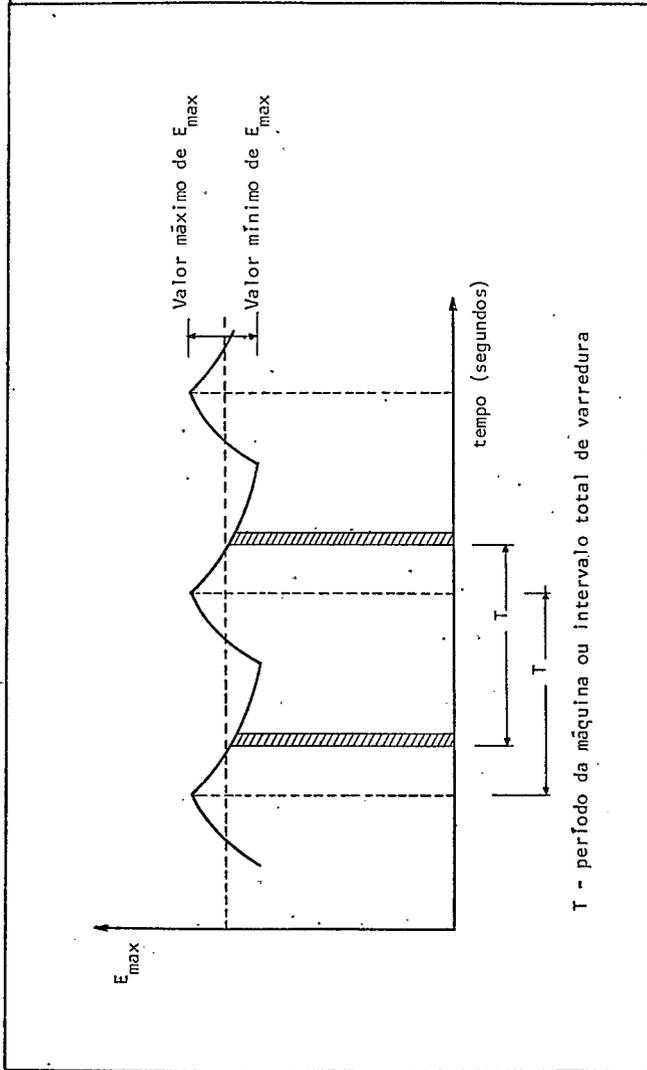
### MÉTODO UTILIZADO

#### 3.1 - SISTEMA EXPERIMENTAL

O método espectrométrico de determinação da energia e de sua flutuação (ripple) consiste fundamentalmente, de medidas de espectros de raios-X utilizando um sistema espectrométrico tradicional, em coincidência com um pulso de controle. Este faz a varredura no período T de oscilação da rede de alimentação da máquina de raios-X.

Para que a sensibilidade deste método seja alta, é necessário o uso de detetor e semi-condutor de alta resolução em energia, e um gerador de pulsos de controle bem estável. O pulso de controle tem período T, largura estreita em relação a ele e faz a varredura do intervalo de tempo T, como mostra a Fig. 3.1.1.

O diagrama de bloco do sistema utilizado para a obtenção dos espectros encontra-se na Fig. 3.1.2. Foram utilizadas 3 máquinas de raios-X da Siemens; um Stabilipan 250 F com retificação em ponte ou de onda completa de média energia (até 250kV), um Stabilipan TR 300 F de média energia e outro de baixa energia, com um tubo HG 150 de janela de berílio, tendo os dois últimos, retificação de onda completa. Três colimadores de chumbo de 0.5 cm de espessura, com diâmetros de 5mm, 5mm e 3mm, à medi



T - período da máquina ou intervalo total de varredura

Fig. 3.1.1 - Forma de onda do ripple e varredura com o pulso do gate.

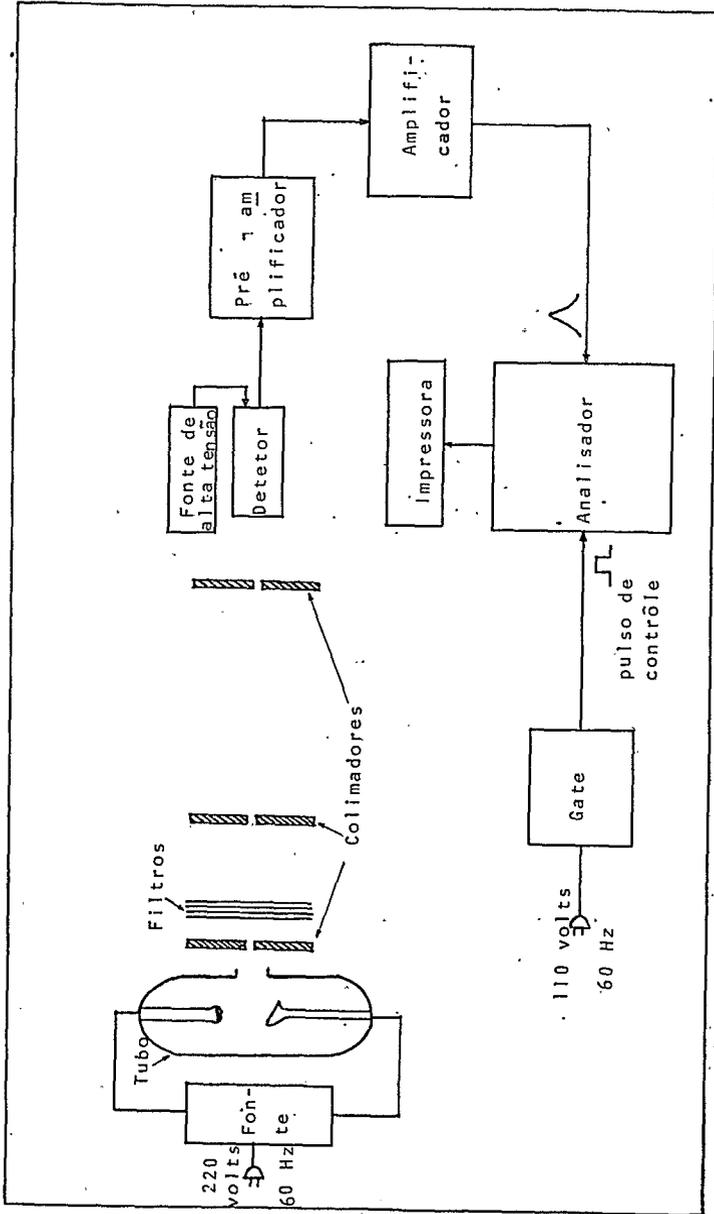


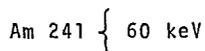
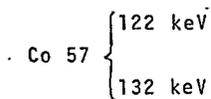
Fig. 3.1.2 - Diagrama de bloco do sistema experimental utilizado.

da que se afasta do tubo, foram usados para colimar e reduzir o feixe de raios-X. Filtros de Al, Cu, Sn e Pb de espessuras, variando de acordo com a quilovoltagem e corrente do tubo, foram colocados para concentrar o espectro na região da energia máxima. As Tabs. A.1, A.2 e A.3 mostram o tipo de filtro e espessura utilizados para cada quilovoltagem e corrente.

