

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA
E MICROELETRÔNICA

CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO
DE UM CANHÃO DE ELÉTRONS
DE ALTA CORRENTE

Este exemplar corresponde a redação final da tese	
defendida por <u>ADEMAR MURARO</u>	
<u>JR.</u>	
e aprovada pela Comissão	
Julgada em <u>29 / 04 / 98</u>	<u>Alb. Martins Jorge</u>
	Orientador

ADEMAR MURARO JÚNIOR

ORIENTADOR:
PROF. DR. ALBERTO MARTINS JORGE

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica e de Computação da Universidade Estadual
de Campinas, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas
1998

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	TUNICAMP
	M931c
V.	E1
TOMBO BC	34462
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	18/03/98
N.º CPD	

CM-00113113-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M931c Muraro Junior, Ademar
Construção e caracterização de um canhão de elétrons de alta corrente. / Ademar Muraro Junior.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Alberto Martins Jorge
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Canhão eletrônico. 2. Feixes de elétrons. 3. Aceleradores lineares. I. Muraro Junior, Ademar. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alberto Martins Jorge, pela orientação deste trabalho junto à FEEC-UNICAMP, pelos aconselhamentos e paciência devido à extensão do trabalho.

Ao Dr. Carlos R. S. Stopa, como meu co-orientador no IEAv, pelo apoio científico a este trabalho.

À Química Benedita M. V. Romão, por sua inestimável colaboração no preparo das tintas emissoras e na caracterização do canhão de elétrons.

Ao Eng. Jonas Rubini Júnior, pelo desenvolvimento do circuito pulsador e outros dispositivos eletrônicos.

Ao Prof. Dr. Jiro Takahashi do IFUSP, pelo auxílio e colaboração prestados no projeto e montagem do canhão.

À minha esposa Raquel, pelo apoio e incentivo para a conclusão deste trabalho, acrescentando assim, mais experiência em minha carreira profissional.

Aos meus pais, que apoiaram a minha carreira profissional e pelo árduo empenho em fornecer os subsídios necessários à minha formação acadêmica.

Aos pesquisadores e amigos da Divisão de Física Aplicada do IEAv, que embora não mencionados, ajudaram-me com incentivos e conselhos para a realização deste trabalho.

Aos engenheiros e projetistas da Divisão de Suporte Tecnológico do IEAv, pelo desenvolvimento dos projetos mecânicos dos componentes do canhão e sistema de vácuo. Aos técnicos dessa Divisão, pela boa vontade na realização dos trabalhos mecânicos.

Ao programa RHAE-Energia do MCT/CNPq, pelo apoio financeiro.

À Direção do IEAv, que apoiou este trabalho.

RESUMO

Este trabalho descreve a construção de um novo canhão de elétrons para o acelerador linear do Instituto de Estudos Avançados (IEAv) e sua caracterização com a finalidade de comparação com as especificações de projeto. O trabalho apresenta as etapas de projeto (por meio de simulação computacional), desenvolvimento e detalhes construtivos do conjunto catodo-grade do canhão.

Também são apresentados outros desenvolvimentos que foram efetuados com o objetivo de melhorar o desempenho do canhão como um todo. Estes desenvolvimentos foram o estudo de formulações e métodos de pintura das tintas emissoras de elétrons usadas em catodos tipo óxido, a implementação de um novo sistema de vácuo melhorando o bombeamento da câmara do canhão e a implementação do circuito pulsador do canhão, utilizando-se transistores bipolares em configuração de empilhamento e operando na região de avalanche.

O canhão construído é do tipo Pierce, com catodo plano e recoberto por óxidos alcalino-terrosos. O canhão opera em regime pulsado com frequências variando entre 1 Hz e 400 Hz. A corrente máxima de pico extraída é 3,5 A para um potencial de aceleração de 90 kV e largura de pulso de 200 ns.

ABSTRACT

In order to meet the intense pulsed beam requirements of the electron linear accelerator at the Instituto de Estudos Avançados, a high current oxide planar cathode Pierce-type geometry electron gun has been developed. This work presents the steps of the gun design and construction including computational simulations of the gun electrode geometry and mechanical details of the cathode-grid assembly. The gun operates from single pulse up to 400 pps. The maximum peak current is 3.5 A at 90 kV of gun accelerating potencial and 200-ns wide pulse.

The properties of the rare earth-oxide emission pastes and the coating techniques were also studied to achieve a better performance of the electron gun. Several improvements of the vaccum system were implemented and a new pulser circuit with bipolar junction transistors, operating in the breakdown configuration, has been designed and tested.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS USADOS NESTE TRABALHO

ARR	Amplificador de resposta rápida. É o circuito pulsador do canhão
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Densidade de fluxo magnético [T]
BJT	"Bipolar junction transistor" - transistor de junção bipolar
<i>c</i>	Velocidade da luz no vácuo
<i>d_{cg}</i>	Distância entre o catodo e a grade de um triodo
<i>d_{ga}</i>	Distância entre a grade e o anodo de um triodo
E	Intensidade de campo elétrico [V/m]
F	Força atuante sobre uma partícula [N]
<i>I</i>	Corrente elétrica de um feixe de elétrons [A]
<i>I_{cg}</i>	Corrente contínua direta extraída do catodo, quando o conjunto catodo-grade é transformado em um diodo diretamente polarizado, para testes de emissividade da tinta [mA]
<i>I_{fo}</i>	Corrente de operação do filamento do catodo, para o canhão trabalhar em regime saturado [mA]
<i>I_g</i>	Corrente de grade [A]
J, J	Densidade de corrente [A/cm ²]
<i>K</i>	Perveança [perv] ou [I/V ^{3/2}]. Neste trabalho foi adotado a unidade [perv]
<i>m</i>	Massa de uma partícula
mbar	Unidade de pressão. 1 mbar = 0,75 mmHg $\cong$ 1 x 10 ⁻³ atm
P	Momento de uma partícula
PFN	Rede formadora de pulsos
<i>q</i>	Carga de uma partícula [C]
<i>S</i>	Transcondutância de um canhão [Ω^{-1}]
<i>T_g</i>	Transparência da grade [%]

v, v	Velocidade de uma partícula
V_{co}	Tensão aplicada à grade para o corte total da corrente de feixe [V]
V_{eg}	Potencial do diodo equivalente para o triodo [V]
V_g	Tensão efetiva observada na grade [V]
V_0	Tensão de anodo ou potencial de aceleração [kV]
β	Velocidade relativa de uma partícula em relação à velocidade da luz
γ	Fator de Lorentz
γm	Massa relativística
ε_n	Emitância normalizada [π mm mrad]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	Emitância de um feixe de elétrons na direção x ou y respectivamente [π mm mrad]
ε_0	Permissividade dielétrica do vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)
μ	Fator de amplificação do triodo
ρ	Densidade de carga volumétrica
ϕ_s	Fase síncrona de uma onda eletromagnética

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Histórico sobre aceleradores de elétrons e aplicações	3
2.2. Princípio de funcionamento de um acelerador linear de elétrons	5
2.3. Esquema e componentes de um acelerador linear de elétrons	6
2.4. Noções sobre teoria de canhões de elétrons	9
2.5. O código computacional EGUN	19
2.6. Simulação computacional do canhão de elétrons	21
CAPÍTULO 3 - CONSTRUÇÃO DO CANHÃO DE ELÉTRONS	24
3.1. Formulações e métodos de pintura das tintas utilizadas em catodos óxidos	24
3.2. Sistema de vácuo do canhão	27
3.3. Construção do flange do catodo	29
3.4. Eletrônica associada ao canhão	34
CAPÍTULO 4 - MEDIDAS DE CARACTERIZAÇÃO	41
4.1. Aparato experimental	41
4.2. Delineamento das medidas de caracterização	45
4.3. Resultados experimentais	47
4.4. Análise dos resultados	61
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	64
APÊNDICE - DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VÁCUO DO CANHÃO DE ELÉTRONS	67
1. Projeto preliminar	67
2. Cálculos	68
3. Bombas	71
REFERÊNCIAS	72

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto, desenvolvimento, construção e caracterização de um novo canhão de elétrons a ser utilizado no acelerador linear de elétrons, que está em construção no Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

O projeto completo do acelerador linear de elétrons, prevê a construção de um conjunto de oito estruturas aceleradoras que permitirão a extração de um feixe de elétrons com energia da ordem de 130 MeV. A primeira fase, em etapa de finalização, consiste de um canhão de elétrons, um pré-agrupador, uma estrutura agrupadora e uma estrutura aceleradora, gerando um feixe de elétrons da ordem de 30 MeV. A etapa seguinte dependerá do suporte financeiro.

A utilização do acelerador estará voltada para as aplicações tecnológicas da radiação e alguns experimentos de física nuclear. Para atender a estas pesquisas, o canhão de elétrons tem como meta de projeto a geração de um feixe pulsado, com frequência máxima de operação de 400 Hz, possuindo uma corrente máxima de pico de 10 A, para pulsos estreitos (larguras da ordem de 10 ns) e corrente de 1,0 A, para pulsos largos (larguras da ordem de 1,0 μ s).

O projeto deste novo canhão de elétrons resultou de um esforço para otimizar um antigo protótipo rudimentar cuja meta principal foi testar o processo de solda cerâmica-metal, também desenvolvido no IEAv.

O desenvolvimento do canhão foi baseado em novas simulações computacionais, visando melhorar a geometria interna do canhão e ter um melhor entendimento físico do comportamento de um feixe de elétrons, resultando em nova configuração para os eletrodos, grade de controle, sistema de fixação e sistema térmico. As mudanças foram também estendidas aos sistemas auxiliares do canhão (vácuo e eletrônica associada) com o objetivo de melhorar seu desempenho, estabilidade e reprodutibilidade.

Com relação ao aspecto de caracterização, este trabalho descreve a avaliação das tintas emissoras utilizadas em catodos óxidos, usando-se um dispositivo denominado testador de catodos. O objetivo desta etapa foi obter a melhor emissividade e uma

confiável reprodutibilidade no processo de deposição da tinta no catodo do canhão de elétrons. As medidas de caracterização do canhão tiveram o objetivo de encontrar o ponto quiescente de trabalho. As análises foram baseadas nos dados obtidos do feixe de elétrons, usando-se como sensor um dispositivo denominado coletor de elétrons ou copo de Faraday.

O capítulo 2 descreve os aspectos históricos sobre o desenvolvimento de aceleradores de elétrons, menciona algumas aplicações onde a radiação produzida pode ser usada, como em processos químicos, biológicos e industriais, além da pesquisa em física elementar. É descrito o funcionamento de um acelerador linear e concentrando-se no canhão de elétrons, é apresentado um resumo da teoria de projeto de canhões com algumas fórmulas fundamentais e conceitos encontrado na literatura especializada. É apresentado também a técnica utilizada atualmente para o projeto de canhões, por meio de simulação computacional, descrevendo a base de funcionamento do código computacional EGUN e as simulações realizadas para a confecção do canhão de elétrons do IEAv.

O capítulo 3 descreve todos os processos realizados para o desenvolvimento do novo canhão de elétrons, visando as metas de projeto. São analisados os processos de formulação e pintura de tintas emissoras usadas em catodos óxidos. A construção do flange de aço inox que suporta a estrutura catodo, grade e filamento é pormenorizada, destacando-se a confecção do novo catodo, um novo tipo de grade e aperfeiçoamentos com relação à blindagem térmica. O projeto dos sistemas auxiliares (sistema de vácuo e eletrônica associada) são apresentados e analisados.

No capítulo 4 são apresentados os tipos de medidas realizadas para a caracterização das tintas emissoras e do canhão, os resultados obtidos nessas medidas, bem como a análise desses resultados.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho. Com base nos dados obtidos é analisado o desempenho do canhão e discutidas futuras medidas e modificações no canhão, com o intuito de se obter melhores características para o feixe de elétrons extraído.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesse capítulo será apresentado um breve histórico sobre a construção e desenvolvimento dos aceleradores lineares e algumas de suas aplicações. Será discutido também o código computacional EGUN, usado atualmente para o projeto da geometria de um canhão e análise das trajetórias do feixe extraído.

2.1. Histórico sobre aceleradores de elétrons e aplicações

O primeiro projeto para a construção de um acelerador linear de elétrons surgiu em 1924. Porém a construção de aceleradores para fins de pesquisas em física nuclear tomou impulso somente depois da segunda guerra mundial, basicamente por causa do desenvolvimento de geradores de microondas estáveis, com potência de alguns MW de pico e frequência da ordem 10^9 Hz. Assim, após o término da guerra muitos laboratórios iniciaram o desenvolvimento e construção de aceleradores lineares. Dois grupos se sobressaíram naquela época. O grupo da Universidade de Stanford, sob a orientação do Prof. W. W. Hansen, precedeu a construção de aceleradores lineares de elétrons. Um outro grupo da Universidade da Califórnia, sob a orientação do Prof. Alvarez, especializou-se no desenvolvimento e construção de aceleradores lineares de prótons [2.1].

Quase na mesma época dos desenvolvimentos dos aceleradores de Stanford, vários outros aceleradores lineares de elétrons foram sendo construídos em outros países (França, URSS e Japão).

Nas décadas de 60 e 70 o desenvolvimento de aceleradores lineares tomou duas direções; os aceleradores de pequeno porte com alguns MeV com finalidades médicas e industriais e os aceleradores de alta energia ou alta corrente média para estudos em física nuclear e física de partículas. Nos dias de hoje, há vários tipos de aceleradores que podem ser classificados em quatro categorias, descritas a seguir:

1. Aceleradores de alta energia para colisão - a busca por altas energias para o estudo de física de partículas é a motivação básica para o desenvolvimento de aceleradores. Esses

aceleradores são utilizados para pesquisa de interações de partículas elementares (léptons, fótons, hadríons). A faixa de energia é de 60 a 3000 GeV (10^9 eV);

2. Aceleradores de alta intensidade e média energia - máquinas dessa categoria são úteis para pesquisa em física de partículas e nuclear. A faixa de energia é de 0,5 a 60 GeV;

3. Anéis de armazenamento de feixe para gerar radiação síncrotron - essas máquinas foram desenvolvidas durante a década passada dentro de uma importante categoria de aceleradores. Um feixe de elétrons viajando através de dipolos magnéticos e onduladores em um anel de armazenamento produz a radiação síncrotron. Os raios ultravioleta e os raios X de alto brilho e contraste são utilizados em estudos de átomos, moléculas, matéria condensada e em aplicações médicas e industriais. A faixa de energia é de 0,7 a 7 GeV;

4. Aceleradores de baixa energia para pesquisa médica ou industrial - um grande número de aceleradores de baixa energia de todos os tipos são usados em pesquisa atômica e nuclear e em aplicações na indústria e medicina. A faixa de energia é de 0,15 a 45 MeV (10^6 eV).

Dentro da vasta gama de aplicações dos aceleradores de elétrons, pode-se citar alguns exemplos na área industrial que são:

- processos radioquímicos - polimerização (transformar moléculas pequenas em compostos de alto peso molecular) de líquidos, gases e sólidos; vulcanização de borrachas; tratamento de lixo (industrial e doméstico) com relação às substâncias sintéticas; curas de tintas; curas de materiais de fibras de vidro; envelhecimento de resinas utilizadas em materiais isolantes; purificação de gases industriais; irradiação de pedras preciosas e cristais para análise de coloração.
- processos radiobiológicos - esterilização de materiais médicos; preservação de comestíveis; dedetização de grãos; irradiação de sementes para acelerar o crescimento; inibição da germinação de colheita armazenada; terapia de radiação para eliminação de tumores; esterilização de lixo (industrial e doméstico) orgânico.
- processos industriais - fusão por feixe de elétrons para obtenção de metais de alta pureza; soldas por feixe de elétrons; tratamento dimensional para obtenção de buracos cônicos ou cilíndricos em materiais de alta dureza; endurecimento de superfícies metálicas [2.2].

2.2. Princípio de funcionamento de um acelerador linear de elétrons

Para descrever o funcionamento de um acelerador linear, usa-se o princípio da interação de uma partícula com uma onda eletromagnética. A figura 2.1 ilustra o exemplo de um elétron movimentando-se para a direita, levado por uma onda eletromagnética.

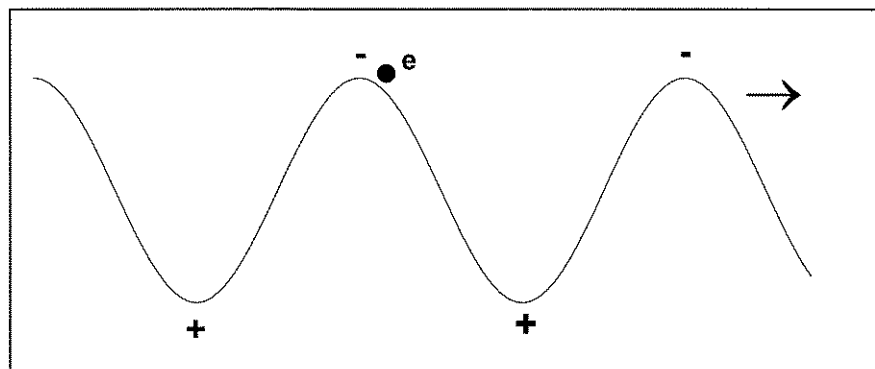


Figura 2.1 - Interação de uma partícula com uma onda eletromagnética.

Se essa onda eletromagnética possuir uma componente de campo elétrico paralela à direção de propagação, pode-se observar que se uma partícula carregada for lançada convenientemente na onda, ela irá adquirir uma grande energia. Um acelerador linear de partículas usa este mesmo princípio para acelerar partículas carregadas. Na prática porém, a construção de um acelerador apresenta muitas dificuldades, pois o campo elétrico deve ter um componente paralelo à direção de propagação, a velocidade da onda tem que ser igual à da partícula para que haja sincronismo (a partícula deve permanecer em fase) e a energia da onda precisa estar confinada.

Como princípio básico para aceleração de partículas, é necessário ter uma onda de RF (na faixa de microondas) com um componente do campo elétrico na direção do feixe e velocidade igual à velocidade das partículas. As partículas negativas que estão em um semi-ciclo negativo de uma onda de RF serão aceleradas e, se o campo elétrico de pico exceder um certo limiar que depende da taxa de crescimento da velocidade de onda, haverá duas fases (fases $-\phi_s$ e ϕ_s) nas quais as partículas podem permanecer, que resultarão em movimento na mesma direção da onda e ganho de velocidade com a mesma taxa desta onda, conforme mostra a figura 2.2.

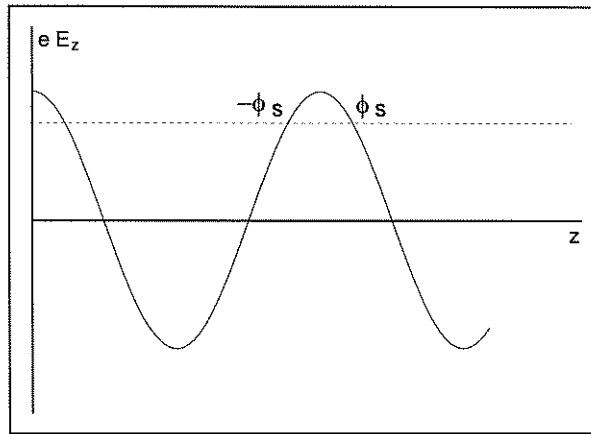


Figura 2.2 - A linha tracejada indica o campo elétrico limiar, acima do qual as partículas estarão em sincronismo com a onda de RF e terão maior ganho de energia. Na figura, a onda se move da esquerda para direita.

Nas imediações de ϕ_s existe uma estabilidade de fase, ou seja, se uma partícula estiver além deste ponto ela ganhará menos energia e se tornará mais lenta do que a onda e retornará em direção à ϕ_s . Por outro lado, uma partícula que está um pouco aquém receberá uma aceleração extra e tenderá a alcançar ϕ_s . Como resultado, as partículas que são lançadas na onda não muito longe de ϕ_s (ou seja, não muito longe da velocidade correta), oscilarão em torno da fase síncrona ϕ_s , ganhando energia na média. O mesmo tipo de argumento mostra que $-\phi_s$ é um ponto instável, pois partículas um pouco abaixo deste ponto irão se distanciar cada vez mais.

Conforme a velocidade de uma partícula aumenta (tende a se aproximar da velocidade de luz), as oscilações em torno destas fases se tornam menores pois a velocidade passa a ser independente da sua energia, deixando praticamente de existir o limiar. Portanto, a característica desejada é colocar todas as partículas na crista da onda, onde elas podem acumular o máximo de energia com um espalhamento mínimo [2.3].

2.3. Esquema e componentes de um acelerador linear de elétrons

Basicamente um acelerador linear de elétrons é constituído por uma fonte geradora de elétrons (canhão de elétrons), um sistema que interliga o canhão com a primeira estrutura aceleradora (sistema de transporte de feixe) fazendo um tratamento prévio do feixe e as estruturas aceleradoras que aceleram o feixe de elétrons à velocidades próximas à da luz e, conseqüentemente, aumentam progressivamente a energia do feixe de elétrons. Essas estruturas são dispositivos cilíndricos, constituídos

de anéis e íris confeccionados em cobre OFHC (“oxygen-free high-conductivity”, cobre de alta condutividade livre de oxigênio), formando cavidades ressonantes justapostas. As estruturas são alimentadas, através de acopladores de RF, com microondas de alta potência fornecidas por válvulas amplificadoras (“klystrons”), gerando um campo elétrico axial que acelera os elétrons até o alvo final. Todo este sistema opera em ultra-alto vácuo, mantido por meio de bombas turbomoleculares e iônicas. Um esquema simplificado de um acelerador de elétrons é visto na figura 2.3.

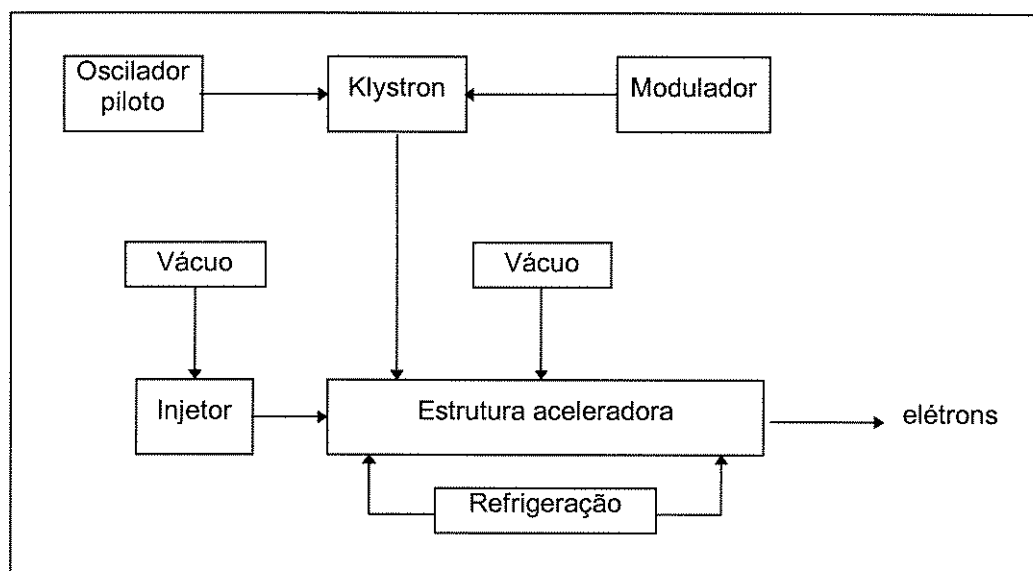


Figura 2.3 - Esquema de um acelerador linear de elétrons.

A figura 2.4 mostra a planta do prédio do acelerador do IEAv, construído para acomodar, originalmente, oito estruturas aceleradoras produzindo um feixe de 130 MeV, com a finalidade de se obter dados nucleares. Na figura é mostrado em **(A)** a sala de controle do acelerador, **(B)** o salão dos moduladores e das válvulas “klystrons”, **(C)** a galeria subterrânea onde ficarão o canhão e as estruturas aceleradoras (a galeria é totalmente recoberta com terra compactada para oferecer uma blindagem eficiente contra as radiações produzidas em seu interior), **(D)** um salão a 90° da galeria para experimentos de baixa energia e **(E)** o salão de alvo final para a produção de nêutrons.

O acelerador atualmente em construção compõe-se de um módulo formado por duas estruturas aceleradoras de 2,0 m de comprimento e alimentadas por uma válvula “klystron” [2.4]. Suas principais características são:

frequência de operação:	1300 MHz
corrente de feixe de pico:	10 A (máxima)
largura de pulso:	10 ns a 1 μ s
taxa de repetição:	400 Hz (máxima)
número de estruturas:	2
energia final de feixe:	30 MeV

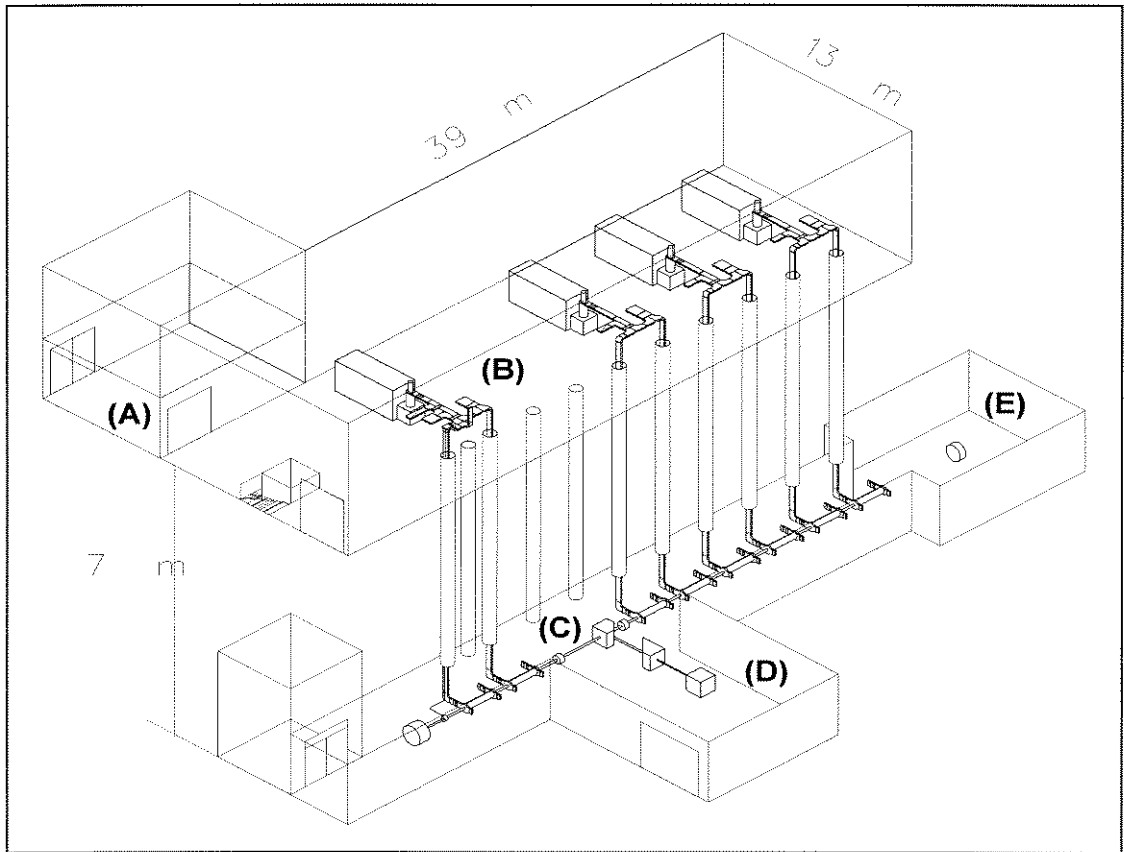


Figura 2.4 - Vista geral do prédio do acelerador linear. (A) sala de controle; (B) salão das válvulas klystrons; (C) galeria subterrânea; (D) salão de 90°; (E) salão de alta energia.

A figura 2.5 mostra uma visão mais detalhada do primeiro módulo de aceleração, onde se vê o modulador, a válvula amplificadora de microondas (“klystron”), a rede de RF que conduz a microondas modulada até as estruturas aceleradoras, o canhão de elétrons, o pré-agrupador encarregado de fazer um empacotamento prévio do feixe de elétrons e as duas estruturas aceleradoras.

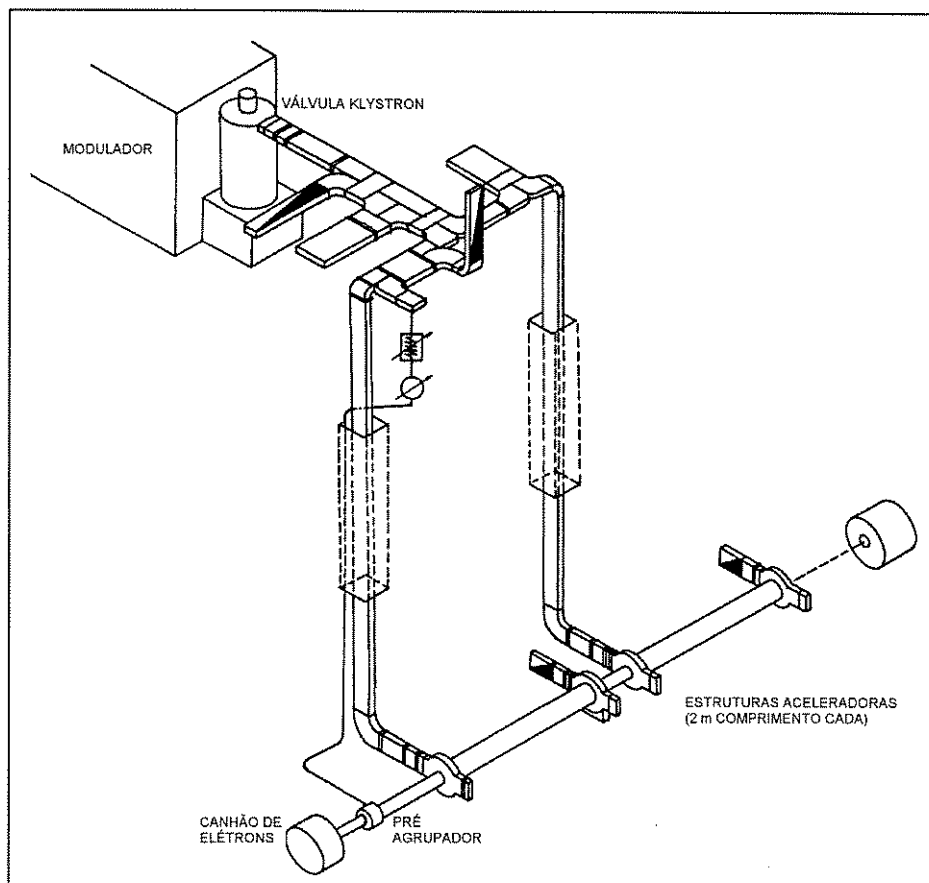


Figura 2.5 - Primeiro módulo de aceleração.

2.4. Noções sobre teoria de canhões de elétrons

O estudo e construção de canhões de elétrons baseia-se na análise da interação de partículas carregadas submetidas aos efeitos de um campo eletromagnético. Nos parágrafos seguintes é apresentada uma síntese desta teoria, descrevendo as equações de movimento de uma partícula, conceitos de espaço de fase, carga espacial, perveança e emitância de um feixe de elétrons e teoria de canhões de elétrons tipo Pierce (método analítico para obtenção do perfil dos eletrodos focalizadores de feixe de um canhão).

- equação de movimento - as trajetórias de um feixe de elétrons em um campo eletromagnético são analisadas levando-se em consideração os efeitos da relatividade. A equação fundamental, conhecida como força de Lorentz, é dada por [2.5]:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.1)$$

onde q é a carga da partícula, $\mathbf{v}$ a velocidade da partícula, $\mathbf{E}$ o campo elétrico e $\mathbf{B}$ o campo magnético.

Na equação (2.2), o momento $\mathbf{P}$ sofre uma correção relativística dada por:

$$\mathbf{P} = \frac{m \mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{ou} \quad \mathbf{P} = \gamma m \mathbf{v}, \quad (2.2)$$

onde o termo γ é conhecido como fator de Lorentz e o termo γm é também conhecido como massa relativística.

Freqüentemente, cálculos de canhão de elétrons envolvem geometria de feixe e campo com simetria rotacional, ou seja, possuem simetria com relação ao eixo de propagação (também chamado de simetria axial). Nesse caso, as equações são melhor descritas em coordenadas cilíndricas, sendo o vetor velocidade $\mathbf{v} = \{\dot{r}, r\dot{\theta}, \dot{z}\}$ e as equações de movimento (2.3), dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\gamma m \dot{r}) - \gamma m r \dot{\theta}^2 &= q(E_r + r\dot{\theta}B_z - \dot{z}B_\theta), \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dt}(\gamma m r^2 \dot{\theta}) &= q(E_\theta + \dot{z}B_r - \dot{r}B_z) \quad \text{e} \\ \frac{d}{dt}(\gamma m \dot{z}) &= q(E_z + \dot{r}B_\theta - r\dot{\theta}B_r). \end{aligned} \quad (2.3)$$

- espaço de fase - usualmente citado em dinâmica de partículas e apresentado em termos de coordenadas generalizadas. Para melhor definir o termo, considera-se uma partícula em movimento em um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais $0x$, $0y$, $0z$. Assume-se que a partícula é completamente especificada sabendo-se onde ela está e para onde ela está indo, ou seja, é necessário conhecer as três coordenadas x , y , z e as três componentes do momento p_x , p_y , p_z (ou $m\dot{x}$, $m\dot{y}$, $m\dot{z}$). Todas essas informações podem ser representadas pela posição de um ponto em um espaço hexadimensional com coordenadas x , y , z , p_x , p_y , p_z . Esse espaço hexadimensional é conhecido como espaço de fase.

- emitância de um feixe - fornece uma base quantitativa, ou uma figura de mérito, para descrever a qualidade de um feixe. Por exemplo, uma pequena emitância indica que o feixe pode ser focalizado de tal modo a ter, simultaneamente, um diâmetro reduzido e um pequeno momento transversal, e conseqüentemente ser transmitido por longas

distâncias mantendo a sua focalização. Ela está relacionada com as projeções bidimensionais do volume ocupado pelo conjunto de partículas no espaço de fase hexadimensional. A grande maioria dos feixes de interesse prático possuem dois planos de simetria ou são circularmente simétricos. Assumindo que um feixe se propaga na direção z e que possua dois planos de simetria (x - z e y - z), o movimento de cada partícula individual é definida por três coordenadas espaciais (x, y, z) e três coordenadas de momento (p_x, p_y, p_z) em algum dado instante de tempo. Este conjunto de partículas formará um feixe se a componente do momento de cada uma no sentido longitudinal for muito maior que as componentes nas direções transversais (ou seja, no caso de coordenadas cartesianas, se $p_x \ll p_z$ e $p_y \ll p_z$).

Considerando o plano x - z , uma partícula terá um momento total $P = (P_x^2 + P_z^2)^{1/2}$, onde $P_x \leq P_z \approx P$. A inclinação da trajetória é dada por $x' = dx/dz = \dot{x}/\dot{z} = P_x/P$. Para uma dada distância z ao longo da direção de propagação do feixe, cada partícula representa um ponto no espaço x - x' . Esta área ocupada pelos pontos que representam todas as partículas do feixe é dada por:

$$A_x = \iint dx \, dx' . \quad (2.4)$$

Em um sistema onde todas as forças agindo sobre as partículas são proporcionais a um deslocamento radial x da partícula com relação ao eixo do feixe, a área ocupada pelo feixe no espaço x - x' possui uma configuração elíptica. Se esta elipse possuir os semi-eixos x_m e x'_m , a área A_x que é idêntica a área da elipse é dada por:

$$A_x = \pi \, x_m \, x'_m . \quad (2.5)$$

Neste caso, a emitância é definida como:

$$\varepsilon_x = \frac{A_x}{\pi} . \quad (2.6)$$

Analogamente, tem-se uma emitância ε_y para o plano y - z .

- carga espacial - relacionada com o fluxo de corrente entre eletrodos de polaridades diferentes em um ambiente de vácuo e a presença de elétrons constituindo esta corrente, os quais introduzem uma distribuição de cargas, chamada de carga espacial. O efeito da carga espacial é mais amplamente estudado em diodos e os resultados obtidos são

estendidos a triodos e dispositivos multieletródos. Um dos efeitos mais destacados da carga espacial no estudo de um diodo, é a limitação da corrente, como uma espécie de efeito de blindagem, a um valor determinado pelo potencial do anodo elevado a potência de três meios ($3/2$), fazendo com que a distribuição deste potencial tenha um perfil não linear.

Em um diodo de eletrodos planos, a distribuição do potencial, na ausência da carga espacial, possui o perfil de uma reta indo de um eletrodo para outro. A curva do potencial possui um valor mínimo no eletrodo negativo e máximo no eletrodo positivo e o fluxo elétrico são linhas retas paralelas que saem do eletrodo positivo e vão para o eletrodo negativo, conforme a figura 2.6a.

Se um dos eletrodos é um catodo capaz de emitir um pequeno número de elétrons, haverá alguns que estarão se movendo em direção ao anodo, neste caso, algumas linhas de fluxo terminarão nestes elétrons ao invés de atingirem o catodo, conforme mostrado na figura 2.6b. Por causa desta carga negativa, o potencial será menor do que o previsto. A curva do potencial sofrerá uma depressão e terá a forma de uma curva côncava abaixo da linha tracejada, com os mesmos valores inicial e final.

Se o catodo for capaz de emitir uma quantidade ilimitada de elétrons, a corrente será limitada por ela mesma em um valor definido, por causa da repulsão mútua entre os elétrons, fazendo com que a curva do potencial seja diminuída até que a sua inclinação com relação à superfície do catodo se torne zero. Esta situação pode ser visualizada na figura 2.6c. A inclinação zero no catodo indica que a carga líquida nessa região é zero, ou seja, significa que todas as linhas de fluxo que saem do anodo terminam nos elétrons em movimento e nenhuma delas atinge o catodo [2.6].

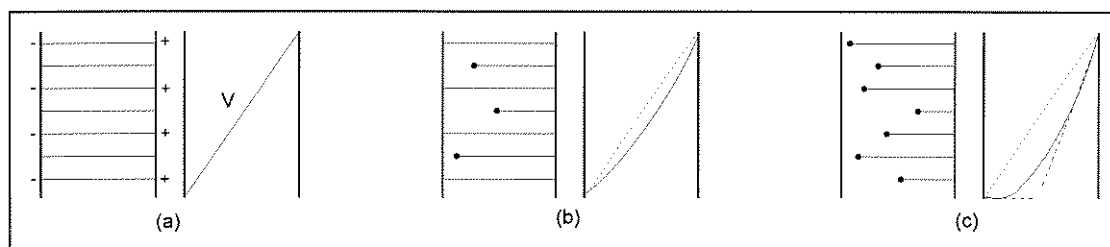


Figura 2.6 - Linhas de fluxo elétrico e distribuição de potencial em um diodo de eletrodos planos, para vários graus de carga espacial: (a) sem corrente, (b) pequena corrente e (c) corrente limitada pela carga espacial.

As relações entre potencial, distância e corrente em um diodo de eletrodos planos sujeito aos efeitos da carga espacial deram origem a uma equação conhecida como lei de Child-Langmuir. A dedução desta equação é obtida com base em um diodo de eletrodos planos, cuja corrente está limitada pela carga espacial.

A seguir é apresentada a dedução dessa equação para o caso unidimensional. Para facilitar a análise, os eletrodos estão espaçados por uma distância d e consideram-se as hipóteses que todos os elétrons saem do catodo com velocidade inicial $v_0 = 0$ e que o catodo libera uma quantidade ilimitada de elétrons. O potencial eletrostático é determinado por meio da equação de Poisson, com $V=0$ para $x=0$ e $V=V_0$ para $x=d$. A relação entre a densidade de carga volumétrica ρ , a densidade de corrente J e a velocidade dos elétrons v é obtida da equação de continuidade. A velocidade depende do potencial V e é encontrada pela integração da equação de movimento. As três equações são:

$$\nabla^2 V = \frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (2.7)$$

$$J = -\rho v \quad e \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV. \quad (2.9)$$

O sinal negativo na equação (2.8) significa que o sentido da corrente de elétrons é tomada como sendo a direção do eixo x positivo.

Substituindo v de (2.9) em (2.8) e ρ de (2.8) em (2.7) tem-se:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{J}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{V^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.10)$$

A primeira integração é obtida pela multiplicação de ambos os lados da equação (2.10) por dV/dx e integrando:

$$\left(\frac{dV}{dx} \right)^2 = \frac{4J}{\epsilon_0} \left(\frac{m}{2e} \right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}} + C_1. \quad (2.11)$$

Sendo o suprimento de elétrons ilimitado, eles tenderão a se acumularem em uma região perto do catodo. Estes elétrons constituirão a carga espacial e irão diminuir o campo

elétrico no catodo até que ele se torne zero. A constante de integração C_1 se torna zero na região de $x = 0$, pois os elétrons liberados formarão a carga espacial anulando o campo elétrico acelerador. Deste modo, para $x = 0$ tem-se $dV/dx = 0$, assim como $V = 0$. A segunda integração leva a:

$$\frac{4}{3}V^{3/4} = \left(\frac{4J}{\epsilon_0}\right)^{1/2} \left(\frac{m}{2e}\right)^{1/4} x + C_2 . \quad (2.12)$$

Usando as mesmas condições de contorno aplicadas anteriormente, conclui-se que a constante C_2 também será zero ($V = 0$ para $x = 0$). Resolvendo a equação (2.12) em termos da densidade J e usando o fato que $V = V_0$ para $x = d$:

$$J = \frac{4}{9}\epsilon_0 \left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} . \quad (2.13)$$

A equação (2.13) mostra a relação entre a corrente e a tensão quando um diodo está operando sob o efeito da carga espacial. Isto permite conhecer a máxima densidade de corrente que pode ser atingida em um diodo quando se tem um aumento intenso do fornecimento de elétrons pelo catodo. Neste caso, a corrente só poderá ser intensificada pelo aumento do potencial de aceleração ou pela diminuição do espaçamento entre catodo e anodo. A lei de Child-Langmuir tem fundamental importância para válvulas eletrônicas e canhões de elétrons.

Para o caso de elétrons se movimentando em vácuo, a equação se transforma em:

$$J = 2,33 \times 10^{-6} \frac{V_0^{3/2}}{d^2} \quad [\text{A/cm}^2] , \quad (2.14)$$

com V_0 , o potencial de aceleração, em volts e d a distância entre eletrodos em centímetros.

No caso de um feixe uniforme sendo emitido de uma área circular de raio r_c , chega-se a um resultado para a corrente do feixe de:

$$I = \pi 2,33 \times 10^{-6} V_0^{3/2} \left(\frac{r_c}{d}\right)^2 \quad [\text{A}] . \quad (2.15)$$

Da lei de Child-Langmuir surgiu um conceito chamado de perveança (K), definido como a relação entre a corrente I e o potencial de aceleração V_0 elevado a

potência $3/2$. A perveança é outra figura de mérito que avalia o rendimento de um canhão de elétrons, quando este é operado no limite da carga espacial. Ela é dada pela fórmula:

$$K = \frac{I}{V_0^{3/2}} \quad [\text{perv}] \quad . \quad (2.16)$$

A fórmula acima pode ser definida como uma perveança genérica, pois se trata de uma equação simplificada para um canhão diodo. Mesmo assim, ela é amplamente usada para canhões triodo apenas como um termo de comparação entre eles, pois esta equação leva em conta somente a forma dos eletrodos, desprezando outros fatores como tipo e dimensão do catodo, a influência da grade de controle, etc. Como exemplo, um canhão com uma perveança típica de $K = 1,0 \times 10^{-6}$ perv pode fornecer, teoricamente, uma corrente de 31 A para um potencial de aceleração de 100 kV ou 14,6 A para um potencial de aceleração de 60 kV.

Uma relação mais precisa e que leva em conta detalhes significativos para um canhão triodo, tais como parâmetros relacionados com a grade de controle, é dado pela fórmula (2.17):

$$K = \frac{I}{V_{eq}^{3/2}} \quad , \quad (2.17)$$

sendo que V_{eq} é chamado de potencial do diodo equivalente para o triodo. Este potencial está situado a uma distância do catodo chamada de distância do diodo equivalente, que resultará no mesmo campo elétrico e na mesma densidade de corrente para o catodo. Ele é definido como [2.7]:

$$V_{eq} = \frac{\left(V_g + \frac{V_0}{\mu} \right)}{\left[1 + \frac{1}{\mu} + \left(\frac{4}{3\mu} \right) \left(\frac{d_{ga}}{d_{cg}} \right) \right]} \quad , \quad (2.18)$$

onde:

V_0 é o potencial de aceleração,

V_g é o potencial efetivo de grade,

μ é o fator de amplificação do triodo,

d_{ga} é a distância entre a grade e o anodo e

d_{cg} é a distância entre o catodo e a grade.

Outra informação que se obtém da perveança é que ao se fixar um dado valor para a mesma, é possível avaliar a corrente máxima de um feixe de elétrons que poderia ser transportado através de um tubo de diâmetro a e comprimento L sem que o feixe colida com as paredes do tubo. Isto auxilia o posicionamento de lentes magnéticas responsáveis pela focalização do feixe. A equação é do tipo [2.8]:

$$I_{max} = 38,5 \times 10^{-6} V_0^{\frac{3}{2}} \left(\frac{a}{L} \right)^2. \quad (2.19)$$

De maneira geral, os canhões de elétrons utilizados em aceleradores possuem perveança (genérica) na faixa de 10^{-7} a 10^{-6} perv. Isto significa que para um potencial de aceleração de 100 kV, a corrente nestes canhões varia entre 3,0 A e 20,0 A.