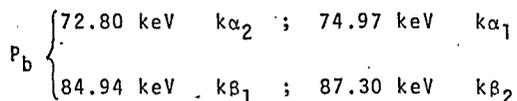
Um detetor da Ortec mod. 1113-10220, com cristal de germânio puro de 10mm de diâmetro por 7mm de profundidade, foi colocado cerca de 300 cm de distância do alvo. Para fazer o casamento de impedância do detetor com o amplificador usou-se um pré-amplificador da Ortec modelo 460. Acoplado a esse, um amplificador da Elscint modelo CAV-N-2. O sinal do amplificador foi introduzido num analisador multicanal "Didac" de 4096 canais da Intertechnique.

A calibração em energia do sistema espectrométrico (detetor, pré-amplificador, amplificador e analisador) foi feita com fontes radioativas gama e raios-X característicos de energias conhecidas.

As fontes padrões utilizadas foram:



Os raios-X característicos utilizados foram os do Pb com as energias:



Para que raios-X característicos do Pb pudessem ser produzidos por fluorescência, colocou-se uma fonte de Co 57 próxima à janela do detetor, interceptada por uma fina folha de Pb encostada ao mesmo. Depois de calibrado, pode-se determinar, através da parte final do espectro de contagem, a energia dos fótons correspondente.

O tempo morto do multicanal foi sempre mantido bem abaixo de 10% e com uma alta estatística de contagem, de modo que os respectivos efeitos do empilhamento (pile-up) e da radiação de fundo (background) fossem desprezíveis na determinação da energia.

O gerador de pulsos de controle (gate), especialmente construído para este trabalho, comanda o intervalo de armazenamento dos pulsos provenientes do detetor no multicanal pelo dispositivo de coincidência, e foi conectado à rede de alimentação com 110 volts e 60 Hz. A Fig. 3.1.3 mostra o seu circuito eletrônico. Ele é constituído, basicamente, de dois multivibradores monoestáveis que fixam, respectivamente, a posição e a largura do pulso, ao longo do período fixado pela rede de alimentação. Ele permite que a largura de pulsos varie de dezenas de microsegundos até 9.5ms e o seu intervalo de varredura atinja até 24ms. Se a largura do pulso de gate for grande, tem-se pouca resolução na determinação do ripple. Se for muito estreita, tem-se uma baixa estatística. Considerando estes limites, um valor adequado da largura de gate foi de 0.5ms, varrendo o período em intervalos sequenciais de 1ms.

Devido ao caráter cíclico de funcionamento do dispositivo 3.1.1 somente os raios-X emitidos em coincidência com o pulso de gate são analisados e definem o valor da Energia do es

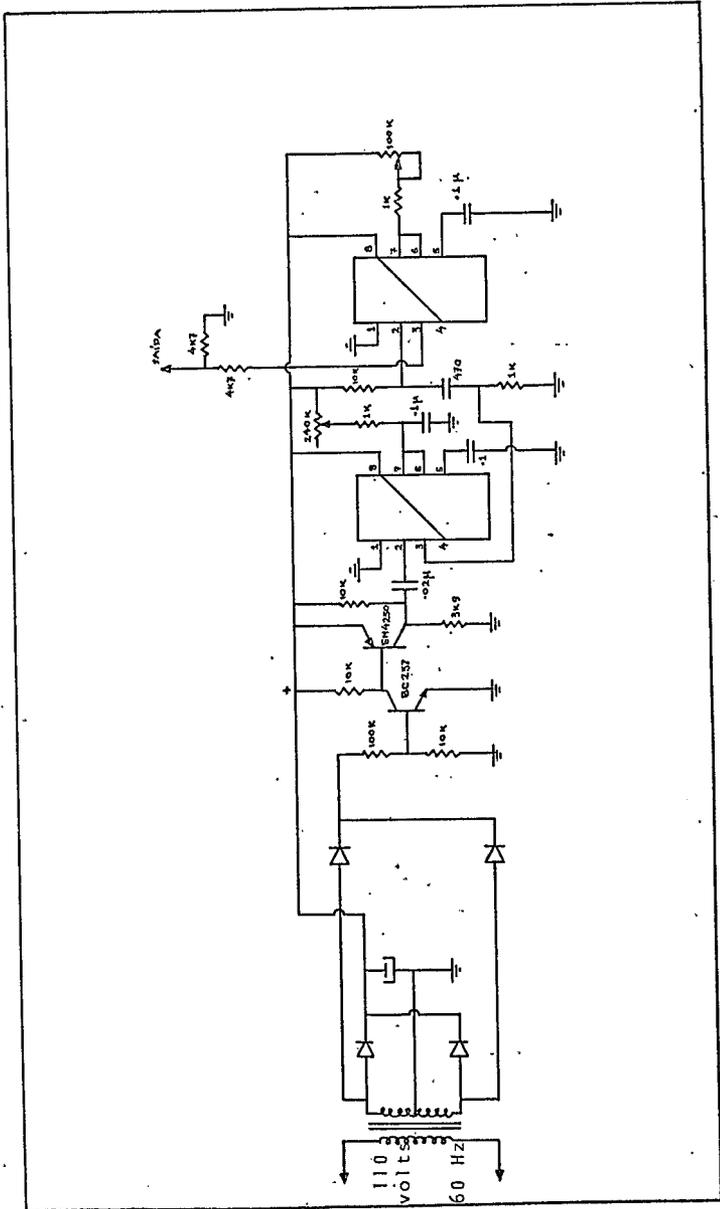


Fig. 3.1.3 - Circuito elétrico do gerador de pulsos (gate).

pectro para aquela posição.

Após o analisador selecionar e armazenar os pulsos que chegam do detetor em coincidência com o sinal do gate, os resultados saem através de uma impressora modelo 212 da IER, onde a fita contém o canal com a sua respectiva contagem. O gráfico da contagem em função do canal (Energia) fornece um espectro analisado semelhante ao apresentado na Fig. 2.5.3.

A parte final do espectro possui uma região que pode ser considerada linear. A determinação da Energia foi feita extrapolando-se essa região até o nível de background, mediante um ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados.

Deslocando-se o pulso para outro intervalo de tempo, o valor da Energia será distinto do anterior, devido ao ripple. Fazendo-se a varredura em intervalos sequenciais de 1ms, determinou-se o ripple através dos valores máximo e mínimo da Energia Máxima (ver Fig. 3.1.1) pela expressão (2.4.3).

O valor assim determinado de  $r$  é para uma dada condição de operação da máquina, em termos de quilovoltagem e corrente.