A construção de aceleradores lineares de elétrons requer canhões com alta perveança (ou seja, alta densidade de corrente) e feixe com o melhor comportamento possível, sendo difícil obter uma geometria adequada de maneira puramente empírica. Para facilitar a construção, foi desenvolvido um método para se obter um feixe retilíneo entre dois eletrodos de tamanho finito, baseando-se nos cálculos de um diodo limitado pela carga espacial. Das soluções destas equações, é possível extrair um formalismo para uma teoria simples de projeto de canhões de elétrons. Um canhão de elétrons projetado com este método é conhecido como canhão tipo Pierce, devido ao idealizador do método, J. R. Pierce [2.9].

O método de Pierce consiste em empregar configurações que são segmentos de planos infinitos paralelos. Um feixe originário de tal segmento de catodo deverá se espalhar, de um modo indesejável, em função da distância percorrida. Este feixe irá divergir como resultado das forças de repulsão da carga espacial, as quais estarão todas balanceadas quando vistas em uma configuração completa (fluxo retilíneo entre planos infinitos). O método de Pierce consiste em suprir forças de compensação na região entre o catodo e anodo ao longo da borda de um feixe confinado, por meio do posicionamento de eletrodos com certas geometrias e potenciais na região externa ao feixe. Se os eletrodos são ajustados para que a distribuição de campo ao longo da borda do feixe seja a mesma que a de um feixe dentro de uma configuração completa, então um fluxo retilíneo dentro deste segmento é obtido.

Este formalismo pode ser estendido para a construção de canhões com outros tipos de geometria, conforme é visto na figura 2.7. Estas formas envolvem: **(a)** canhão com catodo plano (discutido no parágrafo anterior) no qual o feixe possui o mesmo tamanho e forma do catodo, **(b)** canhão de simetria esférica convergente, o qual gera um feixe de formato retangular e **(c)** canhão de simetria cilíndrica convergente, o qual gera um feixe cilíndrico sólido [2.10].

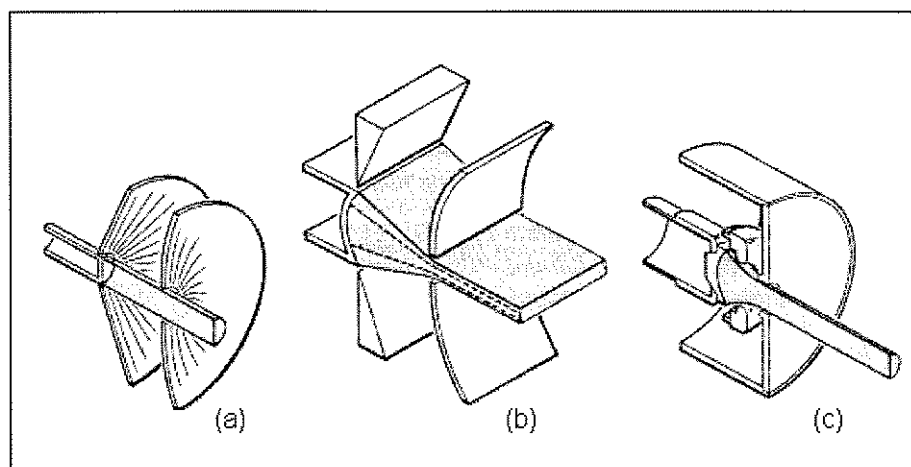


Figura 2.7 - Geometrias de canhões de elétrons tipo diodo: (a) plano, (b) esférico convergente e (c) cilíndrico convergente.

Exemplificando melhor a técnica de Pierce, considera-se um diodo plano completamente limitado pelo efeito da carga espacial. Um plano é o emissor e o outro o anodo e deseja-se utilizar parte da região deste diodo como um canhão de elétrons. Pierce demonstrou que o efeito dos elétrons externos nesta região escolhida, poderia ser representado por meio de um simples eletrodo unipotencial chamado eletrodo de focalização. Como este eletrodo produz campos na região externa do feixe (que são soluções da equação de Laplace, $\nabla^2 V = 0$) que satisfazem as condições de contorno da borda do feixe, os elétrons no feixe ainda se comportam como se eles estivessem fluindo em um diodo completo (planos infinitos), ou seja, eles mantêm trajetórias retilíneas. Pela aplicação de condições de contorno adequadas, canhões como o mostrado na figura 2.8, podem ser projetados como se o fluxo de elétrons estivesse entre catodo e anodo de um diodo idealizado, em coordenadas planas, cilíndricas ou esféricas [2.11].

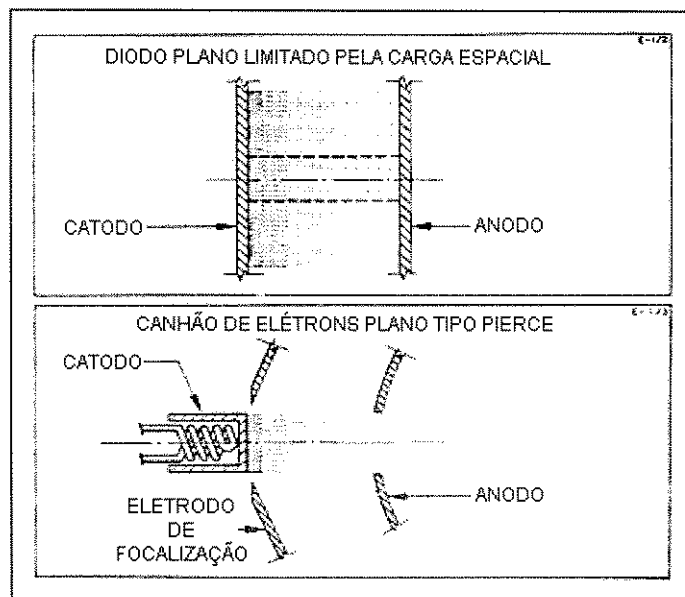


Figura 2.8 - Uso da seção de um diodo plano limitado pela carga espacial como um canhão de elétrons.

Embora o método de Pierce seja uma ferramenta extremamente útil na construção de canhões de elétrons, ela apresenta algumas limitações no projeto de canhões de alta densidade de corrente. Uma das limitações é que Pierce assume que as linhas de equipotenciais na região do fluxo de elétrons e na região do anodo são segmentos de esferas concêntricas. Porém quando é aberto um orifício no anodo, para permitir a passagem do feixe através dele, as linhas de equipotenciais tendem a curvarem-se para dentro da abertura do anodo ao invés de permanecerem paralelas ao mesmo. Esta situação aumenta o componente transversal do campo elétrico na abertura, que desvia os elétrons de forma divergente na direção radial, deteriorando o desempenho do canhão. Uma das soluções é alterar a configuração do eletrodo de focalização proposto por Pierce, de modo a colimar melhor o feixe e compensar a distorção do campo.

Outro problema é que a geometria tipo Pierce produz uma não uniformidade na densidade de corrente do feixe. O formato dos eletrodos gera um campo elétrico com focalização radial, ajudando na convergência e laminaridade do feixe, mas a força devido à sua carga espacial, também radial, tenta equilibrar a força de focalização produzindo uma deformação no perfil da densidade de corrente. Conseqüentemente, o feixe assume um perfil, como o mostrado na figura 2.9, onde o centro do feixe fica com uma depressão e a maior densidade concentra-se nas bordas do feixe. Esta figura

comprova a teoria apresentada na literatura especializada, pois foi obtida de uma simulação computacional para o canhão de elétrons do IEAv.

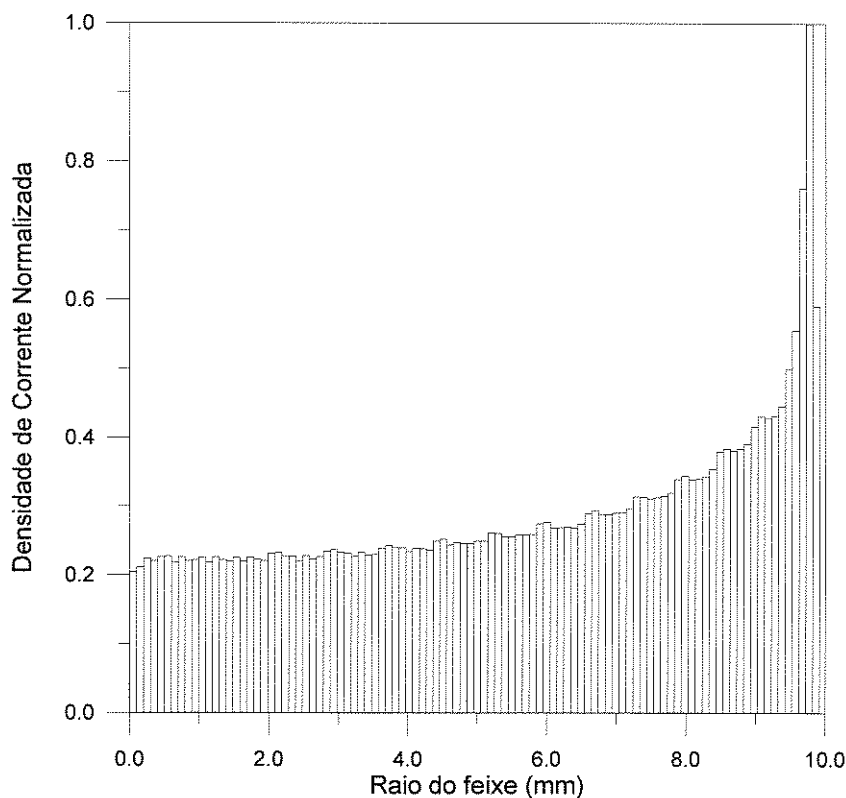


Figura 2.9 - Histograma da densidade de corrente obtido por meio de simulação computacional para o canhão de elétrons do IEAv, para uma distância do feixe de $z=24$ mm (saída do anodo).

2.5. O código computacional EGUN

Com o objetivo de facilitar os projetos de canhões de elétrons, pesquisadores da Universidade de Stanford - EUA desenvolveram um programa de computador, inicialmente chamado de SEOP ("SLAC Electron Optics Program"), que permite simular a geometria de um canhão e, com isso, ter um conhecimento inicial de como essa geometria influencia a trajetória do feixe e os parâmetros de corrente, energia e emitância de um canhão de elétrons que se deseja construir. Posteriormente o programa ganhou uma versão comercial designada, EGUN [2.12].

O código computacional EGN87c, uma versão mais recente do EGUN, foi desenvolvida para uso em microcomputador tipo PC. A simulação computacional do canhão visa determinar a configuração geométrica dos eletrodos, corrente máxima,

perfil, perveança e energia do feixe. O programa foi elaborado especificamente para calcular trajetórias eletrônicas em campos eletrostáticos e magnetostáticos.

O programa utiliza uma simetria cilíndrica para o conjunto de eletrodos (catodo, grade eletrodo de focalização e anodo) e, para facilidade de execução, é realizado o cálculo em somente metade do eixo de simetria. A região de interesse é dividida em uma malha quadrada de aproximadamente 8.000 pontos. A meia seção dos eletrodos de metal do canhão é desenhada em uma escala conveniente dentro do campo de pontos de malha. Essas superfícies de metal representam contornos de Dirichlet nos quais os potenciais são conhecidos e especificados no arquivo de entrada montado pelo usuário. Então para completar as condições de contorno, devem ser escolhidas superfícies entre os eletrodos que são os contornos de Neumann, nos quais o componente normal do campo elétrico é assumido como sendo zero. Esses contornos (Dirichlet e Neumann) são especificados no arquivo de entrada. Uma vez que os contornos e os potenciais são lidos, o programa realiza uma interpolação dos pontos para ajustar a curva do desenho do canhão e começa a calcular os campos e as trajetórias dos elétrons na região definida.

Usando a equação de Laplace ($\nabla^2 V = 0$), o programa calcula inicialmente o potencial em cada ponto da malha, baseando-se nos potenciais dados para os eletrodos. Com as dimensões da superfície emissora do catodo, dada no arquivo de entrada, o programa calcula os potenciais em frente à superfície do catodo e, usando a equação de Child-Langmuir (equação 2.13) para emissão limitada por carga espacial [2.13], calcula a corrente emitida da área do catodo para uma série de anéis concêntricos. Usando uma suposição inicial de que esses anéis de corrente que passam através da região do anodo são cilíndricos, o programa resolve a equação de Poisson ($\nabla^2 V = \rho/\epsilon_0$) para os potenciais em todos os pontos da malha na presença desta carga (forças devidas à carga espacial). Deste grupo de pontos de potenciais, as trajetórias de cada segmento de corrente são calculadas. Com essa nova distribuição de corrente, a equação de Poisson é novamente resolvida e todo processo sofre iterações até a convergência da solução.

A equação de Poisson é solucionada por meio do método de diferenças finitas, usando as condições de contorno definidas pelo usuário. Os campos elétricos são determinados por diferenciação da distribuição do potencial. As equações das trajetórias dos elétrons são relativísticas e o programa usa o método de Runge-Kutta para resolvê-las. Os cálculos da lei de Child-Langmuir, para inicialização, são refeitos pela média da

perveança utilizada no ciclo anterior e a perveança calculada diretamente da solução da equação de Poisson.

2.6. Simulação computacional do canhão de elétrons

O desenvolvimento da técnica de solda cerâmica metal no Instituto [2.14], necessária para se obter estanqueidade ao vácuo entre peças metálicas e a alumina corrugada, permitiu a construção do primeiro canhão protótipo, cujo geometria foi obtida por meio de simulação com o código EGN87c. Na construção do canhão protótipo houve alguns problemas mecânicos e físicos, com respeito ao comportamento do feixe, cujas análises serviram de base para a construção de um outro canhão [2.15].

Visando estudar os limites de aplicação do programa EGN87c, para se atingir uma simulação que pudesse satisfazer o mais próximo possível os dados requeridos do projeto, foram realizadas simulações alterando-se o ângulo de abertura da saída do anodo, a influência da extensão da região de cálculo, variações na distância entre catodo e grade e mudanças no contorno catodo-grade [2.16]. Com a aquisição da nova versão do programa (EGN2e), foram realizadas outras simulações computacionais, aliadas à interpretação física do problema, para se determinar os limites de validade do novo código EGN2e [2.17].

Dessas simulações obteve-se os dados da configuração de geometria e trajetória do feixe do canhão atual. Embora o programa ofereça uma certa facilidade para simular qualquer tipo de geometria, optou-se novamente pela construção de um canhão triodo do tipo catodo plano em vista das facilidades mecânicas de confecção e ajustes. O canhão com simetria cilíndrica (figura 2.7c) possui uma melhor convergência do feixe, mas exige certos refinamentos mecânicos como definição da concavidade do catodo em um raio bem definido e a concavidade da grade num perfil que acompanhe a linha de equipotencial, que é seu melhor posicionamento para o controle do feixe.

Os dados de saída do programa são fornecidos de forma numérica e gráfica. Com os dados numéricos é possível obter uma estimativa da corrente máxima de feixe, da perveança e da emitância. A tabela 2.1 mostra os diversos parâmetros obtidos para três estudos de valor do potencial de aceleração.

A corrente máxima é igual para os três potenciais pois o programa assume que o catodo tem uma densidade de corrente infinita e só leva em conta a área do mesmo,

ignorando também o tipo de catodo (metal, óxido, dispenser, etc). A perveança é calculada usando-se a equação (2.14).

Tabela 2.1 - Parâmetros de feixe obtidos do programa EGN, para diversos valores de potencial de aceleração.

Potencial (kV)	80	90	100
Corrente máxima (A)	5,4998	5,4998	5,4998
Perveança (10 ⁻⁶ perv)	0,243	0,203	0,174
Emitância normalizada (π mm.mrad)	10,49	13,23	15,59

O programa fornece o valor da emitância normalizada pois essa quantidade permanece invariante com a aceleração do feixe, desde que a aceleração e o transporte não sejam acompanhados por aberrações que possam degradar a qualidade do feixe. A relação entre as duas emitâncias é dada por:

$$\epsilon_n = \beta \gamma \epsilon \; , \tag{2.20}$$

onde: $\beta = \frac{v}{c}$ e $\gamma = \sqrt{1 - \beta^2}$.

De acordo com o autor do programa, o momento usado para encontrar o produto $\beta \gamma$ é obtido do cálculo da primeira trajetória.

Com os gráficos gerados pelo programa é possível ter uma avaliação da geometria do canhão observando as trajetórias do feixe, com respeito a cruzamentos de raios (o campo elétrico no interior do canhão é muito intenso e acaba deformando os raios) e abertura do feixe de elétrons (se o campo elétrico é insuficiente para manter o feixe concentrado, isso dificulta o tratamento pelo injetor).

Para se ter uma melhor precisão, os cálculos são divididos em duas partes. Na primeira parte os cálculos são feitos para a região catodo-grade, que sofre uma ampliação na escala (0,0001 m/unidade de malha). Esses dados são gravados e utilizados na segunda parte, onde, é feito o cálculo para o canhão todo (para esse caso a escala é de 0,0005 m/unidade de malha). Na figura 2.10 é mostrado a saída para a região catodo-grade e na figura 2.11 é visto toda geometria simulada do canhão, observando que feixe de elétrons sofre uma convergência, comprovando que a geometria dos

eletrodos foi bem escolhida. Em ambas as figuras as linhas perpendiculares às trajetórias do feixe de elétrons são as linhas de equipotenciais. A fim de evitar saturação nas figuras, foi mostrada somente a trajetória de 15 raios mas as simulações foram efetuadas com 75 raios.

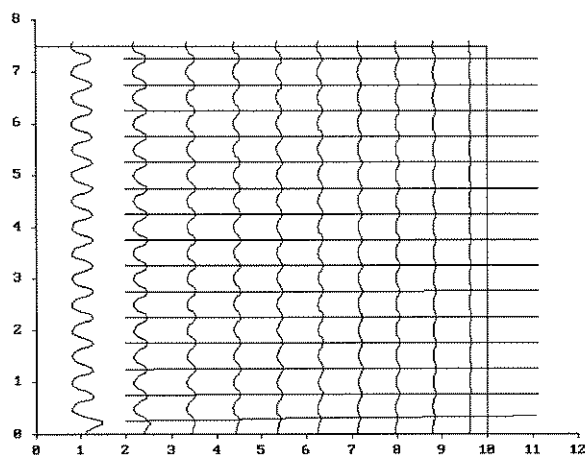


Figura 2.10 - Saída gráfica gerada pelo EGUN, mostrando as trajetórias do feixe na região ampliada catodo-grade (dimensões $\times 10^{-1}$ mm).

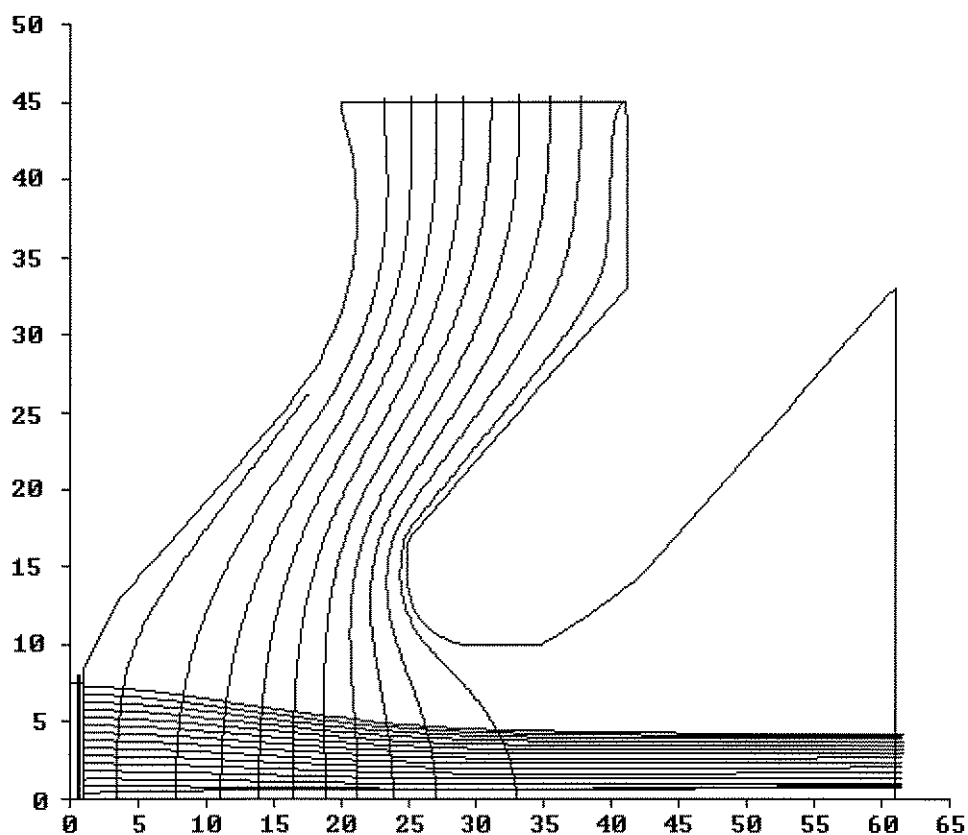


Figura 2.11 - Saída gráfica do EGUN, para o canhão de elétrons, mostrando as linhas de equipotenciais e as trajetórias do feixe (dimensões dos eixos em mm).

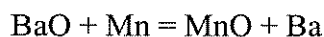
CAPÍTULO 3

CONSTRUÇÃO DO CANHÃO DE ELÉTRONS

Neste capítulo serão descritos a técnica de preparo da tinta emissora para um catodo óxido e o método de pintura, a construção do flange do catodo, o sistema de vácuo e a eletrônica do canhão (fontes e circuito pulsador).

3.1. Formulações e métodos de pintura das tintas utilizadas em catodos óxidos

O catodo do canhão é formado por uma base metálica, constituída de níquel com pureza de 99%¹. Na superfície do níquel é depositada uma camada emissora de elétrons, formada por óxidos alcalino-terrosos. A pureza do níquel é necessária, pois certos elementos químicos podem contaminar a camada emissora, fazendo com que a mesma tenha baixa emissão, não conseguindo emitir elétrons suficientes para gerar uma corrente catódica razoável [3.1]. Por outro lado, o níquel deve ser dopado com certos metais, chamados de ativadores. Esses ativadores auxiliam a redução dos óxidos, ou seja, transformam os óxidos em elementos livres. Ex:



Os agentes redutores mais comuns usados como ativadores são: Al, C, Mg, Mn, Si, Ti e Zr [3.2]. Embora auxiliem o processo de ativação, devem ser usados em baixa proporção (a porcentagem máxima da soma dos elementos deve ficar em torno de 0,5% em relação à porcentagem de níquel) para evitar uma evaporação excessiva dos elementos que compõem a camada emissora, diminuindo a vida útil do catodo.

Como os óxidos de elementos alcalino-terrosos são instáveis quimicamente em meio ambiente, pois formam hidróxidos cujas ligações químicas são extremamente fortes, os depósitos são aplicados em forma de carbonatos, que, por meio de um processo térmico, irão se converter nos respectivos óxidos. Este tipo de processo é conhecido como ativação do catodo. Os procedimentos para o processo de ativação de um catodo óxido são descritos em detalhes na seção 4.3. Os carbonatos mais usados

¹ Análise típica: Cu<2500, Fe<4000, Mg<2000, Mn<3500, Si<1500, Ti<1000, C<1500, S<100 ppm. Dados fornecidos pelo fabricante Goodfellows.

como emissores de elétrons são os carbonatos duplos de Ba e Sr - $(\text{BaSr})\text{CO}_3$ - e os carbonatos triplos de Ba, Sr e Ca - $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$. A adesão dos carbonatos à base metálica é obtida por meio de uma mistura de solventes e ligantes orgânicos, formando-se uma suspensão (tinta).

Com o objetivo de obter-se a melhor emissividade e uma confiável reprodutibilidade no processo de deposição da tinta no catodo do canhão de elétrons, foi realizado um estudo sistemático quanto às formulações das tintas, processos de deposição das mesmas, procedimentos de ativação e estudos de emissividade [3.3]. Os testes foram realizados em um dispositivo denominado testador de catodos, que é basicamente um diodo a vácuo. A figura 3.1 abaixo mostra uma fotografia da montagem do conjunto testador de catodos.

O testador de catodos é composto por uma câmara de vácuo, confeccionada em aço inox e constituída de seis portas, onde são instalados o catodo e o coletor de elétrons (anodo). Externamente ficam as fontes de alimentação do filamento e de polarização, o sensor de pressão e o sistema de vácuo. A figura 3.2 mostra um esquema das conexões elétricas, equipamentos e instrumentos de medidas do conjunto testador de catodos.

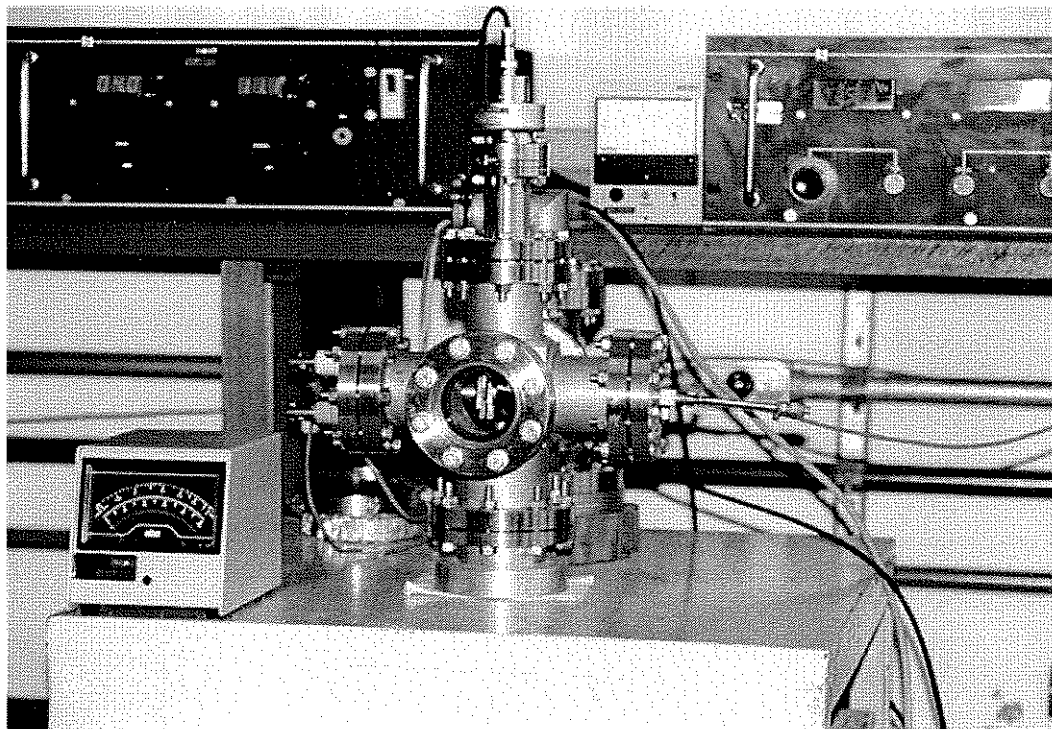


Figura 3.1 - Conjunto testador de catodos. No centro da figura tem-se a cruzeta de aço inox composta de 6 portas e ao fundo estão as fontes de filamento e polarização.

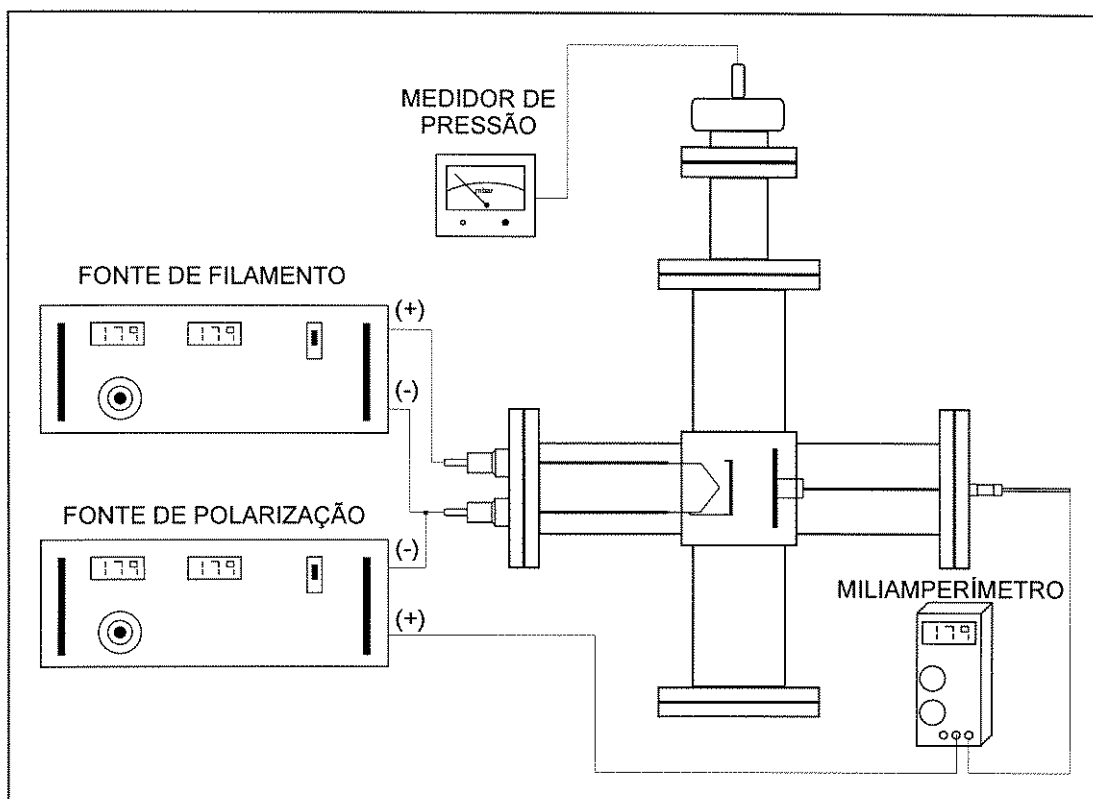


Figura 3.2 - Esquema das conexões elétricas e equipamentos do conjunto testador de catodos.

O anodo do diodo é constituído por uma chapa metálica de tântalo, com 30 mm de diâmetro e 0,3 mm de espessura, situada a aproximadamente 2,0 mm do catodo. Para evitar um superaquecimento do anodo, ele é refrigerado a ar, através da haste metálica que o suporta. O catodo é circundado por um anel metálico de molibdênio de 30 mm de diâmetro, para evitar que os elétrons retroespalhados pelo anodo (cuja área é muito maior que o catodo) se percam durante a emissão, indicando uma medida incorreta de corrente. Esse anel, com o mesmo diâmetro do anodo, produz um campo elétrico mais uniforme (é o mesmo campo de um capacitor de placas paralelas), fazendo com que diminua a possibilidade dos elétrons não serem coletados pelo anodo.

O filamento é alimentado por uma fonte DC de 0-30 V e corrente máxima de 20 A. A polarização catodo-anodo é feita por uma fonte DC de 0-3000 V e corrente máxima de 100 mA. A alimentação do filamento e a polarização do catodo são transmitidos ao interior da câmara por meio de passadores cerâmicos. O anodo também é alimentado por um passador cerâmico.

O vácuo é obtido por meio uma bomba turbomolecular de 240 l/s, e o pré-vácuo por meio de uma bomba mecânica de estágio simples de 4 m³/h. A pressão do sistema é

monitorada por medidor tipo Pirani, instalado na entrada da bomba mecânica e por um medidor tipo "Penning" (catodo frio), instalado na porta superior da câmara.

Os estudos de emissividade foram realizados com duas formulações de tintas, usando-se carbonatos triplos, cedidos por uma empresa nacional. Uma formulação foi obtida do IFUSP [3.4] e a outra foi baseada nos procedimentos da ASTM [3.5].

Pela análise das curvas de emissividade destas duas formulações, a que obteve um melhor rendimento foi a do IFUSP, que foi adotada para a pintura do catodo do canhão de elétrons. As curvas de emissividade e a formulação da tinta do IFUSP acham-se descritos na seção 4.3.

Os métodos de deposição das tintas estudados foram: sedimentação, spray, eletroforese e pintura por pincel. Nos estudos de emissividade foi adotado o método de pintura por pincel, devido às pequenas dimensões do catodo utilizado (2,0 mm de diâmetro). Para o catodo do canhão foi adotado o método de spray, usando-se um aerógrafo. Este método permite um controle melhor da pintura, quanto à densidade e uniformidade da camada aplicada.

Visando melhorar a qualidade dos carbonatos e em vista da dificuldade de adquiri-los, foram realizados também estudos para a obtenção dos carbonatos no próprio Instituto. Não existe no mercado nacional nenhum fornecedor desse material e a importação só é possível para grandes quantidades.

Os métodos estudados foram o de coprecipitação e de mistura mecânica. Diante da igualdade de resultados entre os dois métodos, optou-se pela mistura mecânica por ser de mais fácil preparação.

3.2. Sistema de vácuo do canhão

A câmara de vácuo do canhão possui quatro portas de diâmetro 70 mm, às quais foram soldados tubos de 160 mm de comprimento, com flanges padrão CF 63, dispostas de 90° entre si. O bombeamento na câmara é realizado por dois sistemas de bombas: um conectado lateralmente que é responsável pela etapa de pré-vácuo e o outro conectado à porta superior, que mantém o ultra-alto vácuo (ver figura 3.3). O sistema lateral é um conjunto de grande porte que serve também para o bombeamento de outras partes do acelerador que são o injetor e as estruturas aceleradoras.

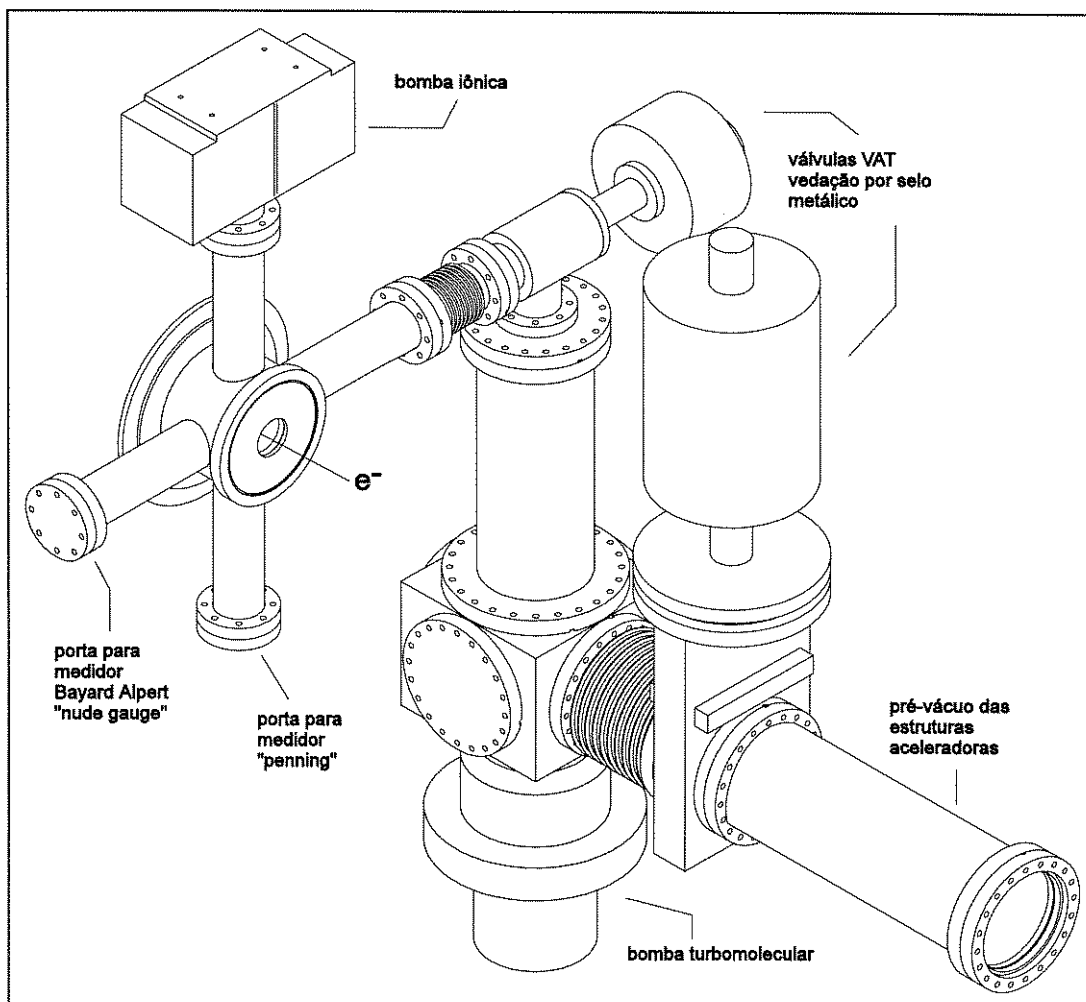


Figura 3.3 - Sistema de bombeamento de vácuo do canhão e estruturas aceleradoras.

O sistema lateral é uma coluna constituída por uma bomba turbomolecular Balzers de 1500 l/s (o pré-vácuo é feito por uma bomba mecânica Balzers rotativa, duplo estágio, com bombeamento de 43 m³/h), que está conectada a uma cruzeta de aço inox de seis portas. Esta bomba também é utilizada para fazer o pré-vácuo das estruturas aceleradoras. A cruzeta foi confeccionada no próprio Instituto, usinada a partir de um cubo maciço de aço inox. Ela possui duas portas CF 200 dispostas diametralmente e outras quatro portas CF 150. Na parte superior da cruzeta há um tubo de extensão em aço inox, de 150 mm de diâmetro. Nesse tubo é conectado uma válvula pneumática com flanges CF 63, tipo angular e vedação por selo metálico. A conexão da coluna com a câmara de vácuo é feita por meio de um fole metálico com flanges CF 63, evitando que a câmara receba as vibrações da bomba turbomolecular.

O sistema de bombeamento da porta superior, que mantém o ultra-alto vácuo, é constituído por uma bomba iônica Varian de 45 l/s. Essa bomba promove o

bombeamento da câmara do canhão, bem como uma parte do sistema injetor de feixe, que é instalado diretamente na saída do canhão.

Os cálculos preliminares de condutância, para a escolha adequada das bombas dos dois sistemas de vácuo, são apresentados no Apêndice.

No processo de ativação do catodo, a alta velocidade de bombeamento do sistema turbomolecular permite reduzir o tempo de ativação. Após a ativação, este sistema é separado do canhão, fechando-se a válvula 90° e ligando-se a bomba iônica. Este bombeamento é preferível por ser mais limpo e evita uma possível contaminação por óleo que uma bomba turbomolecular poderia liberar.

O monitoramento da pressão deste sistema é feito em três pontos. Um medidor tipo “penning” (catodo frio) instalado na cruzeta monitora a pressão na boca da bomba turbomolecular; outro medidor “penning” instalado na porta inferior da câmara, monitora o canhão. Um medidor tipo Bayard Alpert “nude gauge” instalado na porta lateral da câmara, também monitora a pressão do canhão para valores abaixo de 10^{-7} mbar [3.6].

3.3. Construção do flange do catodo

A primeira versão do flange do catodo do canhão de elétrons [3.7] que foi construído era bastante rudimentar e apresentava vários problemas: montagem mecânica trabalhosa; massa excessiva no suporte de catodo ocasionando problemas térmicos; conexões elétricas precárias; blindagem térmica deficiente; dificuldade de ajuste da distância catodo-grade causando imprecisão e freqüentes curtos-circuitos, que quase sempre ocasionavam a queima do filamento.

Portanto, no presente trabalho desenvolveu-se um novo flange de catodo para resolver esses problemas. O flange foi totalmente remodelado com relação ao sistema de fixação interna de eletrodos, suporte de catodo, grade, filamento, passadores de vácuo e blindagem térmica. A seguir, será descrito cada componente que forma o conjunto flange do catodo.

O filamento é confeccionado com fio, composto de tungstênio e tório, de 0,5 mm de diâmetro e pureza de 99,99%. Ele é conformado em uma matriz de aço 1020 temperado, formando uma espiral simples, com diâmetro final de 15,0 mm. Os terminais do filamento são espaçados de 7,5 mm, sendo um terminal central e outro situado no final da espira e ambos com comprimento de 10,0 mm. As espiras são

espaçadas de 1,5 mm. É utilizado um fio de comprimento igual a 200,0 mm para a confecção do filamento. A resistência do filamento é $0,39 \Omega$ a frio (temperatura ambiente) e $0,98 \Omega$ a uma temperatura de 980°C , que é a temperatura de trabalho do canhão de elétrons (figura 3.4).

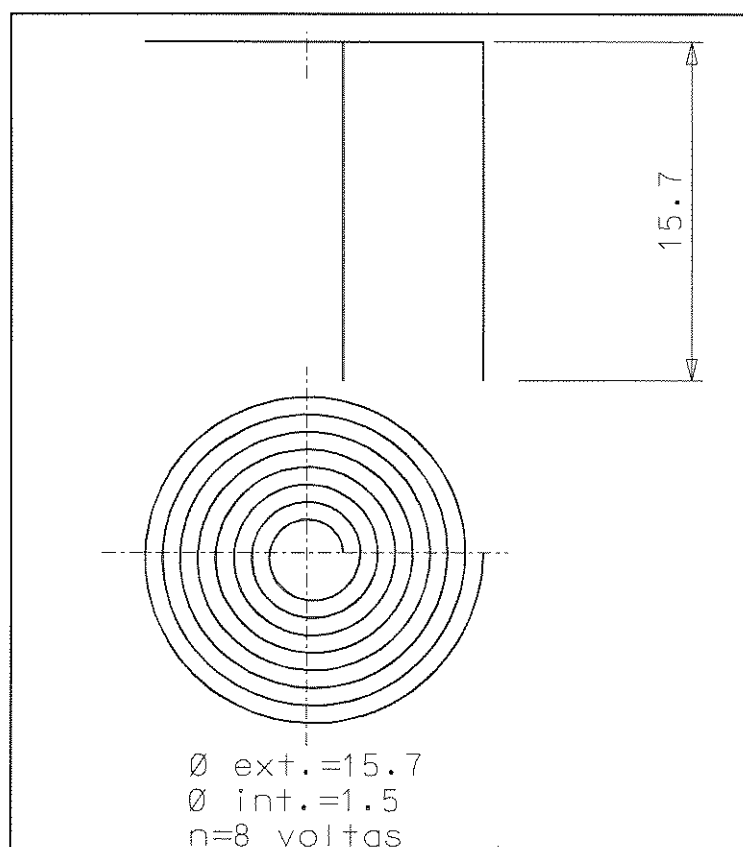


Figura 3.4 - Desenho mecânico do filamento (dimensões em mm).

Para a confecção da base metálica do catodo, onde é feita a deposição da tinta emissora, é utilizado níquel com pureza de 99,0% e espessura de 0,3 mm. O método de fabricação do catodo é o de conformação a frio, utilizando-se um molde de aço 1020. Primeiramente, é cortada uma placa circular de 35,0 mm de diâmetro, a qual é colocada dentro do molde e conformada até formar um ressalto cilíndrico de diâmetro adequado para o catodo. A altura do ressalto é definida em função da distância catodo-grade. A parte saliente possui um diâmetro de 20,0 mm, sendo de 15,0 mm o diâmetro da região que é pintada com a tinta emissora de elétrons. A região inferior possui três furos espaçados de 120° , que servem para fixá-lo ao flange (figura 3.5). Após a conformação do catodo, o mesmo é levado para um forno a vácuo onde permanece por 30 minutos a uma temperatura de 700°C , para alívio das tensões.

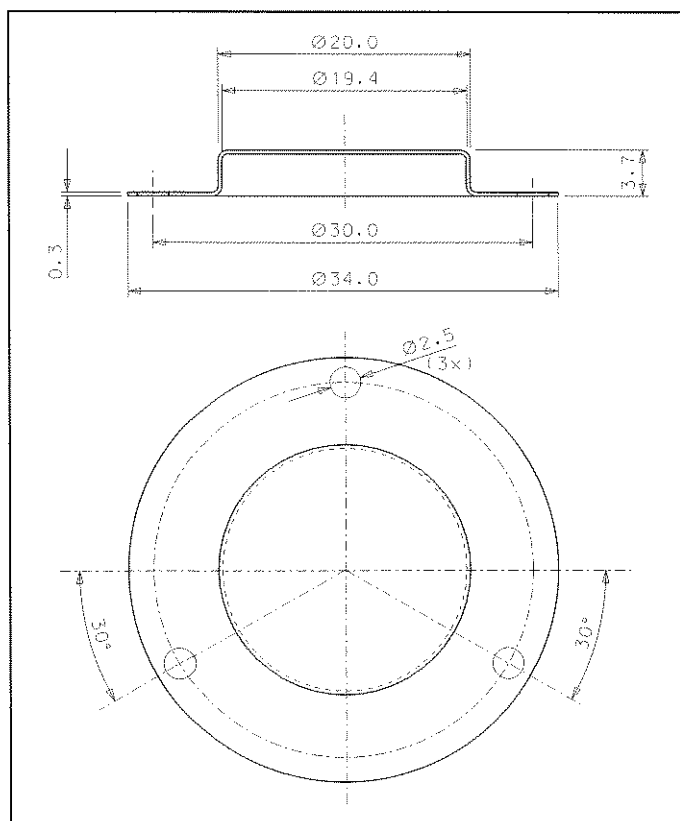


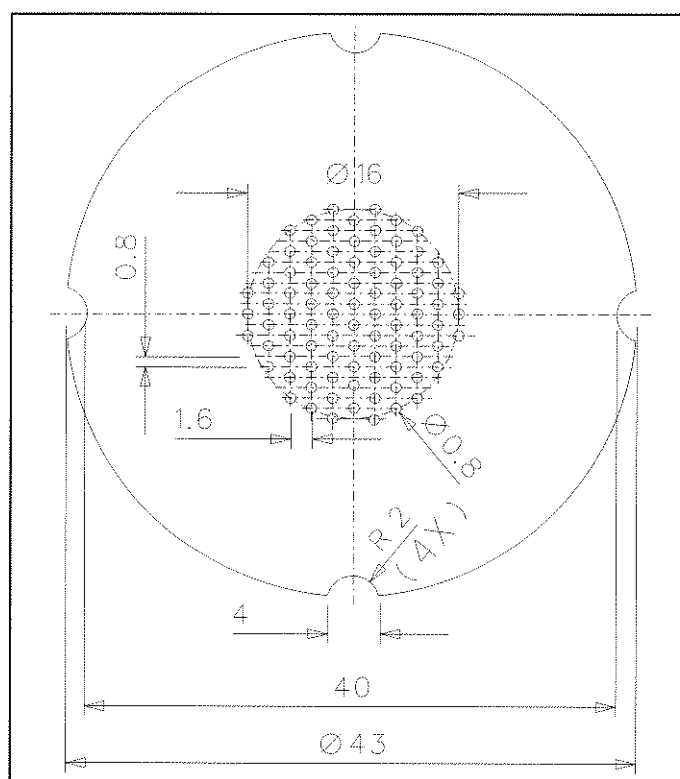
Figura 3.5 - Desenho mecânico do catodo de níquel (dimensões em mm).