A Fig. 4.1.7 mostra o ripple observado das 3 máquinas operadas para 120 kV e corrente de 2mA, 6mA e 20mA.

### 3.2 - INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA MÁXIMA

Para definir a precisão e a sensibilidade do método espectrométrico com o "gate", foram feitas determinações dos desvios padrões da média nas condições de máxima e mínima quilovoltagem e corrente. Essas são as mais significativas para a deter

minuição do erro padrão. Em cada caso foram realizadas 10 medi-  
das com largura de pulso de gate de 500  $\mu$ s.

Utilizando para o cálculo do erro padrão

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{\min} - \bar{E}_{\max})^2}{N(N-1)}}$$

onde:

$$\bar{E}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{\min}}{N} \quad \bar{E} \text{ é o valor médio da Energia para cada}$$

condição de corrente e quilovoltagem.

### 3.3 -- INCERTEZA NA DETERMINAÇÃO DO RIPPLE

Tendo a definição do ripple,

$$r = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}} \times 100 (\%)$$

onde:

$$E_{\max} = E_{\min} \pm \sigma_M$$

Considerando que o erro máximo da determinação de ener-  
gia (Tab. 4.1.1) foi de  $T_M = 0.7\%$  o erro propagado na determi-  
nação do ripple foi obtido através de:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{(r)^2}{E_{\max}}} T_M = \frac{r}{E_{\max}} T_M \quad (3.3.1)$$

onde:

$$T_M = 0.7\%.$$

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 - RESULTADOS

Foram efetuadas medidas de ripple de voltagem de 3 geradores de raios-X, da Siemens, sendo dois de média e um de baixa energia, todos com retificação de onda completa. Os de média energia utilizados foram o Stabilipan 250 F e o Stabilipan 300 F. O de baixa energia utilizado possui um tubo HG 150, de janela de berílio.

A geometria e a aparelhagem utilizadas no Laboratório de Munique foram similares às utilizadas no IRD.

As medidas realizadas foram de dois tipos:

- a) - ripple de tensão em função da quilovoltagem para uma dada corrente;
- b) - ripple de tensão em função da corrente para uma dada quilovoltagem.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.1.2, 4.1.3 e 4.1.4, e nas Figuras 4.1.1 a 4.1.6.

O desvio padrão da média para 60 e 100 kV varia entre 0.2% e 0.3%, independente da corrente. Para baixas quilovoltagens e corrente o erro aumenta. Por exemplo, para 20 kV e 2 mA ele é de 0.7%. Isso demonstrou a sensibilidade do método e justificou afirmar ser menor do que 1% (conforme Tab. 4.1.1).

TABELA 4.1.1

tensão (kV) E (mA)	20	60	100
2	0,7%	—	0,3%
6	0,5%	0,2%	0,2%
10	0,2%	—	0,3%

TABELA 4.1.2

300 F (GSF)

corrente (mA) Energia (kV)	4	8	12	16	20
80	3.3±0.03	5.0±0.04	6.6±0.1	8.3±0.1	10.0±0.1
120	1.6±0.01	2.7±0.02	3.3±0.02	5.5±0.03	5.9±0.03
200	—	2.3±0.01	2.6±0.01	3.3±0.01	—

TABELA 4.1.3

250 F (IRD)

corrente (mA) Energia (kV)	6	8	10	14	16	18
60	3.2±0.04	3.7±0.04	6.2±0.1	6.9±0.1	7.7±0.1	9.1±0.1
80	2.0±0.02	2.9±0.03	4.4±0.03	3.5±0.03	4.9±0.04	5.3±0.1
120	1.7±0.01	2.0±0.01	2.3±0.01	3.1±0.02	3.7±0.02	4.0±0.02

TABELA 4.1.4

Baixa Energia - HG 150

corrente (mA) quilo- voltagem (kV)	2	5	8	10	14	20
20	5.7±0.2	7.4±0.3	8.5±0.3	10.2±0.3	12.2±0.4	15.9±0.5
40	2.5±0.1	4.2±0.1	5.5±0.1	6.9±0.1	9.2±0.2	10.0±0.2
60	2.1±0.02	2.5±0.03	3.8±0.04	5.4±0.1	7.0±0.1	8.1±0.1
80	1.2±0.01	2.2±0.02	3.1±0.02	4.1±0.04	5.0±0.04	5.6±0.1
100	1.0±0.01	2.0±0.01	2.7±0.02	3.4±0.02	3.7±0.03	4.9±0.03
120	0.6±0.01	1.5±0.01	2.1±0.01	2.5±0.01	3.3±0.02	4.6±0.03
135	—	0.8±0.01	1.9±0.01	2.2±0.01	2.8±0.01	—

## 4.2 - DISCUSSÃO

Na Fig. 2.3.1.1, vê-se um capacitor em paralelo ao tubo de raios-X. Nesse tipo de circuito filtro, a flutuação da energia máxima ao longo do tempo assemelha-se a uma senoide, diferindo pela parte decrescente do semi-ciclo positivo. No ciclo inverso, o capacitor supre com carga o tubo de raios-X para compensar a ausência de tensão a ele aplicada e descarrega, posteriormente, segundo a lei exponencial  $e^{-t/RC}$ . A Fig. 3.1.1 mostra a forma teórica da flutuação da energia no tubo Stabilipan 250 F da Siemens. Comparando-se as curvas obtidas com as teóricas, observa-se que elas são similares. Para 2 mA o ripple fica indeterminado, pois o seu valor é da ordem de grandeza do erro do método.