A grade é confeccionada a partir de uma chapa circular de molibdênio (pureza de 99,0% para evitar que elementos nocivos possam contaminar o catodo, diminuindo a emissão de elétrons) de 43,0 mm de diâmetro e espessura de 0,3 mm. Os furos na grade são feitos por uma fresadora vertical, tipo CNC (programável). A furação ocupa um diâmetro de 16,0 mm, com furos de 0,8 mm e espaçamento de 0,088 mm (centro a centro). Após a furação, a grade passa por uma limpeza química (sabão neutro, tricloroetileno e acetona) para retirada de excesso de óleo. Depois de seca, é colocada entre duas placas planas de alumina e levada a um forno a vácuo em temperatura de 1200 °C por 30 minutos, para completar a limpeza, aliviar as tensões decorrente da furação e deixá-la perfeitamente plana [3.8]. A fixação ao flange é do tipo encaixe por pressão em quatro suportes de aço inox (figura 3.6).

Com estas dimensões de furação é garantido uma transparência geométrica, obtida por meio de cálculos de área, de aproximadamente 73%. A transparência dinâmica da grade, obtida quando o canhão está em operação, tem um valor inferior, devido a presença de campos elétricos e corrente de fundo.

A presença da grade de controle em um canhão de elétrons causa a interceptação de parte do feixe e influencia algumas das suas características. A inserção de uma grade

O tipo de grade que foi confeccionada para o canhão do IEAv, embora com transparência aquém da desejável, foi preferida em razão de sua robustez à deformação por temperatura e faiscamentos constantes, durante a fase de caracterização do canhão.



O desenho mecânico do flange completo é mostrado na figura 3.7. Circundando os quatro suportes da grade, foi colocado uma blindagem cilíndrica de molibdênio, com a finalidade de evitar a dispersão de calor. Com isso, pode-se colocar uma potência menor no filamento aumentando a sua vida útil e, também, a da fonte de filamento, que trabalha menos sobrecarregada.

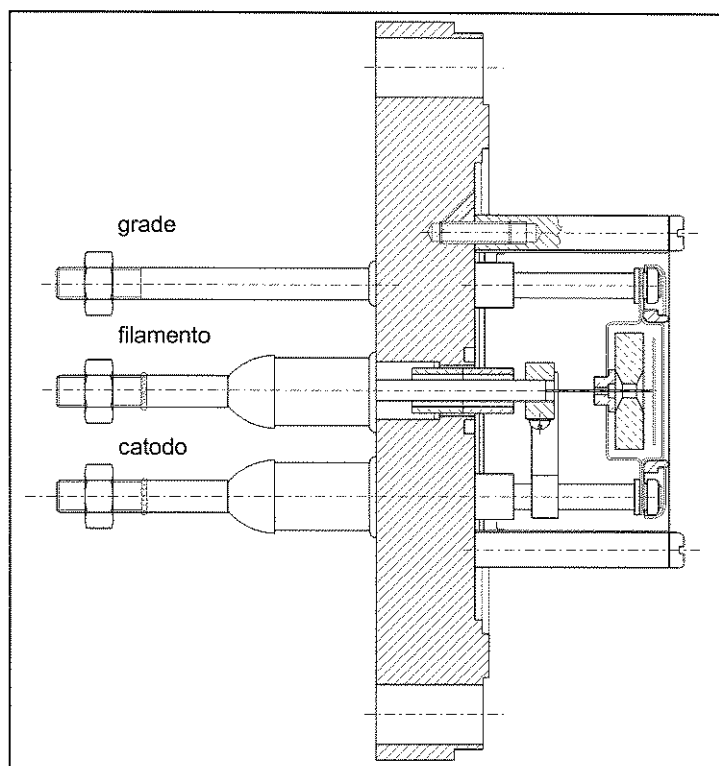


Figura 3.7 - Desenho mecânico do flange do catodo.

A figura 3.8 mostra um desenho ilustrativo do flange do catodo, em vista explodida, com os vários elementos que o compõe.

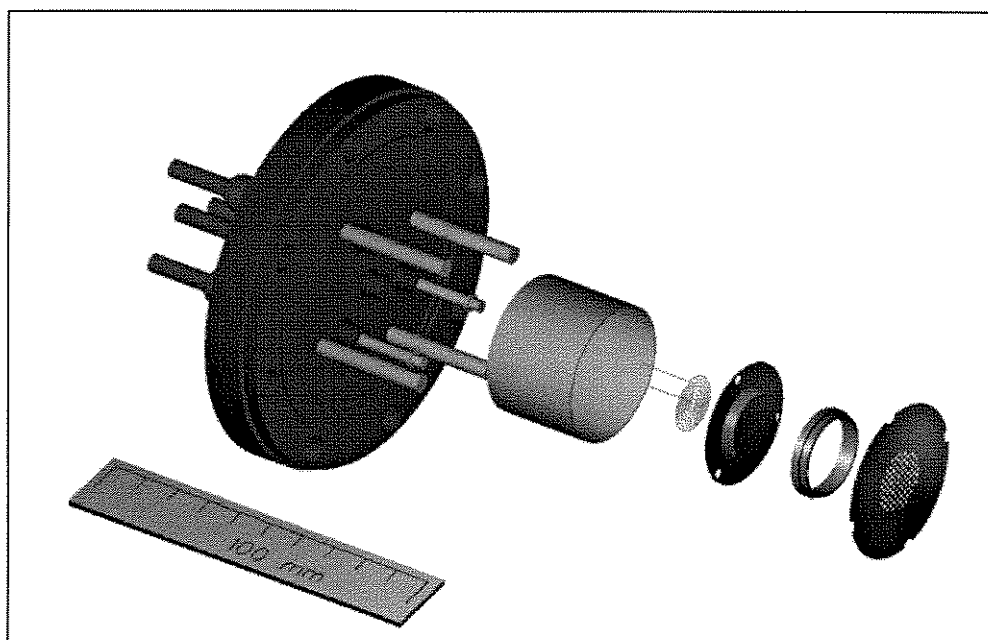


Figura 3.8 - Vista explodida do flange do catodo. Da esquerda para a direita, tem os seguintes elementos: flange de aço inox, blindagem térmica, filamento, catodo de níquel, isolante elétrico cerâmico e grade.

A figura 3.9 mostra uma foto do conjunto montado, onde o flange do catodo fica inserido dentro do tubo de aço inox que fixa o eletrodo de focalização (B).

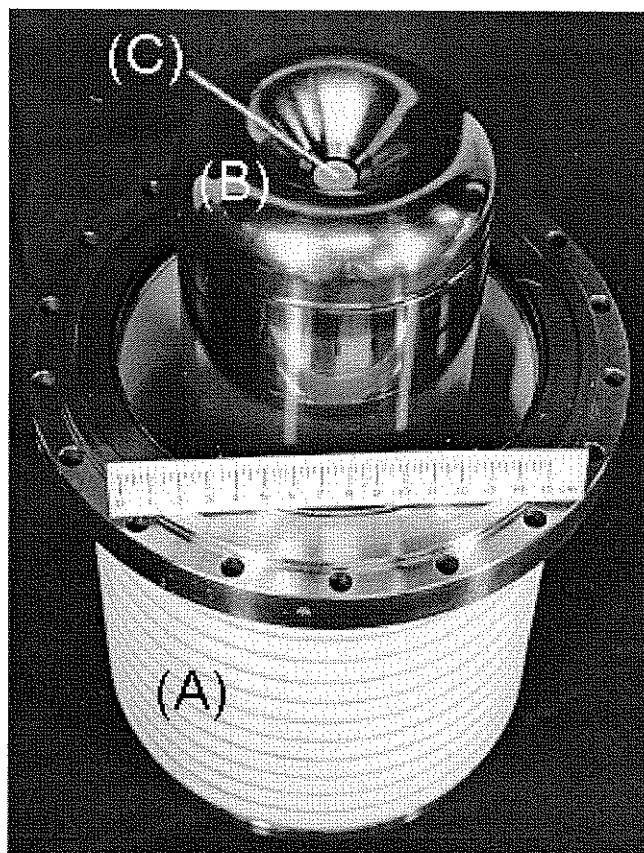


Figura 3.9 - Foto da montagem do canhão, com os componentes que são submetidos ao potencial de 100 kV. (A) cerâmica corrugada, (B) eletrodo de focalização e (C) grade e catodo com a tinta emissora (superfície branca).

3.4. Eletrônica associada ao canhão

A operação do canhão de elétrons requer um sistema eletro-eletrônico constituído por uma fonte de filamento, uma fonte de polarização de grade, um circuito eletrônico para pulsar o catodo e uma fonte de alta tensão para acelerar os elétrons. As fontes de filamento, de polarização de grade e do amplificador de resposta rápida foram projetadas e construídas no próprio Instituto. A fonte de alta tensão, devido a complexidade com respeito a isolação elétrica, foi adquirida de uma empresa brasileira.

A fonte de alta tensão foi construída para fornecer tensão contínua, variável entre 0 e 100 kV, e corrente máxima de 100 mA para a polarização do anodo. A retificação em sistema trifásico e um filtro indutivo-capacitivo garantem uma ondulação máxima de 1%. A alta tensão do secundário pode ser ajustada entre 0 e 100 kV, por meio de um

variador de tensão acoplado à entrada do primário. A fonte é comandada remotamente por um módulo de controle, cuja conexão é feita por meio de um cabo multifilar. Nesse módulo encontram-se o variador manual de tensão, medidores de tensão e corrente e sistemas de proteção. Essa fonte foi construída por uma empresa nacional, com base nos dados de projeto fornecidos.

Os dispositivos eletrônicos (fontes e equipamentos de medida), que estão no mesmo potencial do catodo, são alimentados por um transformador de isolamento com potência de 5 kVA e relação 1:1. O primário é alimentado com 220 VAC e o elemento isolante é óleo mineral com capacidade de isolamento de 40 kV/mm.

A alimentação do filamento é realizada por meio de uma fonte que mantém fixa uma corrente pré-estabelecida, mesmo que a resistência da carga varie (neste caso é a resistência do filamento que varia devido a seu aquecimento). A fonte é capaz de fornecer uma corrente máxima de 15 A e tensão contínua, variável entre 0 e 20 V. A retificação é feita por um filtro capacitivo, garantindo uma ondulação menor que 1%. O ajuste de tensão é realizado manualmente no painel da fonte e a tensão e corrente são monitoradas por mostradores digitais. Por ser manual, a tensão de trabalho do filamento é ajustada antes de se ligar a alta tensão.

A fonte de polarização de grade pode fornecer uma tensão contínua, variável entre 0 e -500 V, e corrente máxima de 1 A. O sistema de retificação permite obter uma regulação da ordem de 1%. A fonte é ligada entre os terminais do catodo e da grade, sendo esta polarizada negativamente em relação ao catodo. Nos terminais da fonte é conectado um capacitor com o objetivo de desviar os pulsos de retorno do amplificador de resposta rápida (ARR).

A fonte de alimentação do amplificador de resposta rápida foi projetada para fornecer 1500 V de tensão contínua. Essa fonte é variável de 0 a 1500 V e possui um baixo fator de ondulação (menor que 1%) para evitar flutuações na amplitude do pulso.

O circuito pulsador ou ARR é um circuito de descarga que fornece pulsos ao catodo, a fim de produzir um feixe de elétrons pulsado, cujo princípio básico de operação consiste no chaveamento de uma rede formadora de pulsos (PFN) a partir de um pulso de disparo externo. O disparo externo é um pulso positivo, proveniente de um pulsador central da sala de controle do acelerador, que é transmitido, via fibra óptica, até o canhão distante 40 metros. A PFN, formada por um cabo coaxial, é responsável pela formação do pulso por meio de sua descarga, bem como definir a impedância de saída do ARR [3.9].

É desejável que o pulso de elétrons possua uma forma de onda retangular com amplitude constante e tempos de subida e descida os mais estreitos possíveis. Um feixe com essas características é mais adequado às estruturas aceleradoras. Para a obtenção de um pulso retangular ideal é necessário um sistema de chaveamento ideal (tempo de chaveamento praticamente nulo) e uma linha de retardo sem perdas.

No chaveamento de pulso estreitos geralmente são utilizados cabos coaxiais de baixa perda, onde a largura do pulso gerado é proporcional ao comprimento do cabo e pode ser obtida calculando-se o tempo de propagação do sinal por meio das fórmulas:

$$T = \frac{L}{v_p}, \quad (3.1)$$

com:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.2)$$

onde:

v_p é a velocidade do sinal no cabo,

c é a velocidade da luz,

L o comprimento do cabo coaxial e

ϵ_r a constante dielétrica relativa do isolamento do cabo.

Como a PFN é um cabo coaxial com terminação aberta, o tempo de propagação do sinal será T para uma velocidade relativa v_p , mas a largura do pulso obtido será dada por $2T$, pois o sinal é totalmente refletido e percorre duas vezes a extensão do cabo.

No circuito pulsador utilizado no canhão de elétrons, a PFN foi feita com um cabo coaxial RG 58-U de impedância 50Ω e constante dielétrica ϵ_r de 2,30. O tempo de propagação do sinal, por metro, para este cabo é:

$$T = 5,05 \times 10^{-9} \text{ s.}$$

Como a largura do pulso é $2T$, o sinal sofre um atraso de 10,1 ns por metro de cabo. Para as medidas de caracterização do canhão a largura de pulso foi fixada em 200 ns e, portanto, foi necessário 19,8 m de cabo coaxial RG 58-U para a confecção da PFN.

O circuito de chaveamento da PFN foi montado com dispositivos semicondutores, utilizando-se o transistor de junção bipolar (BJT - "bipolar junction transistor"). Esse transistor, por ser um dispositivo que possui uma junção pn , está sujeito ao efeito de avalanche quando é excedida a máxima tensão de ruptura da junção coletor-base ("breakdown"), para o emissor em aberto. Para se ter esse efeito, a junção é polarizada reversamente. O BJT trabalhando nessa região de operação, pode ser usado para comutação rápida de alta tensão. As vantagens desses transistores são o baixo custo, a facilidade de aquisição e robustez a transitórios.

A principal desvantagem do BJT é o valor reduzido da tensão de ruptura coletor-base, da ordem de algumas centenas de volts, encontrado nos modelos comerciais. Para uma comutação de alta tensão na faixa de mil volts, é necessário usar um método de empilhamento, onde a alta tensão é distribuída entre os n transistores colocados em série (figura 3.10), sendo que cada um fica submetido a uma tensão de ruptura que é a tensão a ser chaveada dividida por n . Nesse caso, os transistores usados no circuito devem possuir características elétricas idênticas ou semelhantes, para que todos transistores conduzam ao mesmo tempo.

A rede formadora de pulsos é chaveada através de cinco transistores de junção bipolar do tipo 2N3055, usando os princípios de efeito avalanche. O efeito de avalanche consiste na polarização dos transistores próximo à região de "breakdown". Quando um dos transistores é levado à condução, por um pulso de disparo externo, a tensão que estava aplicada sobre os cinco transistores, agora se distribui sobre os quatro transistores restantes. Nessa condição, a tensão aplicada sobre cada um dos transistores é superior à sua tensão de "breakdown", provocando a condução intensa, até que a tensão existente na rede formadora de pulsos seja insuficiente para manter a condução e leve todos eles novamente ao corte.

O transistor 2N3055 foi escolhido para a confecção do circuito pulsador por ser facilmente encontrado no comércio e ser bem resistente aos constantes faiscamentos do canhão, durante a etapa de caracterização. Contudo foi observado que os modelos comerciais possuem uma grande dispersão de valores com relação à tensão de ruptura. Ao se adquirir um lote, é necessário testar individualmente cada transistor quanto à tensão de ruptura e ao tempo de chaveamento e classificar os transistores que apresentem essas características semelhantes, para facilitar o processo de substituição quando ocorrer a queima de algum deles.

A impedância nominal de saída do ARR é $50\ \Omega$, definida pelo cabo coaxial RG58-U empregado como rede formadora de pulsos. Para promover o casamento de impedância entre o ARR e o canhão de elétrons e transformar o pulso positivo em pulso negativo, o estágio de saída do ARR possui um transformador inversor de pulsos. Desta forma, a impedância real de saída do ARR é igual ao produto do quadrado da relação de transformação pela impedância nominal do ARR. A figura 3.10 mostra toda a eletrônica anexa ao canhão, com desenhos ilustrativos das fontes e diagrama elétrico do circuito pulsador [3.10].

Na figura 3.11 é mostrado o conjunto do canhão de elétrons, onde o módulo do circuito pulsador está destacado de suas conexões para melhor visualização. Este circuito fica alojado dentro de um tubo cilíndrico que sustenta o flange do catodo e é isolado eletricamente pelo tubo de cerâmica. O outro lado do tubo está conectado à câmara do canhão e todo o sistema é mantido em vácuo.

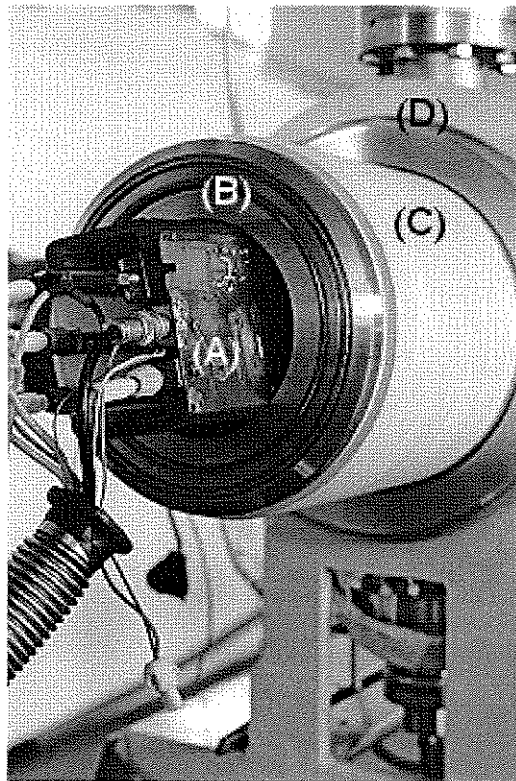


Figura 3.11 - Conjunto canhão de elétrons e circuito pulsador. (A) módulo do amplificador de resposta rápida; (B) parte posterior do canhão cuja reentrância metálica fica submetido ao potencial de grade, que está acima do potencial acelerador de -100 kV ; (C) cerâmica corrugada que isola o conjunto do catodo em -100 kV do anodo em 0 kV ; (D) parte anterior do canhão (anodo) que está no potencial de 0 kV , assim como o resto do sistema adiante.

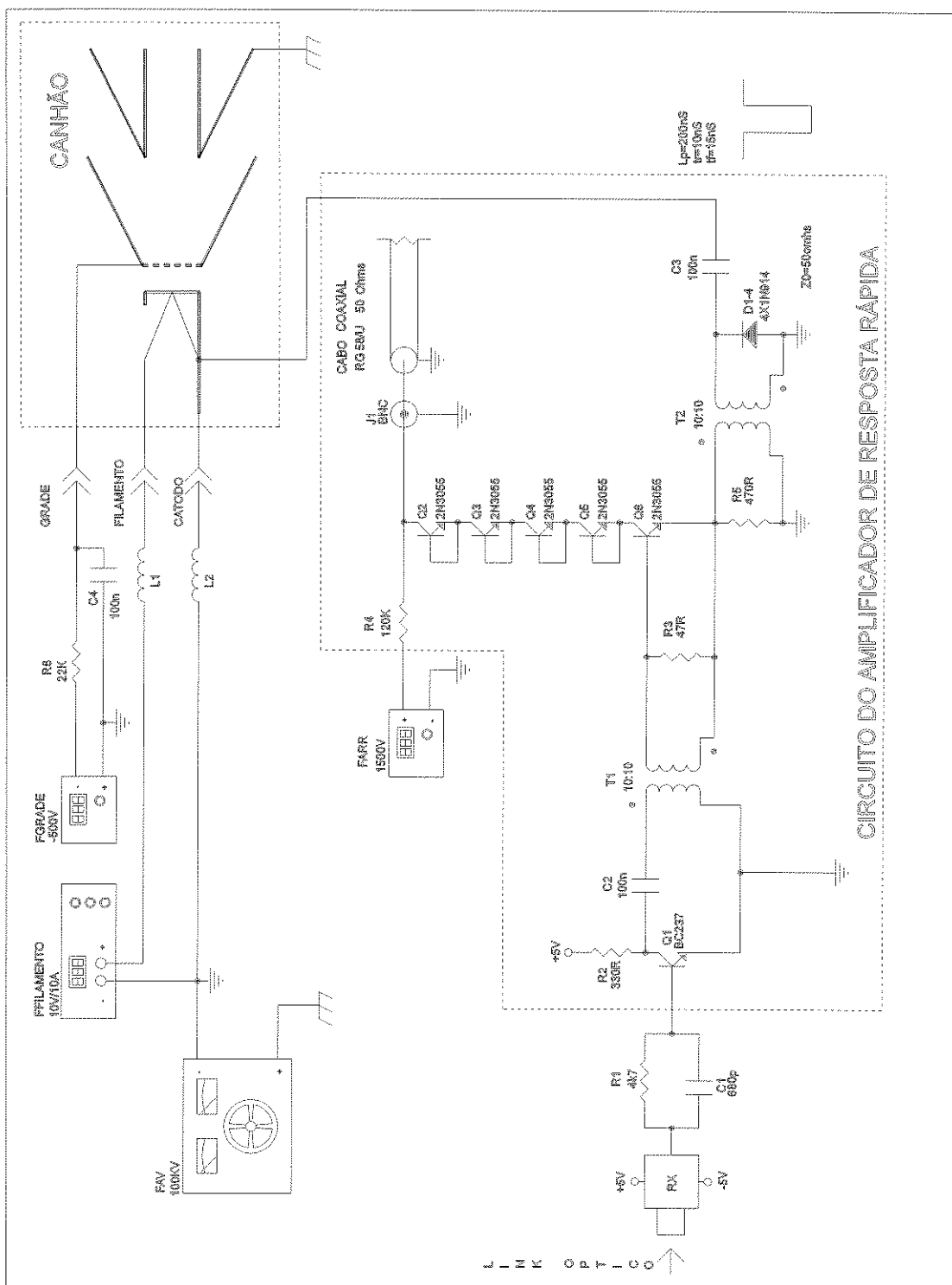


Figura 3.10 - Eletrônica associada ao canhão. Na figura é mostrado as fontes de alimentação e o diagrama elétrico do amplificador de resposta rápida.