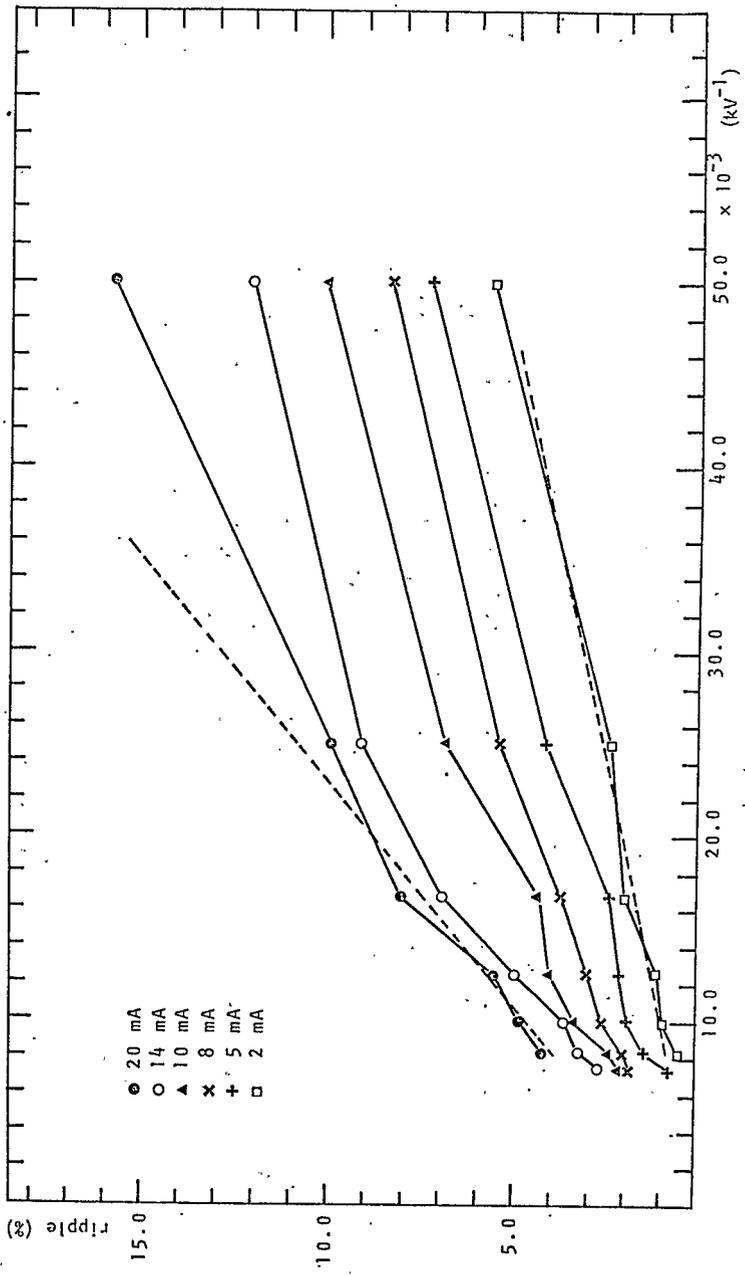


Fig. 4.1.1 - Curva do ripple em função do inverso da quilovoltagem aplicada ao tubo HG 150 tendo a corrente como parametro.

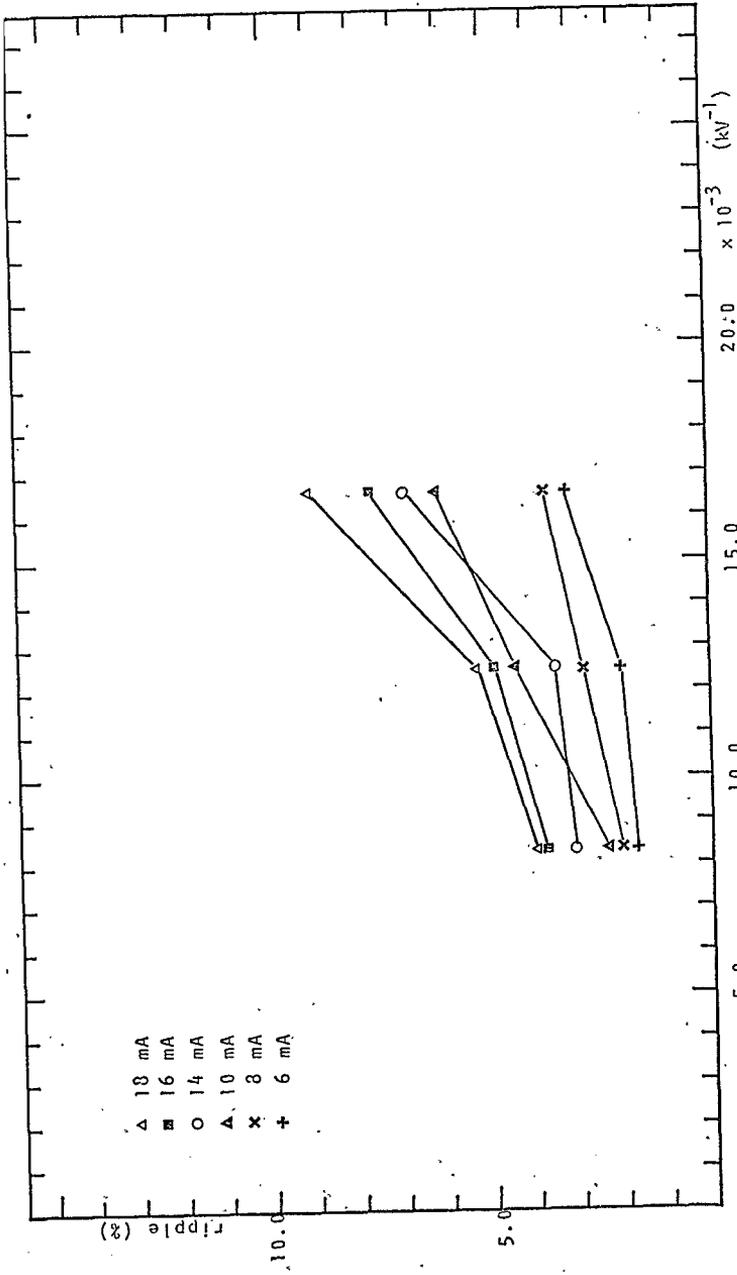


Fig. 4.1.2 - Curva do ripple em função do inverso da quiloVoltagem aplicada ao tubo 250 F, tendo a corrente como parâmetro.

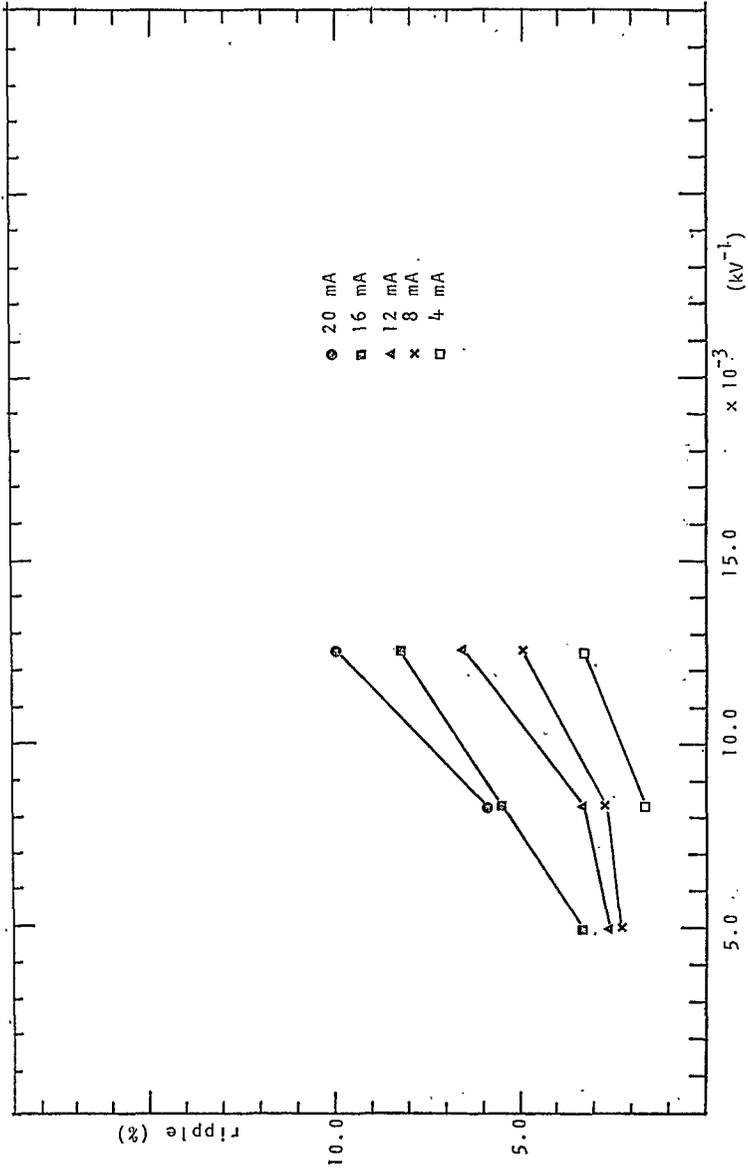


Fig. 4.1.3 - Curva do ripple em função do inverso da quiloVoltagem aplicada: ao tubo 300 F, tendo a corrente como parâmetro.

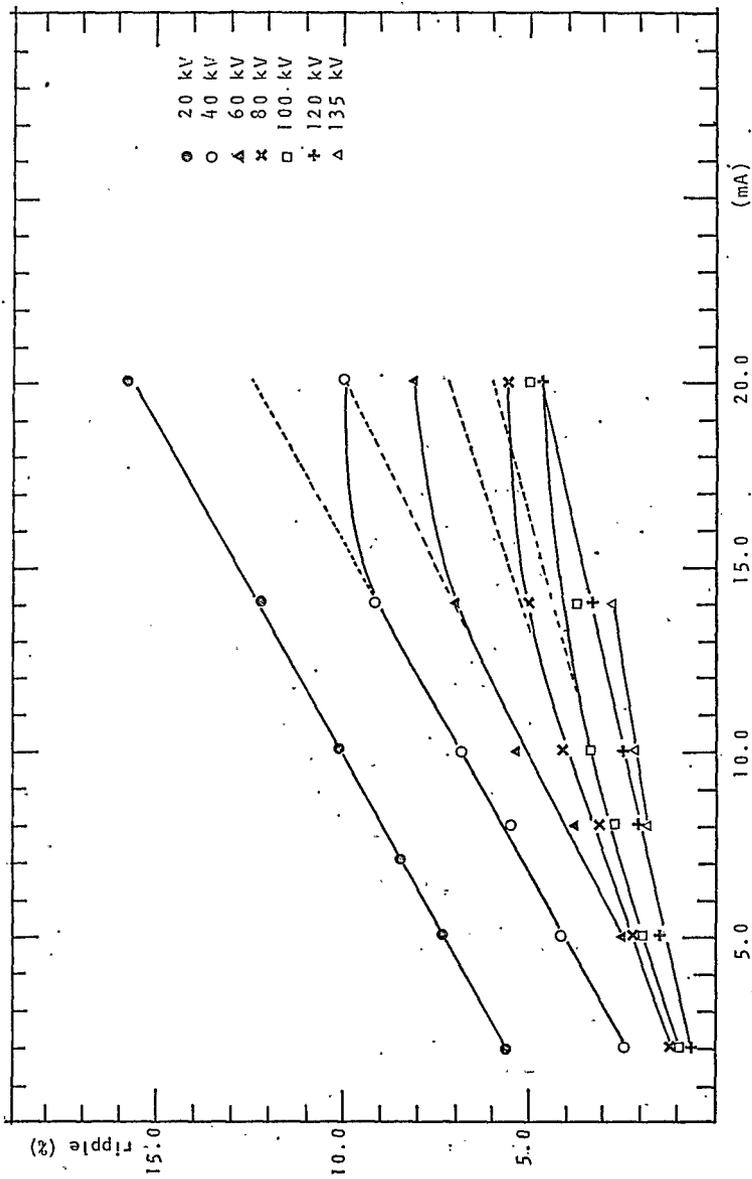


Fig. 4.1.4 - Curva do ripple em função da corrente do tubo HG 150 tendo a quilovoltagem aplicada ao tubo como parâmetro.

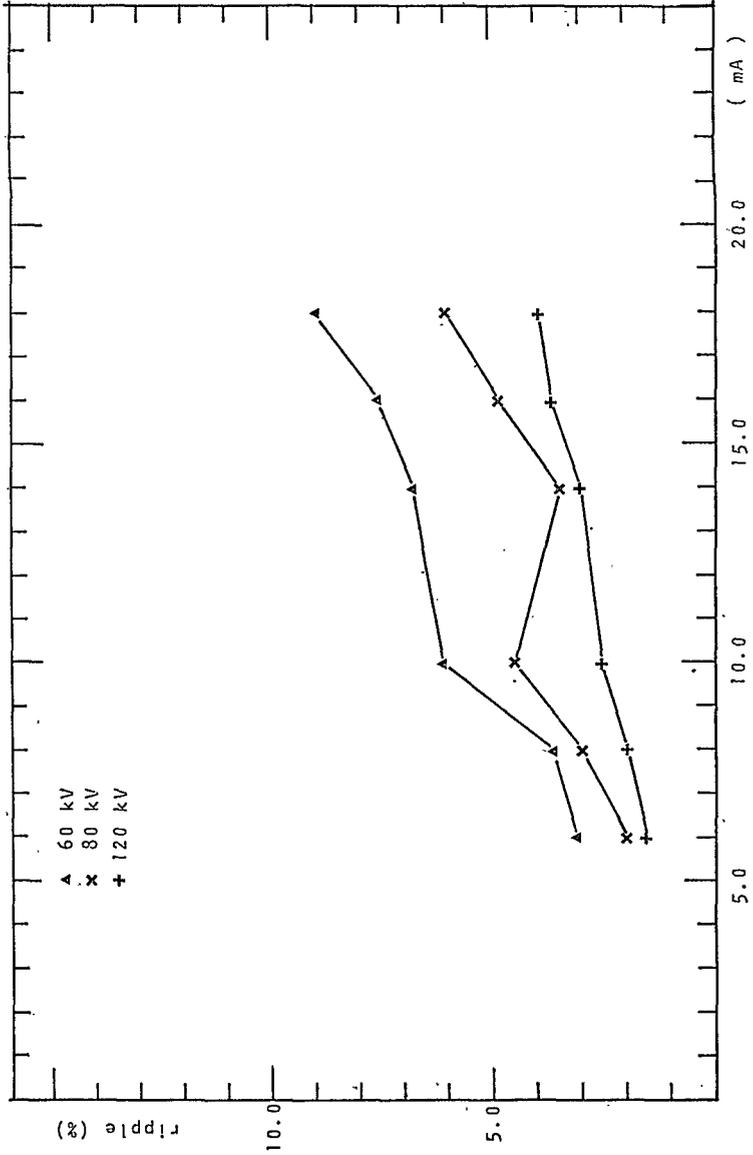


Fig: 4.1.5 - Curva do ripple em função da corrente do tubo 250 F tendo a quílovoltagem como parâmetro.