No chaveamento do canhão foi adotado o sistema de pulsos no catodo, ao invés de pulsos na grade que é usual em válvulas triodo, para simplificar as conexões elétricas. Nesse caso a grade é permanentemente polarizada com uma tensão negativa e o circuito pulsador é responsável por diminuir o potencial do catodo, em relação a grade, para que o feixe de elétrons possa ser extraído. Esse procedimento também é uma segurança adicional para evitar que um possível feixe contínuo saia do canhão e danifique outros componentes do acelerador. No circuito pulsador o transformador de pulso, colocado na saída do mesmo, provê a polarização necessária do pulso entregue ao catodo.

CAPÍTULO 4

MEDIDAS DE CARACTERIZAÇÃO

As medidas de caracterização de um canhão de elétrons visam obter os parâmetros de operação, respeitando os limites especificados no projeto. Este capítulo descreve o aparato experimental utilizado no processo de caracterização, os tipos de medidas que foram realizadas, os dados obtidos e a análise dos mesmos procurando discutir aspectos que possam melhorar o desempenho do canhão.

4.1. Aparato experimental

4.1.1. Dispositivos e equipamentos utilizados nas medidas

Em todas as medidas de corrente realizadas utilizou-se o método destrutivo, no qual o feixe de elétrons é interceptado por um anteparo.

O anteparo utilizado foi um coletor de elétrons, também chamado copo de Faraday. Ele foi confeccionado na oficina do Instituto, possui um formato cônico oco e o material usado foi duralumínio (também chamado de dural, é uma liga de alumínio possuindo maior resistência mecânica e melhor usinagem). O formato e o tipo de material foram escolhidos de forma a minimizar os efeitos de emissão de elétrons secundários ou retroespalhados, que são produzidos em decorrência da colisão do feixe de elétrons com um anteparo. O desenho ilustrativo do copo de Faraday é mostrado na figura 4.1.

Os equipamentos de medidas utilizados na caracterização estão relacionados na Tabela 4.1 e os acessórios na Tabela 4.2. Todos os itens descritos nas tabelas são modelos comerciais.

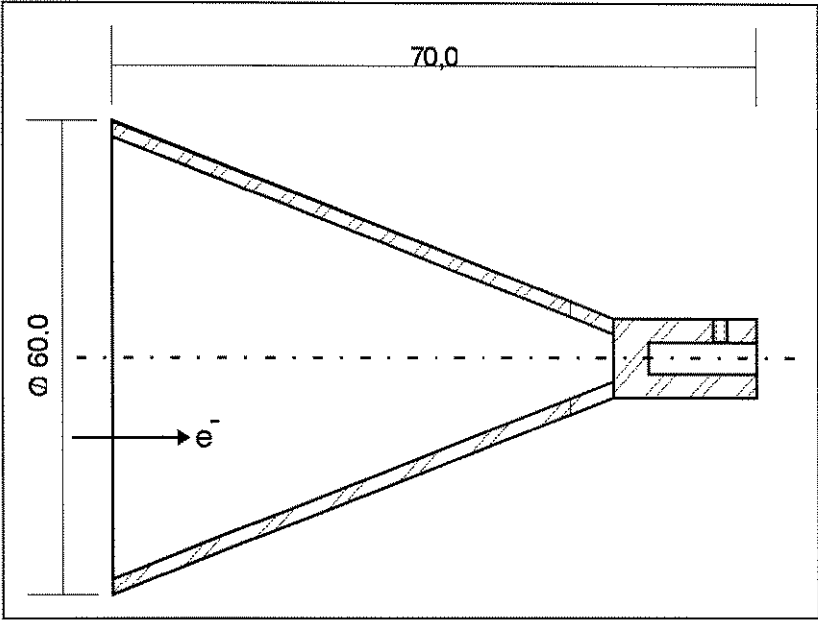


Figura 4.1 - Desenho do coletor de elétrons (copo de Faraday), utilizado para obter a corrente de feixe do canhão de elétrons do IEAv. Material do copo: duralumínio. Dimensões em mm.

Tabela 4.1 - Relação dos equipamentos de medidas utilizados no aparato experimental da caracterização do canhão de elétrons.

Equipamento	Marca	Modelo	Uso
Osciloscópio digital	Tektronix	2430A	utilizado em todas as medidas de corrente de feixe pulsada, tensão de pulso no catodo e corrente de grade
Multímetro digital	Fluke	8024B	utilizado para medidas de corrente de emissão do diodo catodo grade e medidas da corrente de corte da grade

Tabela 4.2 - Relação dos acessórios de medidas utilizados na caracterização do canhão.

Acessório	Marca	Modelo	Sensib.	Uso
Ponta de corrente	Tektronix	P6021		utilizada como sensor nas medidas de corrente de grade
Terminação para ponta de corrente P6021	Tektronix		2 mA/mV e 10 mA/mV	
Ponta de tensão	Tektronix	P6009	x100 (capacitância 2,5 pF)	utilizada como sensor nas medidas de tensão de pulso de catodo
Medidor toroidal	Pearson Electronics, Inc.	5257	2,331 A/V para cabo coaxial de 50 Ω	utilizada nas medidas de corrente de feixe pulsada

4.1.2. Montagens utilizadas na caracterização

As figuras 4.2 e 4.3 mostram desenhos onde são indicados os tipos de montagem e equipamentos utilizados para aquisição dos dados de corrente. A figura 4.2 indica a medida de corrente contínua, por meio de um multímetro, para a construção das curvas da tensão de corte da grade. Na figura 4.3 são mostrados os pontos de medidas para a tensão de pulso no catodo e a corrente de grade, realizados nas conexões de entrada do canhão. Como estes pontos estão fluando em um potencial de 100 kV, o osciloscópio deve ser isolado também, conforme pode ser visto na figura 4.4, onde o osciloscópio é fixado acima das fontes de alimentação. Outro ponto de medida é o da corrente de feixe, cujo sinal recebido pelo osciloscópio é obtido por meio de um medidor de corrente tipo toroidal.

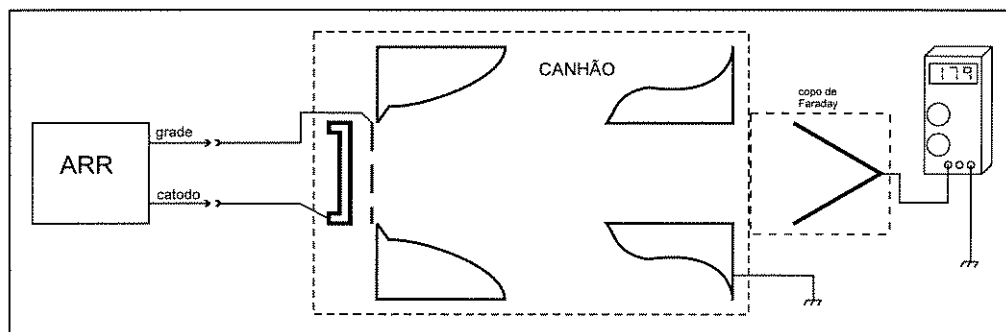


Figura 4.2 - Esquema do canhão de elétrons mostrando a conexão elétrica para a medida de corrente de corte da grade, utilizando-se um multímetro, na função de miliamperímetro.

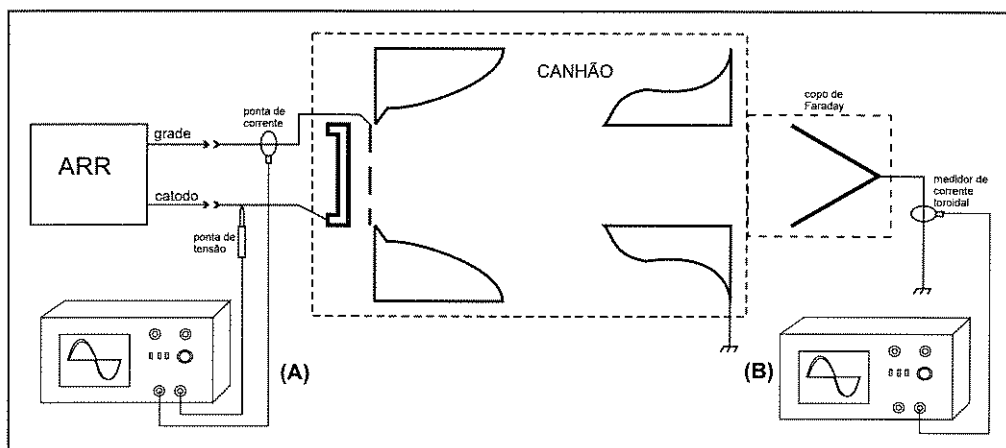


Figura 4.3 - Esquema do canhão de elétrons, mostrando os pontos de medição para a caracterização. O osciloscópio (A) recebe as medidas da tensão do circuito pulsador no catodo e a corrente de grade. O osciloscópio (B) coleta as medidas da corrente de feixe.

4.1.3. Montagem experimental

Nas figuras 4.4 e 4.5 são mostradas as montagens do canhão de elétrons e equipamentos eletrônicos localizados no prédio do acelerador.

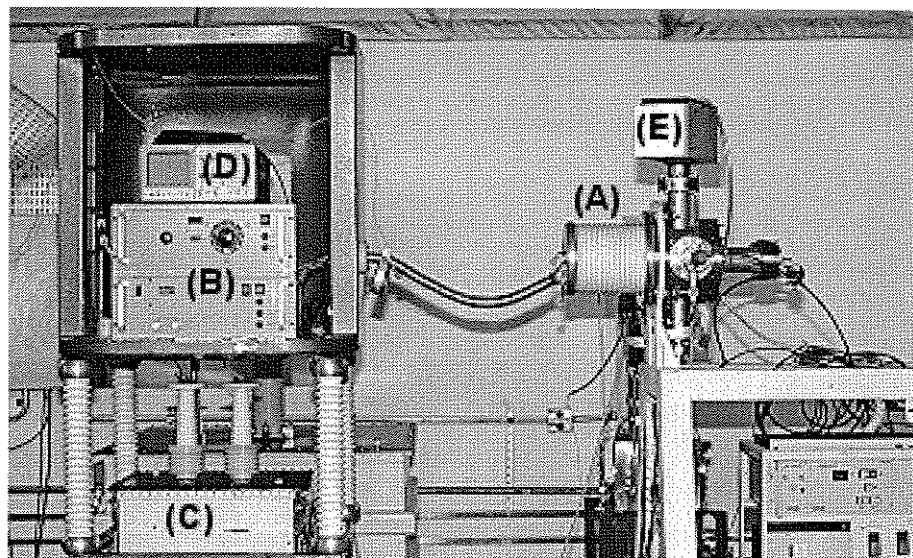


Figura 4.4 - Arranjo experimental do canhão de elétrons. (A) canhão de elétrons; (B) fontes de alimentação; (C) transformador de para alimentar as fontes, com isolação de 100 kV; (D) osciloscópio; (E) bomba de vácuo tipo iônica.

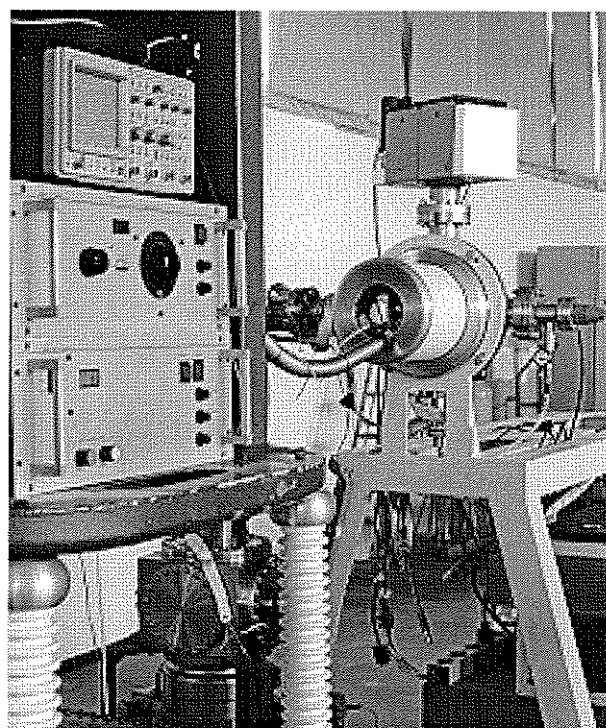


Figura 4.5 - Outra vista do arranjo experimental do canhão de elétrons.

A figura 4.6 mostra uma ampliação da saída do canhão onde é visto a tubulação do copo de Faraday e o medidor de corrente toroidal.

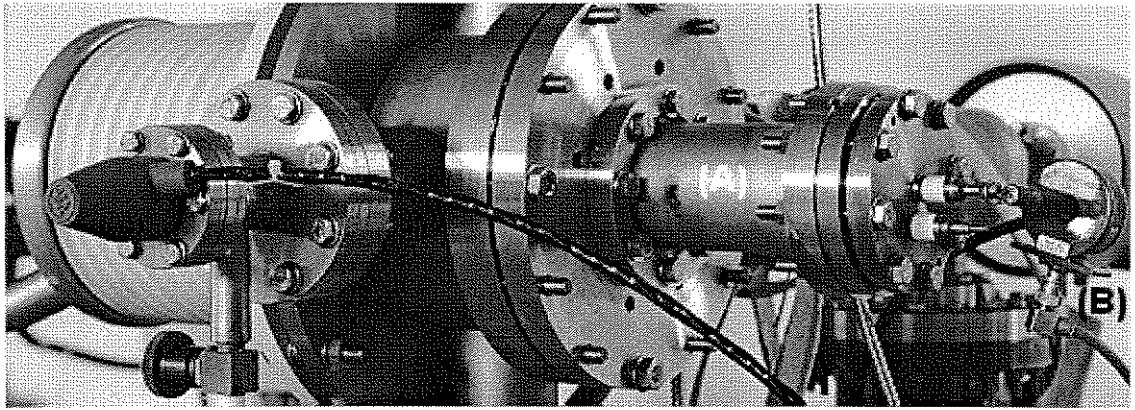


Figura 4.6 - Vista detalhada da parte posterior do canhão de elétrons. (A) tubulação onde está inserido o copo de Faraday; (B) Medidor de corrente tipo toroidal.

4.2. Delineamento das medidas de caracterização

A caracterização do canhão pode ser separada em três etapas. A primeira etapa consiste em procedimentos de pré operação realizados após uma abertura do canhão e conseqüentemente uma nova pintura do catodo, seja com uma tinta feita recentemente ou com uma que já estava em agitação há algum tempo. A segunda etapa consiste em procedimentos de rotina que visam preparar o canhão para o funcionamento de modo a deixá-lo operacional para as medidas de caracterização. A terceira etapa são as medidas de caracterização propriamente dita.

Após o fechamento do canhão é inicializado o bombeamento da câmara, a fim de deixá-la com uma pressão suficientemente pequena e iniciar o processo de ativação do catodo, ou seja, transformar os óxidos em elementos livres para que possam emitir elétrons quando forem aquecidos pelo filamento. Com isto obtém-se a curva de ativação do catodo que mostra a variação da pressão dentro da câmara como função do tempo e da potência (ou corrente) de filamento. O monitoramento é importante para evitar a contaminação dos elementos da câmara com os gases expelidos pelo catodo, pelo aumento excessivo da pressão.

Ao final do processo de ativação do catodo, o filamento é desligado, para que o sistema possa atingir a pressão final (aproximadamente $4,0 \times 10^{-8}$ mbar). Com o sistema estabilizado, o filamento é novamente ligado e variando-se a corrente de filamento, obtém-se a curva de emissividade do catodo. Posteriormente, variando-se a tensão de

polarização, para um valor fixo da corrente de filamento, é obtido outro tipo de curva de emissão do diodo entre catodo e grade. Esse procedimento é importante pois com isto é feita uma análise prévia das condições do catodo quanto a qualidade do processo de pintura e possíveis curtos-circuitos entre catodo e grade, decorrentes da montagem mecânica ou do aquecimento térmico.

Estando a emissão do diodo catodo-grade satisfatória, o filamento é desligado e procede-se ao condicionamento de alta tensão, onde o interior do canhão e a parte externa ficam submetidas a uma diferença de potencial de 120 kV para verificação de possíveis pontos de fuga de tensão e limpeza de pequenos pontos de sujeira, via descarga, no interior do canhão. Esse procedimento visa reduzir os faiscamentos quando o canhão está operando com todos os equipamentos ligados. Os faiscamentos podem causar a queima de componentes e equipamentos eletrônicos (acoplador óptico, circuito pulsador, fontes, etc) ou danificar partes do flange do catodo (filamento, grade, catodo).

Os procedimentos acima são efetuados apenas quando o canhão é aberto para uma nova pintura. Antes do início das etapas de caracterização, são realizados os procedimentos de rotina que consistem em ligar o filamento durante algumas horas, para que o sistema se estabilize termicamente, e realizar as medidas da tensão do pulso do ARR e da corrente grade, sem aplicar alta tensão, para avaliar as formas dos pulsos e as amplitudes.

Na etapa de caracterização propriamente dita, são coletados vários dados para a construção de curvas de tensão de corte da grade, de emissão e emitância. Dessas curvas obtém-se os parâmetros do canhão que permitem ajustá-lo para trabalhar no seu melhor ponto de operação. Fazendo analogia com as válvulas eletrônicas, o objetivo é obter o ponto quiescente de operação do canhão.

Como o objetivo é avaliar o desempenho do canhão de elétrons, a aquisição de dados do feixe é coletada imediatamente na saída do canhão. As medidas podem ser obtidas por métodos não destrutivos ou destrutivos do feixe. Para realizar essas caracterizações optou-se pelo método destrutivo por ter uma melhor precisão, sem influência de outros elementos (como lentes magnéticas, desviadores de feixe) e por permitir uma montagem mais simples.

Em todas as medidas foi utilizado um copo coletor de elétrons, também chamado copo de Faraday, confeccionado em duralumínio (conforme já especificado na seção 4.1.1), como anteparo do feixe de elétrons. O copo de Faraday é isolado da tubulação por meio de um anel cerâmico e fixado a um flange possuindo um passador cerâmico,

no qual é feito uma ligação elétrica com o terra da fonte de alta tensão, fechando desta forma o circuito elétrico. As medidas da corrente de feixe pulsada são realizadas de forma indireta por meio de um medidor tipo toroidal, colocado ao redor do cabo de conexão do terra da fonte de alta tensão. O sinal do toróide é enviado para um osciloscópio que fornece a forma do pulso, sua amplitude e sua largura.

As medidas para a construção da família de curvas da tensão de corte da grade são realizadas com a corrente contínua (sem pulso), extraída somente por meio do potencial acelerador do anodo, a qual é coletada pelo copo de Faraday. O circuito deste é aberto e intercala-se um miliamperímetro digital, que mede a corrente contínua média do feixe de elétrons.

A fim de se ter confiabilidade nas medidas e poder avaliar a faixa de variação das medidas realizadas, são utilizados dois tipos de testes de reprodutibilidade. O teste de reprodutibilidade de operação do sistema é realizado obtendo-se curvas de emissão em diferentes dias e após interrupções de funcionamento do canhão. A reprodutibilidade da emissividade é avaliada, realizando-se pinturas do catodo em várias aberturas do canhão, sem modificação na formulação da tinta ou procedimentos de pintura.

Todas medidas foram realizadas para um mesmo valor da distância catodo-grade. Esta distância inicial foi escolhida após estudos teóricos, visando obter o aproveitamento máximo da tensão efetiva aplicada à grade [4.1]. De acordo com os cálculos, levando-se em conta o diâmetro dos furos e o espaçamento entre eles, a distância catodo-grade estimada foi 0,7 mm.

4.3. Resultados experimentais

Uma etapa anterior à caracterização do canhão foi a caracterização e padronização do processo de fabricação e pintura para a tinta emissora, conforme já comentado na seção 3.1, usando-se o testador de catodos como dispositivo para estes testes.

Para a construção das curvas comparativas de emissividade foi obtido uma curva padrão utilizando-se um catodo comercial. Na avaliação da emissão das formulações, usou-se a mesma base metálica, removendo-se somente a camada emissora e depositando-se uma nova camada. A remoção da camada emissora foi efetuada de maneira criteriosa, com remoção mecânica e posterior limpeza química, para evitar que resíduos de tinta anterior interferissem na curva da emissividade da outra tinta em teste.

De acordo com a análise dos testes realizados, como pode ser observado no gráfico da figura 4.7, ficou definida a melhor formulação para a tinta que passou a ser usada na pintura do catodo do canhão de elétrons. Sua formulação é descrita a seguir (quantidade para um litro de suspensão):

carbonatos (Ba, Sr e Ca)	432 g
acetato de butila	59 ml
oxalato dietila	61 ml
álcool etílico anidro	264 ml
“binder” (ligante)	428 ml

composição do binder (ligante):

nitrocelulose 60-80 s	29,6 g
acetato de butila	863 ml

O processo de fabricação da tinta é desenvolvido de maneira a evitar contaminações por agentes do ar ou de outros produtos químicos, que podem influenciar negativamente na emissividade da tinta. Os solventes orgânicos são adquiridos com a especificação PA (para análise) por possuírem um grau maior de pureza. Para evitar contaminação pela umidade do ar, os carbonatos são secados previamente em uma estufa a 110 °C por um período de 12 horas e resfriados em um dessecador, antes de serem pesados. Após a mistura dos componentes, a tinta é colocada em um vidro lacrado e levada a um moinho de bolas onde fica girando durante 72 horas para ser moída e homogeneizada. O moinho de bolas é um equipamento que consiste de dois cilindros paralelos rotativos e emborrachados, girando no mesmo sentido e impulsionados por um motor elétrico. Sobre os cilindros é colocado um frasco lacrado, dentro do qual fica a substância que se quer agitar. Para melhorar o processo de moagem e homogeneização da tinta é colocado dentro do frasco, junto com a tinta, esferas de alumina de vários diâmetros que aceleram o processo.

Para evitar a sedimentação, a tinta é mantida sob constante agitação. O frasco lacrado permanece girando no moinho de bolas. As esferas de alumina são removidas nesta fase, pois o constante atrito delas com a parede do frasco pode desprender partículas, contaminando a tinta.