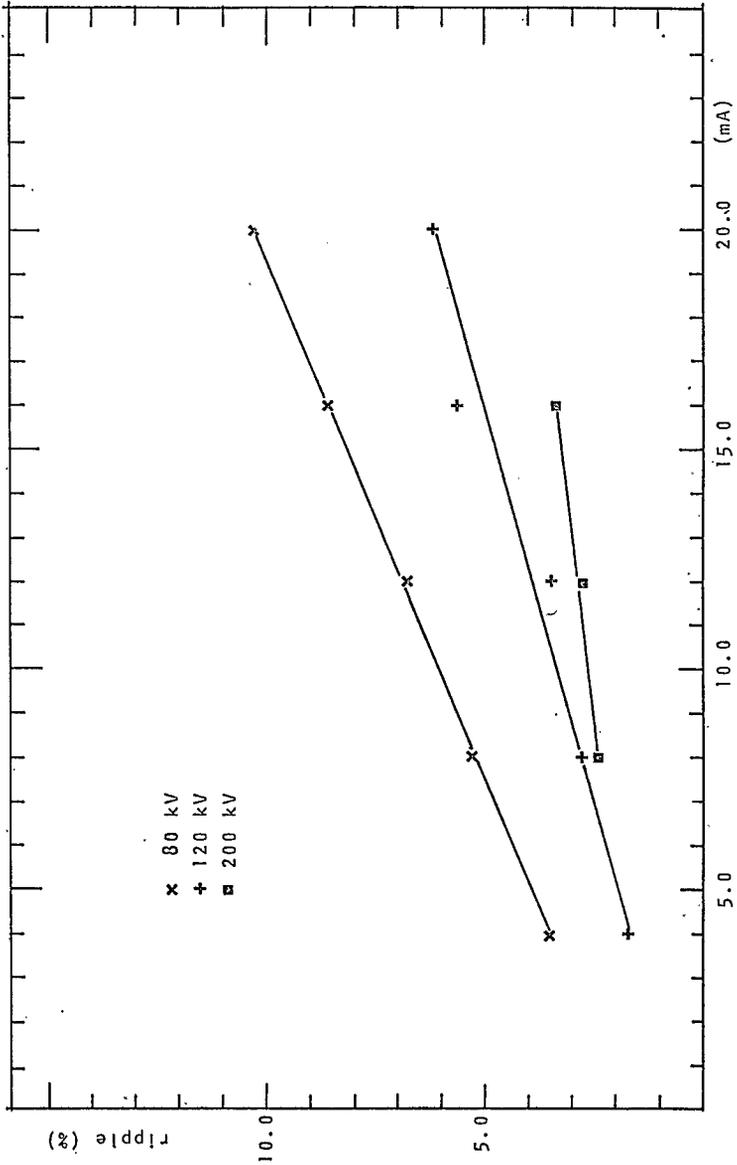


Fig. 4.1.6 - Curva do ripple em função da corrente do tubo do Stabilipan 300 F tendo a quilovoltagem aplicada ao tubo como parâmetro.

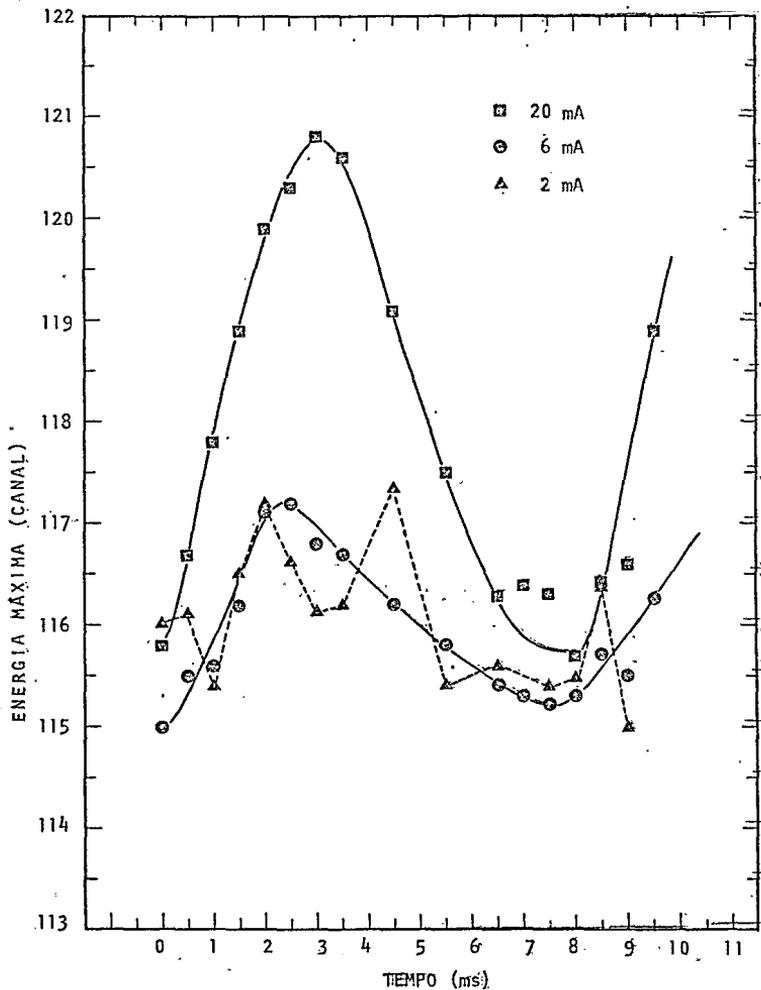


Fig. 4.1.7 - Flutuação da energia máxima em função do tempo de retardo para 120 kV e correntes de 2,6 e 20 mA.

As Figuras 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 mostram o ripple em função do inverso da quilovoltagem aplicada ao tubo, tendo como parâmetro a corrente das máquinas de raios-X. A expressão (2.4.7) mostra uma linearidade do ripple em função do inverso da quilovoltagem. Observa-se um aumento considerável do ripple à medida que a quilovoltagem aplicada ao tubo decresce. Na Fig. 4.1.1, pode-se observar que o ripple atinge valores de até 16%, para altas correntes e baixas quilovoltagens. Devido à modificação da resistência interna do tubo de raios-X nas altas correntes, observa-se uma perda dessa linearidade. Na Fig. 4.1.2 observa-se uma anormalidade na corrente de 14 mA para 60 e 120 kV. Acredita-se que isso se deve à variação na rede de alimentação, devido à insuficiência do regulador eletro-mecânico. Este regulador comporta bruscas variações da ordem de ms, e as corrige num tempo de até segundos, isto é, a correção é lenta em relação à variação. Na Fig. 4.1.3, não se observa anormalidades, devido a rede de alimentação ser bem estável. Essa correção é feita eletromagneticamente e, portanto, ultra rápida.