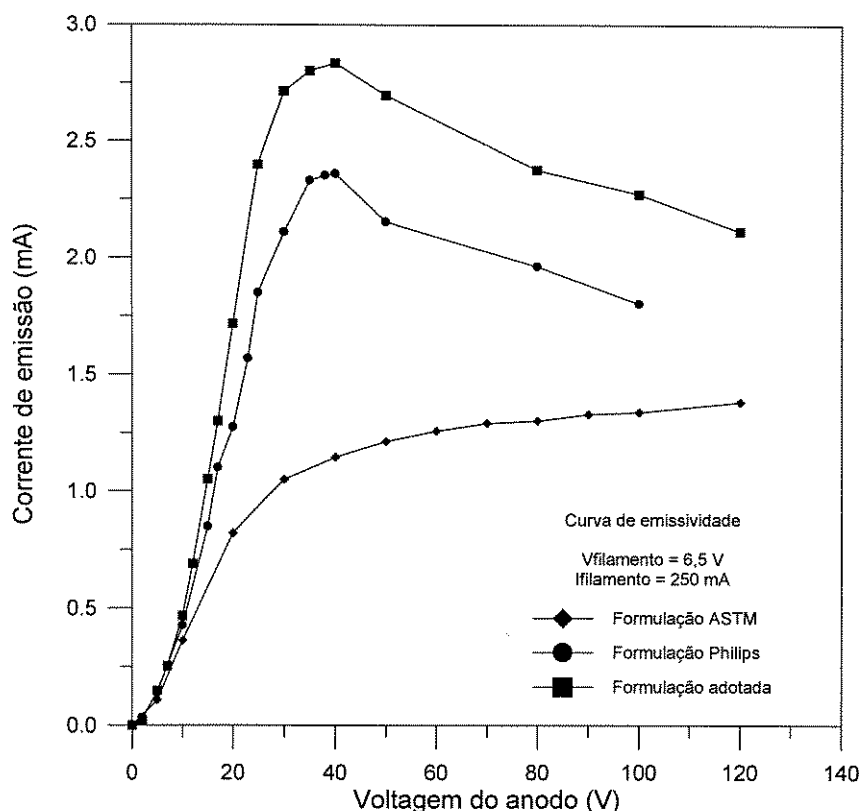


Figura 4.7 - Gráfico de emissão para várias formulações de tinta.

No processo de caracterização do canhão, várias curvas foram construídas e, por intermédio de seus perfis e valores, foram analisados alguns parâmetros relevantes a um processo de caracterização.

A primeira curva, levantada após um fechamento do canhão, é a de ativação do catodo que é o processo em que os carbonatos da tinta são transformados em óxidos. As fases do processo de ativação vão ocorrendo conforme é aumentada a temperatura do catodo, ou seja, pelo aumento da potência de filamento. Os ligantes orgânicos são removidos por evaporação, a uma temperatura próxima de 500 °C; a conversão dos carbonatos em óxidos ocorre entre 850 e 900 °C e a ativação completa-se a temperaturas entre 1000 e 1200 °C. Após a ativação, a condição normal de trabalho do catodo situa-se entre 950 e 1050 °C.

As fases do processo de ativação são acompanhadas monitorando-se a pressão no interior da câmara de vácuo do canhão, que deve ser mantida em valores menores que 10^{-5} mbar. Durante a primeira fase, que é a evaporação dos solventes, a pressão na câmara atinge um valor de 10^{-5} mbar, mas diminui rapidamente pois o volume de gases liberado é pequeno e o bombeamento neste caso é rápido. Na segunda fase, onde ocorre a transformação dos carbonatos em óxidos, a pressão atinge 10^{-5} mbar, mas o tempo

para diminuir a pressão é maior, pois neste caso é eliminado um volume muito maior de gases. Com a completa transformação dos carbonatos, a emissão de gases vai diminuindo e o sistema tende a estabilizar-se entre 10^{-7} e 10^{-8} mbar. Nesta fase já se observa o início da emissão de elétrons. Isto pode ser comprovado fazendo com que o conjunto catodo-grade funcione como um diodo polarizado diretamente por uma fonte DC, onde se mede a corrente emitida com auxílio de um miliamperímetro acoplado a este circuito. A figura 4.8 ilustra um processo típico de ativação, onde observa-se a variação da pressão e o aumento da corrente de filamento como função do tempo de ativação. O sistema de bombeamento turbomolecular tem papel fundamental no tempo do processo. Quanto melhor o sistema, menor o tempo, pois a exaustão dos gases liberados será mais eficiente. Pela Tabela A.2, apresentada no Apêndice, observa-se que o sistema turbomolecular tem uma taxa de bombeamento da ordem de 20% mais rápido que o sistema iônico.

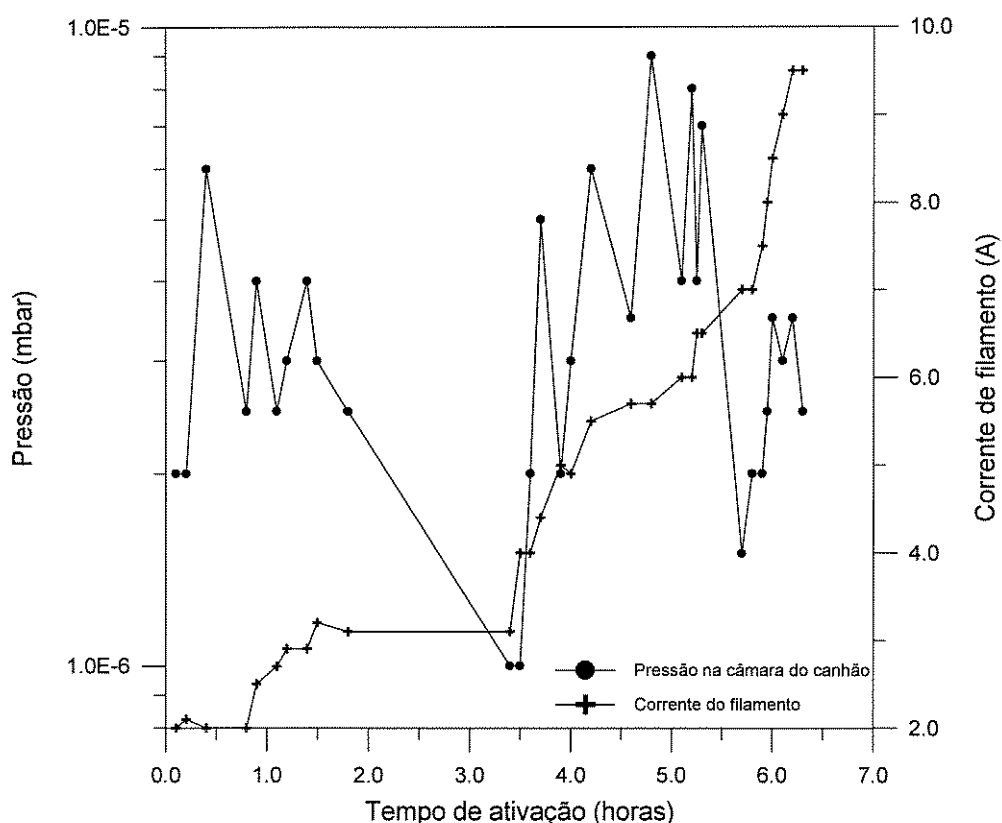


Figura 4.8 - Curva do processo de ativação do catodo, mostrando a variação da pressão no interior da câmara como função do tempo e da potência de filamento. As barras de erro não foram colocadas pois o gráfico é mais um informativo das condições gerais do sistema e não requer grande precisão.

Para uma avaliação prévia das condições da pintura do catodo e montagem mecânica, o catodo e a grade são transformados em um pequeno diodo, polarizado diretamente, onde se extraem duas curvas de emissão deste conjunto. Nesse arranjo o catodo é o eletrodo emissor de elétrons e a grade se transforma no anodo. A primeira curva extraída é a da variação da corrente de emissão como função da corrente de filamento. De acordo com a literatura especializada, a curva deve possuir um cotovelo, conforme mostra a figura 4.9. Se a curva tiver um aumento linear, significa que o processo de pintura ou a tinta não estão em boas condições. Alguns autores comentam que a tinta pode envelhecer após um tempo de armazenamento perdendo suas propriedades emissoras. A corrente nominal de trabalho do filamento deve situar-se um pouco acima do cotovelo (ponto Ifo no gráfico da figura 4.9), que no caso do canhão do IEAv seria um valor preliminar em torno de 8,2 A. Porém, a corrente de filamento não deve passar de 10% de Ifo com o risco de aumentar a evaporação da camada emissiva (diminuindo o tempo de vida do catodo) e também poderá haver uma deposição de moléculas desta camada sobre a grade, que começará a emitir elétrons de forma contínua. Por outro lado, uma diminuição de 10% de Ifo não aquece suficientemente o catodo e a camada emissiva corre o risco de ser contaminada com elementos constituintes do gás residual.

A ordenada I_{cg} , nos gráficos das figuras 4.9 e 4.10, representa a corrente contínua emitida pelo catodo e coletada na grade, a qual é transformada no eletrodo positivo do diodo catodo-grade, para os testes de emissividade da tinta.

A segunda curva extraída apresenta um perfil análogo a de um diodo de eletrodos planos, onde é mostrado a corrente de emissão como função da tensão de polarização, visto na figura 4.10. A corrente de filamento foi fixada com base na curva da figura 4.9, onde o seu valor foi ajustado um pouco além do valor Ifo, para garantir que o catodo operasse na região acima do cotovelo. Esta curva serve de comparação para avaliar as condições da tinta emissora, pois valores baixos de emissão indicam que a corrente de feixe também não atingirá os valores esperados, caso em que o flange do catodo é desmontado para uma nova pintura. Um perfil de curva diferente também pode revelar problemas na pintura ou na montagem mecânica.

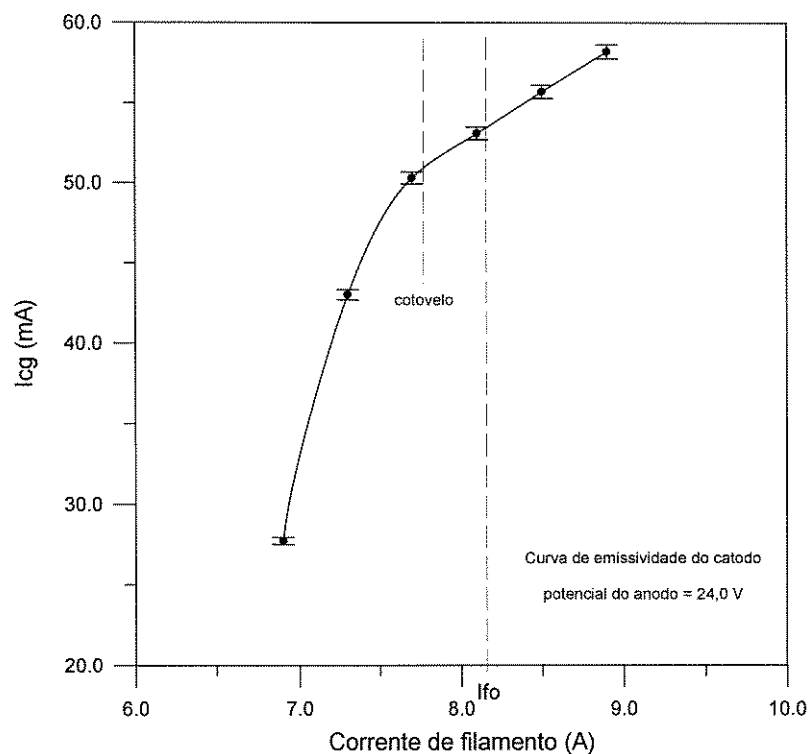


Figura 4.9 - Curva de emissividade do catodo, para o diodo catodo-grade, como função da corrente de filamento. Erro no eixo x de $\pm 0,05$ A.

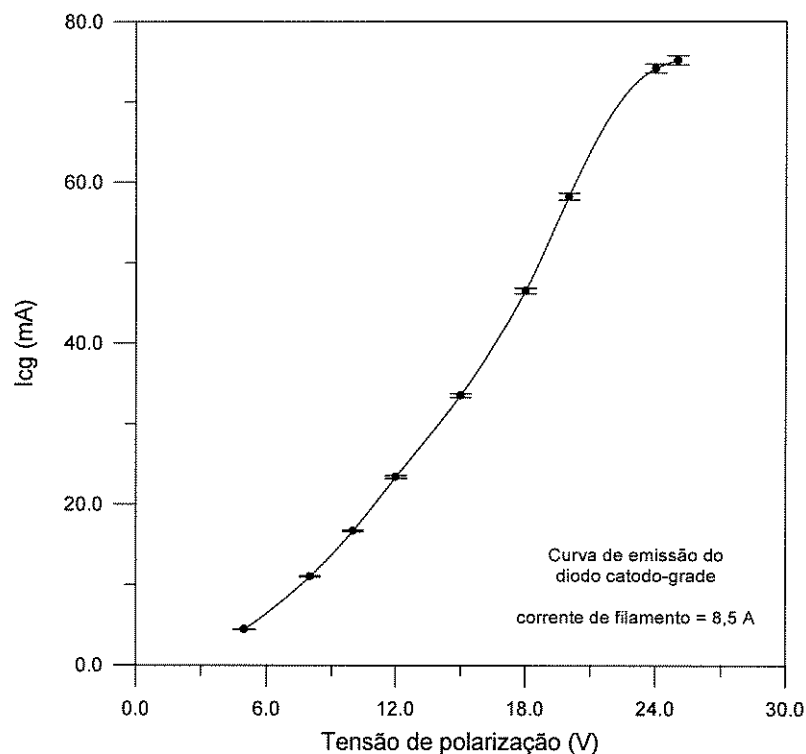


Figura 4.10 - Curva de emissão do diodo catodo-grade, para avaliação das condições da tinta emissora. A grade funciona como eletrodo positivo (anodo). O erro no eixo x (tensão de polarização) é de 0,75% da leitura, de acordo com o manual do multímetro utilizado para as medidas.

Uma vez concluído satisfatoriamente o processo de ativação e verificação de emissividade do catodo, procede-se ao condicionamento de alta tensão. O condicionamento permite a verificação de possíveis curtos-circuitos no interior do canhão ou nos elementos isolantes externos do canhão. Além disto, o condicionamento promove uma limpeza no interior do canhão, por meio de faiscamentos de pequena intensidade, pois mesmo com uma cuidadosa desmontagem e montagem resíduos de papel ou algodão do pano ou luvas usados para a limpeza podem ficar aderidos às partes internas do canhão e uma ponta quase microscópica, em um potencial de 100 kV e a uma distância pequena, fatalmente irá provocar um faiscamento.

Na sequência, com o filamento ligado, é feita a análise do circuito pulsador (ARR) com relação à tensão do pulso, sincronismo de disparo e condução contínua dos transistores. Na figura 4.11 tem-se a forma de onda para a tensão do pulso **(a)** medido no catodo e a corrente de feixe **(b)**, medido por meio de uma ponta de corrente, interceptada pela grade. Ambas as curvas foram obtidas com o potencial de aceleração desligado. A figura 4.12 mostra as mesmas formas de onda para um potencial de aceleração de 90 kV.

Com relação a curva **(a)** de ambas as figuras, nota-se uma distorção como uma série de degraus, do lado direito das formas de onda. Isto é ocasionado pelo descasamento de impedância entre a carga (canhão) e o circuito pulsador (ARR) que gera estes transientes quando da descarga do ARR. Se todos os degraus possuem o mesmo sinal (no caso das figuras, negativo), significa que a carga tem uma impedância maior que a impedância do circuito pulsador (como já mencionado, o circuito foi projetado para uma impedância de saída de $50\ \Omega$, definida pelo cabo coaxial RG58-U). Uma explicação elementar para estes degraus pode ser feita em termos de reflexões geradas nos terminais da linha de transmissão (que é a PFN formada pelo cabo coaxial de $50\ \Omega$) devido ao descasamento da resistência de carga. Estas reflexões atravessam a linha até o final em aberto em um tempo T , são completamente refletidas lá, e voltam para o final da carga em um tempo total $2T$, onde elas aparecem como degraus positivos ou negativos dependendo da relação de descasamento. As reflexões continuam deste modo, com uma constante diminuição de amplitude até que toda energia armazenada inicialmente na linha seja dissipada pela carga [4.2].

Das curvas de corrente é possível obter uma estimativa para a transparência dinâmica da grade comparando as duas figuras. Na figura 4.11, quando o ARR é pulsado, todos os elétrons que saem do catodo são interceptados pela grade, pois o único

potencial atrativo existente é o da grade, que fica em um valor de potencial maior que o do catodo no momento do pulso. Na figura 4.12, com o potencial de 90 kV ligado os elétrons tendem a serem atraídos pelo anodo, mas como a grade não é totalmente vazada, alguns elétrons serão capturados por ela durante o percurso até o anodo, formando uma corrente de grade menor do que aquela com o potencial acelerador desligado. Desta forma, pode-se deduzir a transparência como sendo:

$$T_g = \left(\frac{I_{g0} - I_{g90}}{I_{g0}} \right) \cong 52\%, \quad (4.1)$$

onde:

I_{g90} é a corrente de grade com potencial acelerador de 90 kV aplicado e

I_{g0} é a corrente de grade sem potencial acelerador aplicado.

A transparência dinâmica da grade é inferior a transparência geométrica calculada (73%), pois cada furo da grade, na presença de campo elétrico, funciona como uma lente eletrostática divergente, resultando em um perfil da distribuição da densidade de corrente diferente daquele de um feixe ideal. Esse efeito é consequência da diferença do gradiente do potencial em cada lado da grade, cujo agente causador é a presença da abertura do anodo que muda a distribuição do potencial no interior do canhão.

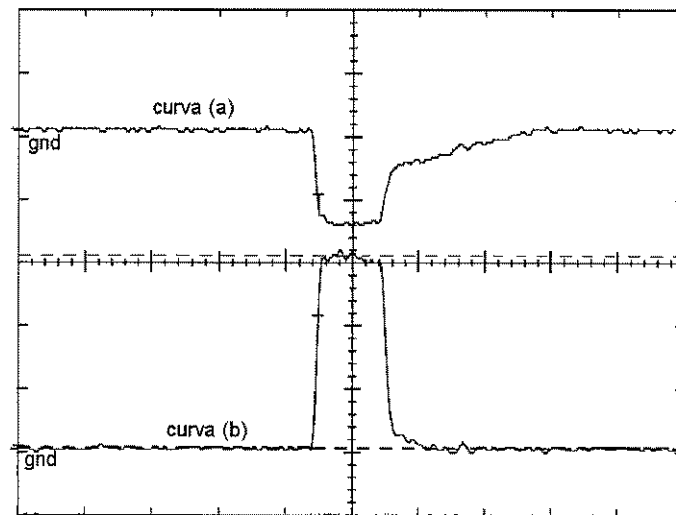


Figura 4.11 - (a) Forma de onda da tensão de pulso no catodo (amplitude 500 V/div); (b) forma de onda da corrente de feixe na grade (amplitude 2 A/div). Dados obtidos com potencial de anodo a 0 kV. Para ambas as curvas, escala do eixo do tempo é de 200 ns/div.

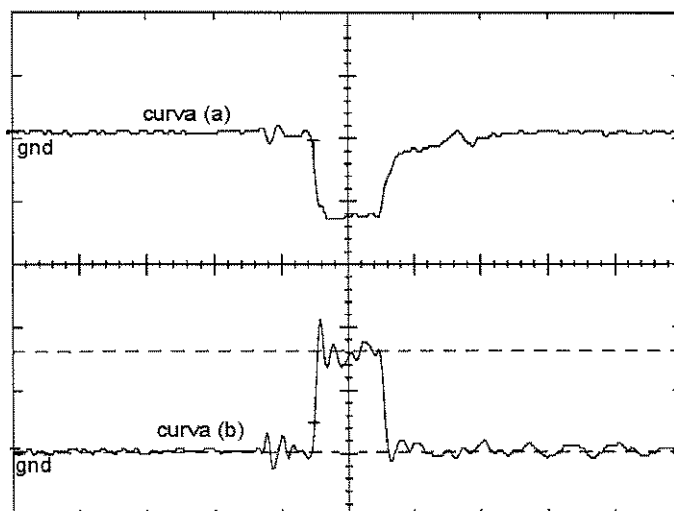


Figura 4.12 - (a) Forma de onda da tensão de pulso no catodo (amplitude 500 V/div); (b) forma de onda da corrente de feixe na grade (amplitude 2 A/div). Dados obtidos com potencial de anodo a 90 kV. Para ambas as curvas, a escala do eixo do tempo é de 200 ns/div.

O gráfico da tensão de corte da grade fornece uma família de curvas, conforme mostrado na figura 4.13. A corrente de filamento é fixada em um valor no qual o canhão trabalhe no regime de saturação, com base nos dados da curva da figura 4.7 (trabalhando neste regime certifica-se que o canhão esteja extraindo o máximo de corrente que catodo possa produzir e, por estar saturado, pequenas variações na corrente de filamento não afetarão a corrente de feixe). Em termos de campo elétrico, o corte existe quando o gradiente do potencial no catodo é zero, que ocorre quando a carga no catodo é nula.

Para melhor entendimento foram adotados dois termos para a tensão de grade. A tensão de corte da grade é definida como a tensão contínua negativa, em relação ao catodo, que aplicada entre catodo e grade, bloqueia quase que totalmente a corrente emitida pelo catodo impedindo que a mesma atinja o anodo. A tensão efetiva de grade é uma tensão pulsada que corresponde à diferença entre o pulso de tensão positivo, em relação ao catodo, aplicado entre o catodo e a grade pelo amplificador de resposta rápida menos a tensão de corte da grade.

A família de curvas é obtida variando-se a tensão de grade como função do potencial de anodo. Para isto mede-se a corrente contínua média emitida fixando-se a tensão de grade e aumentando-se gradativamente o potencial acelerador. Quando esta corrente de fundo começa a aumentar, significa que a tensão de grade está se tornando insuficiente para bloquear o fluxo de elétrons.

Por meio dessas curvas é possível conhecer o potencial de aceleração máximo com que se pode trabalhar para uma dada tensão de corte da grade. Na fase de caracterização do canhão escolheu-se a tensão de corte da grade como sendo a menor possível, para um dado potencial de anodo, de forma a minimizar ao máximo as limitações térmicas do copo de Faraday utilizado nas medidas. Alguns artigos técnicos relatam que uma corrente de fundo em torno de 10 mA, para uma corrente de feixe de 10 A, é perfeitamente aceitável. No entanto, cálculos térmicos conservativos e preliminares do copo de Faraday indicaram que mesmo fixando uma corrente de fundo em 0,1 mA (gerando uma potência máxima de 10 W em 100 kV) a temperatura do alumínio do copo subirá a uma taxa de 12 °C por minuto, ou seja, em aproximadamente uma hora de funcionamento ininterrupto do canhão, o alumínio estaria fundido.

Um parâmetro retirado destas curvas é o fator de amplificação (μ) definido como a razão entre o potencial de aceleração (V_0) e a tensão de corte da grade, para a condição do corte (V_{CO}). A expressão é escrita como:

$$\mu \cong \frac{V_{01}}{V_{CO1}} \cong \frac{V_{02}}{V_{CO2}} \cong \frac{V_{03}}{V_{CO3}} \cong \dots \cong 420. \quad (4.2)$$

O fator de amplificação para canhões tipo triodo está sempre relacionado com a tensão de grade e conseqüentemente com a geometria da mesma (diâmetro dos furos, espaçamento entre eles, distância do anodo). Isto fornece informações para possíveis mudanças na furação da grade e posicionamento da mesma com relação ao catodo, fazendo com que ela exerça um controle mais efetivo sobre o feixe de elétrons emitidos pelo catodo.

Na equação (4.2) observa-se que o fator de amplificação aumenta se a tensão de corte diminui. Para que isto aconteça, três situações são possíveis: aumento da distância entre grade e anodo (quanto mais perto a grade estiver do catodo os elétrons sentirão um potencial mais forte da grade do que o potencial de anodo); aumento da distância entre os furos (isto é fisicamente esperado uma vez que o aumento da distância melhora o controle da grade sobre o feixe de elétrons) e diminuição do diâmetro dos furos (pela mesma razão apresentada anteriormente). As duas últimas situações são aplicadas à grade que foi utilizada no canhão de elétrons. Nota-se também que embora essas possibilidades aumentem o controle sobre o feixe, por outro lado elas diminuem a transparência da grade, diminuindo a corrente de feixe final.