Na Fig. 4.1.5, na energia do 80 kV, os pontos de 10 mA e 14 mA estão fora da curva. Acredita-se que seja devido ao mau funcionamento do aparelho nessa faixa de energia ou esta bilização da rede.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÃO

Os resultados nas Tabelas 4.1.2 a 4.1.4 indicam que, para uma mesma corrente, o ripple decresce rapidamente com o aumento da quilovoltagem. Por exemplo, para 20 mA, o ripple é 16.1% e 4.7% respectivamente para 20 kV e 120 kV, como mostra a Fig. 4.1.1.

Para a mesma quilovoltagem aplicada ao tubo, o ripple aumenta quase linearmente com a corrente, por exemplo, para 20 kV, o ripple é 6.3% e 16.1% respectivamente para 2 mA e 20 mA.

O fato da flutuação da energia ser uma função crescente da corrente, altera a qualidade do feixe primário, por acarretar uma flutuação na sua penetrabilidade. Essa flutuação está associada à variação do coeficiente de atenuação de massa do material com a flutuação da energia máxima e à necessidade de diferentes espessuras para igual atenuação com a variação da Energia. Para a região de energia onde esta dependência é muito grande, a variação do coeficiente de atenuação de massa é notável, provocando fortes mudanças nas propriedades de irradiação, devido à forma exponencial de atenuação da radiação pelo material. Em radioterapia usa-se tabelas tendo a quilovoltagem e a camada semi-redutora como parâmetros, como por exemplo, a tabela de dose-profundidade. Se a energia média muda com o ripple, conse -

quentemente o HVL também mudará, induzindo um erro na dose-profundidade. Avaliando-se a penetrabilidade em termos de HVL devido às variações de  $E_{max}$  utilizando a técnica de propagação de erros experimentais. Em radioterapia, desvios de até 5% nas doses ministradas podem conduzir a mudanças clínicas observáveis nos efeitos da radiação (23).

Medidas realizadas sobre a variação do HVL para diferentes correntes do tubo de raios-X para energias de 40 keV, acarretariam uma variação de até 5% no HVL.

No caso particular dos Laboratórios de Padronização Secundária (SSDLs), é importante também saber o valor do ripple e sua influência para uma dada quilovoltagem e filtração na resposta dos dosímetros, principalmente, nos que são muito dependentes da energia.

Observa-se pelos resultados obtidos e mostrados nas Figuras 4.1.1 a 4.1.6 e Tabelas 4.1.2 a 4.1.4, que o método funcionou com sucesso e pode ser utilizado para qualquer tipo de máquina de raios-X. Pelos resultados, a sensibilidade do método para a determinação do ripple foi menor do que 1%, indicando uma situação bastante favorável para a avaliação da qualidade de feixe de raios-X.

## APÊNDICE . A

### PROPAGAÇÃO DE ERROS

O erro  $\sigma_E$  atribuído à determinação da energia máxima de um tubo de raios-X se propaga para a determinação da camada semi-redutora, através da variação do coeficiente de absorção  $\mu$ . Isto porque, à cada energia existe um valor de coeficiente  $\mu$ . Supondo que  $E_{max}$  flutue dentro de um intervalo  $E_2 - E_1$  onde  $E_1 = E - \sigma_E$  e  $E_2 = E + \sigma_E$  de energia, a flutuação correspondente do coeficiente será  $\mu_2 - \mu_1$ . Esta flutuação, expressa em termos de desvio padrão, pode ser obtida de  $\sigma_E$ , usando uma interpolação na curva de  $\mu(E)$ , ou seja:

$$\sigma\mu = k \cdot \sigma_E$$

onde

$$k = \left| \frac{\ln \mu_2 - \ln \mu_1}{\ln E_2 - \ln E_1} \right|$$

como o HVL é obtido de:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu}$$

o erro propagado pode ser estimado através de:

$$\sigma_{HVL} = \sqrt{\left( \frac{\partial HVL}{\partial \mu} \right)^2 \cdot \sigma_{\mu}^2} = \sqrt{\left( \frac{(0.693)^2}{\mu^2} \right) \cdot \sigma_{\mu}^2} = \frac{0.693}{\mu^2} \sigma_{\mu} = \frac{0.693}{\mu^2} \cdot k \cdot \sigma_E$$

$$\sigma_{HVL} = \frac{0.693}{\mu^2} k \cdot \sigma_E$$

onde o coeficiente  $\mu$  e  $k$  são obtidos do gráfico  $\mu \times E$  no ponto  $E_2$  para maior segurança, e no intervalo  $E_2-E_1$  respectivamente. Como o ripple é definido por  $r = E_2-E_1/E_2$  o erro no HVL expressos em flutuação de  $r$  será:

$$\sigma_{HVL} = \frac{0.693}{\mu^2} k \cdot E_2 \sigma_r$$

TABELA A.1

300 F

Quilovoltagem (kV)	Corrente (mA)	Filtragem Total (mm)
80	4	0.1 Sn + 0.5 Cu + 2.5 Al
	8	0.2 Sn + 0.5 Cu + 2.5 Al
	12	0.2 Sn + 0.7 Cu + 2.5 Al
	16	0.3 Sn + 1.0 Cu + 2.5 Al
	20	0.3 Sn + 1.0 Cu + 2.5 Al
120	4	0.1 Pb + 0.3 Sn + 2.0 Cu + 4.0 Al
	8	0.1 Pb + 0.3 Sn + 3.0 Cu + 4.0 Al
	12	0.1 Pb + 0.3 Sn + 3.0 Cu + 4.0 Al
	16	0.1 Pb + 0.5 Sn + 3.0 Cu + 4.0 Al
	20	0.1 Pb + 0.5 Sn + 4.0 Cu + 4.0 Al
200	8	0.5 Pb + 0.5 Sn + 2.0 Cu + 3.0 Al
	12	0.5 Pb + 0.8 Sn + 2.0 Cu + 3.0 Al
	16	0.5 Pb + 0.8 Sn + 4.0 Cu + 3.0 Al

TABELA A.2

250 F

Quilovoltagem (kV)	Corrente (mA)	Filtragem Total (mm)
60	6	0.7 Cu + 4.7 Al
	8	0.7 Cu + 4.7 Al
	10	0.7 Cu + 4.7 Al
	14	0.7 Cu + 4.7 Al
	16	0.9 Cu + 4.7 Al
	18	0.9 Cu + 4.7 Al
80	6	2.5 Cu + 4.7 Al
	8	2.5 Cu + 4.7 Al
	10	2.5 Cu + 4.7 Al
	14	3.0 Cu + 4.7 Al
	16	3.0 Cu + 4.7 Al
	18	3.0 Cu + 4.7 Al
120	6	0.5 Sn + 2.0 Cu + 4.7 Al
	8	0.5 Sn + 2.5 Cu + 4.7 Al
	10	0.8 Sn + 5.0 Cu + 4.7 Al
	14	1.0 Sn + 4.0 Cu + 4.7 Al
	16	1.0 Sn + 4.5 Cu + 4.7 Al
	18	1.0 Sn + 5.0 Cu + 4.7 Al

TABELA A.3

HG 150

Quilovoltagem (kV)	Corrente (mA)	Filtragem Total (mm)
20	2	0.05 Cu + 0.5 Al
	5	0.1 Cu + 1.0 Al
	8	0.1 Cu + 1.0 Al
	10	0.1 Cu + 1.5 Al
	14	0.1 Cu + 2.0 Al
	20	0.1 Cu + 2.0 Al
40	2	0.65 Cu + 3.0 Al
	5	1.0 Cu + 2.0 Al
	8	1.1 Cu + 2.5 Al
	10	1.1 Cu + 2.5 Al
	14	1.1 Cu + 2.5 Al
	20	1.1 Cu + 3.5 Al
60	2	2.3 Cu + 4.0 Al
	5	3.3 Cu + 5.0 Al
	8	0.3 Sn + 2.5 Cu + 3.5 Al
	10	0.3 Sn + 2.5 Cu + 3.5 Al
	14	0.3 Sn + 2.5 Cu + 3.5 Al
	20	0.3 Sn + 2.7 Cu + 4.0 Al
80	2	0.2 Pb + 1.0 Sn + 2.5 Cu + 3.0 Al
	5	0.2 Pb + 1.0 Sn + 3.0 Cu + 3.0 Al
	8	0.2 Pb + 1.2 Sn + 3.1 Cu + 3.0 Al
	10	0.2 Pb + 1.2 Sn + 3.2 Cu + 3.0 Al
	14	0.2 Pb + 1.2 Sn + 3.7 Cu + 3.0 Al
	20	0.2 Pb + 1.2 Sn + 4.0 Cu + 3.0 Al

(continua Tab. A.3)

TABELA A.3 (continuação)

Quilovoltagem (kV)	Corrente	Filtragem Total (mm)
100	2	0.1 Pb + 3.0 Sn + 2.0 Cu + 2.0 Al
	5	0.2 Pb + 3.0 Sn + 3.6 Cu + 2.0 Al
	8	0.2 Pb + 3.0 Sn + 4.0 Cu + 2.0 Al
	10	0.2 Pb + 3.0 Sn + 4.5 Cu + 2.0 Al
	14	0.2 Pb + 3.0 Sn + 5.0 Cu + 2.0 Al
	20	0.2 Pb + 3.0 Sn + 5.0 Cu + 2.0 Al
120	2	0.6 Pb + 4.0 Sn + 1.5 Cu + 3.0 Al
	5	0.6 Pb + 4.0 Sn + 3.5 Cu + 3.0 Al
	8	0.6 Pb + 4.0 Sn + 4.5 Cu + 3.0 Al
	10	0.6 Pb + 4.0 Sn + 5.0 Cu + 3.0 Al
	14	0.6 Pb + 4.0 Sn + 6.0 Cu + 3.0 Al
	20	0.7 Pb + 4.0 Sn + 4.0 Cu + 3.0 Al
135	5	0.6 Pb + 4.0 Sn + 4.0 Cu + 4.0 Al
	8	0.6 Pb + 4.0 Sn + 6.0 Cu + 4.0 Al
	10	0.6 Pb + 5.0 Sn + 4.0 Cu + 4.0 Al
	14	0.6 Pb + 5.0 Sn + 6.0 Cu + 4.0 Al

BIBLIOGRAFIA

- 1) - Rontgen, W.C. - Translated by Arthur Stanton - Nature, London, 53 (1896), 274.
- 2) - Barkla, Charles G. - Polarisation in Secondary Rontgen Radiation - Royal Society Proceedings - vol. 77 - Serie A.
- 3) - M. von Laue e colaboradores - Kittel, Charles - Introduction to Solid States Physics - 5<sup>a</sup> edição - John Wiley and Sons, INC - Cap. II (1912).
- 4) - Debye e Scherrer - Smith, C.M.H. - A Textbook of Nuclear Physics - MacMillan Company - 1<sup>a</sup> edição - Cap. IV (1912).
- 5) - Bragg, W.H. e Bragg W.L. - The Reflection of X-Rays by Crystals - Proceedings Royal Society (London) A88 (1913), 428.
- 6) - Bragg, W.L. - The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal - Proceedings Cambridge Philosophical Society - 17 (1912); 43.
- 7) - Moselley, M.G.J. - The High-Frequency Spectra of the Elements - Philosophical Magazine, 26 (1913) 1024.
- 8) - Kaplan, Irving - Nuclear Physics - Cap. XV.
- 9) - Semat, H. - Introduction to Atomic and Nuclear Physics - Cap. VI.
- 10) - Whyte, G.N. - Principles of Radiation Dosimetry, Cap. II.
- 11) - Greening, J.R., British Journal Applied Phys. (1955).

- (12) - Greening, J.R. - Testing X-Ray Equipment by Examining  
Emitted X-Rays. - Radiography; 25 (1959), 199.
- (13) - Trew, D.J. - Evaluating the Output of X-Ray Tubes-Radio-  
graphy, 38 (1972), 26.
- (14) - G. Drexler and F. Perzl - Spectrometry of Low Energy Gam-  
ma and X-Rays with Ge(Li) Detectors - Nuclear Instru-  
ments and Methods 48 (1967) 332.
- (15) - Birch, R.; Marshall, M.; Peaple, L.H.J. - A Technique  
for Measuring the Variation of Photon Spectrum from X-  
Ray Generators Over the Mains Voltage Cycle - Phys. Med.  
and Biol. - Vol. 21, n<sup>o</sup> 5 (1976), 745.
- (16) - X and Gamma Reference Radiations for Calibrating and De-  
termining and Energy Response of Exposure Meters - Orga-  
nisation International de Normalisation (ISO) - Septem-  
bre (1973) pg. 4.
- (17) - George L. Clark - Applied X-Rays - Cap. III.
- (18) - Harold Elford Johns - The Physics of Radiology - Cap.II.
- (19) - Richardson, O.W.; Wheatstone, F.R.S. - The Complete Pho-  
toelectric Emission - Philosophical Magazine 31 (1916) ,  
149.
- (20) - Donald G. Fink - Electronics Engineer's Handbook - 1 -32.
- (21) - Meredith, N.J. and Massey, J.B. - Fundamental Physics of  
Radiology. Cap. V.
- (22) - Electronic for Scientists - Nalmstadt, Enke and Toren -  
2 - 6.
- (23) - Lecture for WHO - IAEA Training Course Held at GSF  
Neuherberg april (1978).