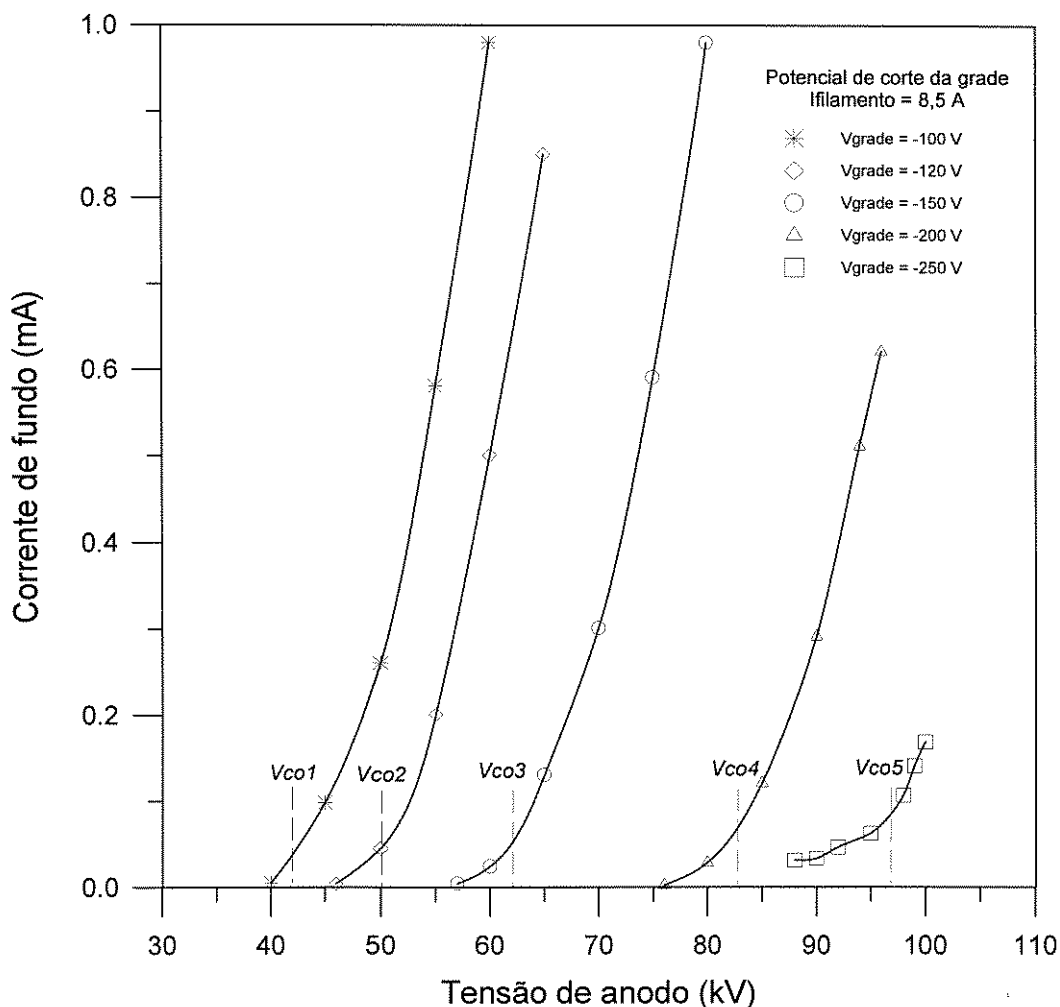


Figura 4.13 - Família de curvas para definição da tensão de corte da grade, em função do valor do potencial de aceleração. O erro para o eixo x (tensão de anodo) é de ± 1 kV e o erro para o eixo y (corrente de emissão) é de 0,75% da leitura, de acordo com o manual do multímetro usado para as medidas.

Uma das curvas características de emissão do canhão é a da corrente de pico (pulsada) de feixe em função da corrente de filamento, para um dado potencial de aceleração. Na figura 4.14 são mostradas as curvas características para dois potenciais. As duas curvas possuem perfis similares, diferenciando-se apenas nos valores de corrente emitida. Pela análise do gráfico, verifica-se que para correntes de filamento maiores que 8,4 A, o canhão já começa a trabalhar em uma região de saturação ou seja, atingiu o limite da perveança, que é ocasionada pela limitação da carga espacial. Este valor está um pouco acima do que o valor estimado na figura 4.7, mas dentro da variação de 10% ($8,2 + 10\% \cong 9,0$ A). Uma vez atingido a saturação a corrente de feixe está no seu limite máximo e não sofre variações mesmo que a corrente do filamento tenha pequenas oscilações.

A corrente de trabalho do filamento foi então definida como sendo 8,5 A. Isso assegura que o catodo realmente atingiu uma temperatura na qual estão sendo emitidos mais elétrons do que os que chegam ao anodo. Neste caso, um aumento da temperatura (ou corrente de filamento) do catodo não resultará em aumento da corrente de feixe. A única limitação para a corrente de feixe é o efeito da carga espacial decorrente da geometria do canhão e dos parâmetros da grade. Um canhão trabalhando acima desta corrente de saturação está operando limitado pela carga espacial.

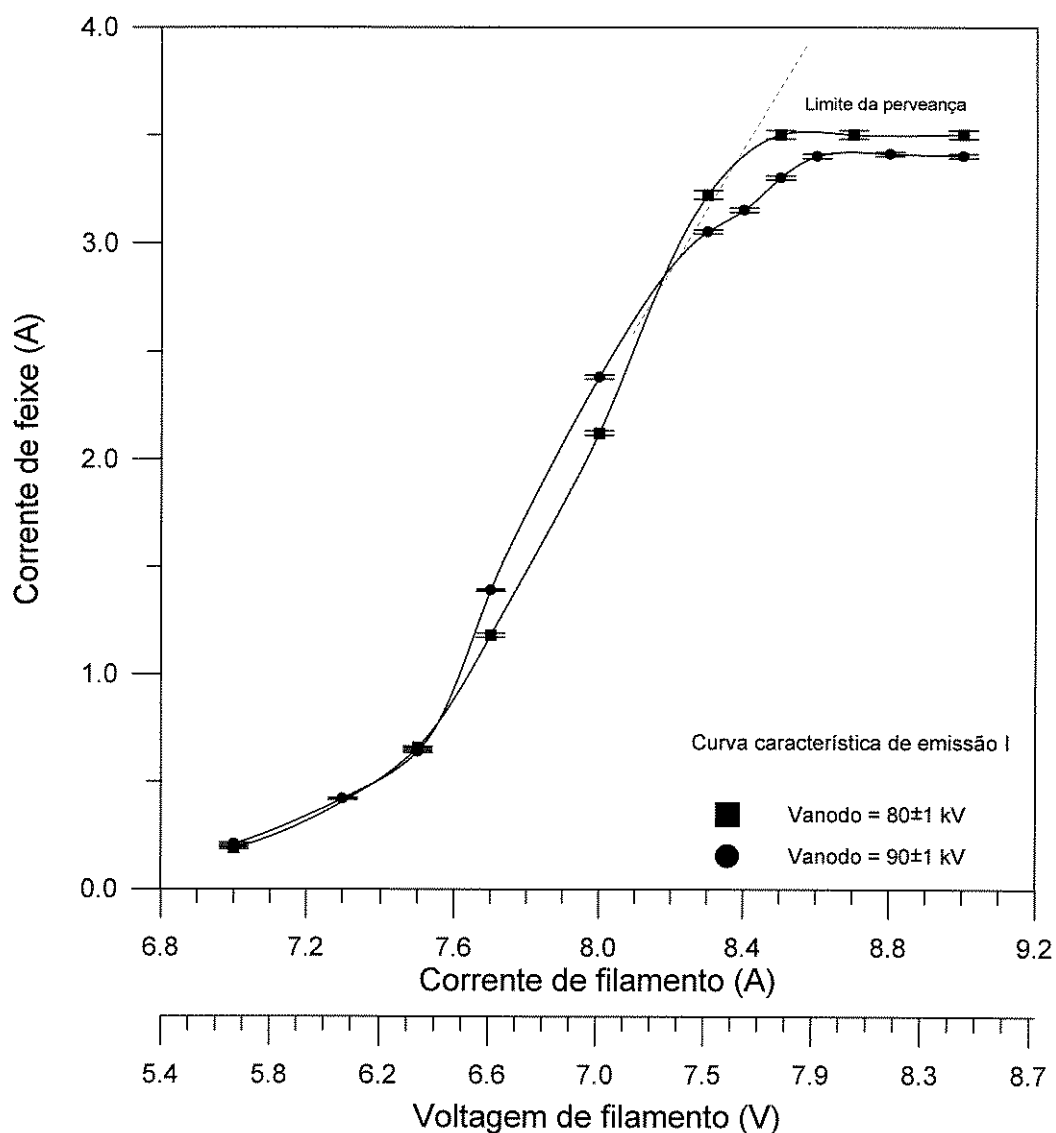


Figura 4.14 - Curvas características de emissão do canhão como função da corrente de filamento. A saturação da corrente de feixe é decorrente da limitação pela carga espacial. O erro nos dois eixos x é $\pm 0,05$ (Volts ou Ampères).

Fixado o valor de trabalho do filamento, obtém-se uma outra curva de emissão na qual a corrente de feixe é função do potencial do anodo. A curva é obtida mantendo a corrente de filamento constante e aumentando o potencial de anodo. Essa curva possui um efeito similar ao da curva anterior, ou seja, acima de um certo valor do potencial o anodo atrai todos os elétrons emitidos pelo catodo e um aumento no potencial não irá aumentar a corrente de feixe significativamente, pois o número de elétrons emitidos é determinado pela temperatura do catodo e quase sempre independe do potencial do anodo. Um canhão trabalhando acima deste potencial está operando limitado pela temperatura. A figura 4.15 mostra uma curva experimental do canhão, onde o potencial de saturação é alcançado em torno dos 90 kV. Abaixo do potencial de saturação, o comportamento da curva segue a lei de Child-Langmuir, ou seja, $I_{\text{feixe}} \propto V^{3/2}$. A curva aumenta até a saturação, quando há uma mudança de inclinação, e então torna-se praticamente constante.

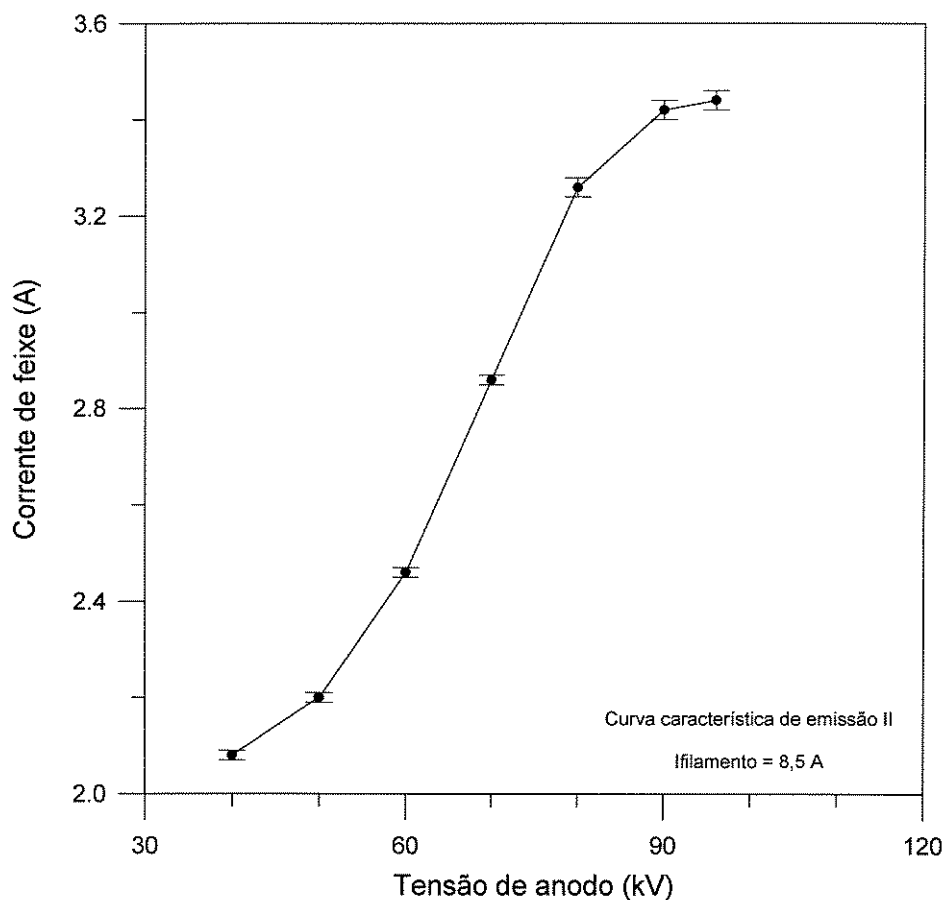


Figura 4.15 - Curva característica de emissão do canhão como função do potencial de aceleração (tensão do anodo). A saturação da corrente de feixe é decorrente da limitação por temperatura. O erro no eixo x é ± 1 kV.

Pela análise da figura 4.15, observa-se que não adianta aumentar o potencial de anodo (por exemplo 160 kV), pois a corrente atingiu seu valor máximo e o canhão chegou ao seu limite. Para obter-se correntes maiores é preciso analisar mudanças na tinta emissora, na geometria dos eletrodos ou nos parâmetros da grade.

As curvas das figuras 4.14 e 4.15 foram construídas a partir de valores de corrente de feixe medidos com um osciloscópio e, portanto, para cada ponto foi obtido a sua forma de onda, o que permitiu uma análise do perfil do pulso extraído. Na figura 4.16 é apresentada uma forma de onda da corrente de feixe, com o canhão operando limitado pelo efeito de carga espacial ($I_{\text{m}} = 8,5 \text{ A}$ e potencial de aceleração de 90 kV).

Comparando a forma de onda da figura 4.16 com a da figura 4.11, conclui-se que houve um aumento na largura do pulso (aproximadamente 20%) e no nível de ruído sobreposto à onda. Essas diferenças aparecem devido a soma de vários fatores, entre eles, a uma menor sensibilidade de resposta do monitor de corrente toroidal, campos eletromagnéticos gerados dentro e fora do canhão (induzindo ruídos no cabo coaxial que conecta o monitor de corrente ao osciloscópio) e indutâncias e capacitâncias parasitas presentes no canhão e nas fontes de tensão.

Por essas figuras também é possível obter uma outra estimativa da transparência de grade, pois, agora tem-se a medida da corrente total emitida pelo catodo (6,4 A) e a medida da corrente que atingiu o copo de Faraday (3,5 A). Nesse caso:

$$T'_g = \frac{I_{\text{feixe}}}{I_{g0}} \cong 55\% . \quad (4.3)$$

Os valores da transparência, obtidos a partir das equações 4.1 e 4.3, são bem próximos, o que comprova a validade de cálculo da transparência da grade pelo dois métodos.

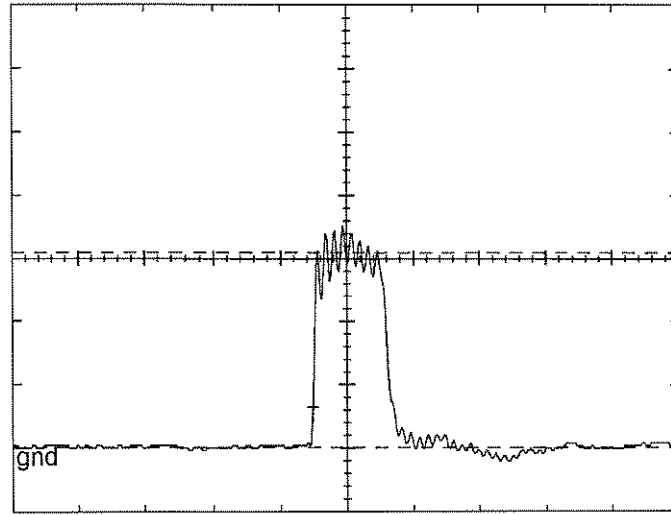


Figura 4.16 - Forma de onda da corrente de feixe coletada no copo de Faraday (amplitude 1,165 A/div), para uma corrente de filamento de 8,5 A e potencial de anodo a 90 kV. A escala do eixo de tempo é de 200 ns/div.

4.4. Análise dos resultados

As curvas obtidas permitiram caracterizar a emissividade do catodo e conseqüentemente a corrente de feixe extraída. Pela análise das curvas foi determinado o valor da corrente de filamento para o qual o canhão opera na saturação ou seja, limitado pela carga espacial ($I_{fi} = 8,5 \text{ A}$), condição desejável pela maior estabilidade do canhão. Concluiu-se também que para potenciais de anodo maiores que 90 kV, na condição de $I_{fi} = 8,5 \text{ A}$, o anodo já consegue atrair todos os elétrons produzidos pelo catodo, pois atingiu a saturação por temperatura e, desta forma, é inútil aumentar o potencial de anodo.

Pela análise dos dados obteve-se uma estimativa da transcondutância do canhão, que é definida como o inverso da resistência entre o catodo e o anodo. Esta estimativa pode ser avaliada por meio da equação:

$$S = \frac{\nabla I_{feixe}}{\nabla V_g} \quad \text{para } V_0 = \text{cte}, \quad (4.4)$$

onde:

V_g é a tensão efetiva observada na grade.

Empregando a equação (4.4) obteve-se uma transcondutância aproximada de $S \approx 0,008 \Omega^{-1}$ (ou uma transimpedância de aproximadamente 125Ω). Este valor comprova de fato o descasamento entre o canhão e o circuito pulsador, mostrado nas figuras 4.11 e 4.12, bem como o baixo valor de corrente de feixe extraída (3,5 A) em comparação com o valor da simulação (≈ 6 A). A estimativa da transcondutância foi obtida de algumas medidas realizadas em testes distintos, uma vez que a montagem experimental dificulta a obtenção de dados suficientes à construção de um gráfico de corrente de feixe em função da tensão de grade, para um potencial de anodo constante.

Com respeito a análise da qualidade do feixe extraído (curva de emitância e perfil do feixe) não foi realizada nenhuma medida quantitativa. A medida da emitância seria baseada na análise do perfil de luminosidade do feixe incidindo sobre uma placa de alumina. Essa luminosidade seria capturada por uma placa de aquisição de imagem de alta resolução e o processamento e transformação da imagem em valores de emitância deveria ser obtido por meio de um software de tratamento de imagem, desenvolvido no próprio Instituto, que ainda está em uma etapa inicial.

Foi realizada uma medida que permitiu uma análise preliminar da densidade de corrente do feixe, substituindo a tubulação do copo de Faraday por uma que possuía na sua extremidade final, um flange com uma janela de quartzo transparente na qual foi depositada uma camada de fósforo verde. Porém, o fósforo utilizado era de alta sensibilidade e, portanto, por menor que fosse o número de elétrons incidentes, ocorria uma alta luminescência, sendo visualizado um círculo bem iluminado em todos os pontos. A medida forneceu o diâmetro do feixe na saída do canhão. Este valor foi de aproximadamente 20 milímetros, confirmando a abertura de feixe, devido à repulsão coulombiana (efeito da carga espacial). Esse fato comprova a necessidade do uso de lentes magnéticas após o canhão para confinar o feixe a um diâmetro que possa ser injetado, sem atingir as paredes da tubulação, na entrada da primeira estrutura aceleradora.

Na tabela 4.3 é apresentada uma comparação dos dados obtidos na caracterização do canhão de elétrons com a de outros canhões similares, pesquisados na literatura técnica. Pode-se notar que, independente do tipo de catodo, os outros projetos conseguem extrair uma corrente maior graças a uma largura de pulso menor (com exceção do canhão LISA que não é pulsado) e, sobretudo, a uma transcondutância maior, que está relacionada diretamente com os parâmetros da grade (espaçamento entre furos, distância entre catodo e grade, tensão efetiva de grade aplicada).

Tabela 4.3 - Comparação de parâmetros entre o canhão do IEAv e outros canhões obtidos na literatura técnica.

Parâmetros	IEAv (Brasil)	TRISTAN - KEK (Japão)	CID - SLAC (EUA)	LISA - INFN (Itália)	VICKERS LTD. (EUA)	INJECTOR for PHOTON FACTORY - KEK (Japão)
Vanodo (kV)	90	143	175	100	80	100
Ifeixe max. (A)	3,5	6	19	0,2	15	8
Largura de pulso (ns)	200	2	3	DC	10	15
Perveança (10^{-6} perv) ¹	0,13	0,11	0,27	0,006	0,664	0,26
Fator de amplificação	420	nd ²	nd	311	100	nd
Transcondutância (Ω^{-1})	0,008	nd	0,083	nd	0,02	0,06
Emitância (π mm.mrad)	na	na ³	na	8	nd	nd
Tipo de catodo	óxido	dispenser	dispenser	dispenser	óxido	óxido

1 - perveança genérica

2 - não disponível

3 - não avaliado

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O objetivo de construir-se um novo canhão para o acelerador linear de elétrons foi alcançado, resultando em um canhão operacional e permitindo a realização de alguns estudos preliminares de outros componentes do acelerador como lentes magnéticas e desviadores de feixe.

A concepção do novo flange do catodo possibilitou um melhor controle na distância entre catodo e grade, a diminuição de partes móveis e melhor isolamento elétrico, que reduziram os ocasionais curtos-circuitos decorrentes do aquecimentos das peças e da manipulação mecânica. A introdução de isoladores térmicos (chapas de molibdênio) concentraram melhor o calor do filamento, evitando um aquecimento excessivo do módulo do circuito pulsador, acoplado no interior do tubo de cerâmica corrugada. Isso, também, diminuiu o regime de trabalho da fonte de alimentação do filamento.

Os estudos sobre as tintas emissoras de elétrons resultaram em procedimentos padrão, para a elaboração de uma única formulação e pintura do catodo, aumentando a confiabilidade e reprodutibilidade necessárias à etapa de caracterização do canhão.

A elaboração de um outro sistema de vácuo melhorou a eficiência de bombeamento da câmara do canhão e reduziu o tempo para voltar a operá-lo, após uma abertura do sistema. A implementação do novo circuito pulsador, usando-se transistores bipolares (BJT) operando na região de avalanche, possibilitou uma corrente de feixe mais constante, um pulso melhor definido e um circuito mais resistente a faiscamentos ocasionais, durante a etapa de caracterização. Com este circuito de dimensões menores, foi possível conectá-lo diretamente aos terminais do canhão, evitando as deformações do pulso observadas em montagens anteriores em que se fazia uso de cabos coaxiais para realizar as interligações.

A sequência de medidas de caracterização permitiram uma boa avaliação do desempenho do canhão, indicando pontos onde são possíveis realizar otimizações que possam auxiliar na melhora do sistema. As medidas, apresentadas neste trabalho,

concentraram-se na emissividade e no perfil do feixe extraído, sendo obtido vários dados de acordo com a variação dos parâmetros ou ponto de operação do canhão.

As medidas coletadas forneceram a corrente máxima que pode ser extraída do canhão, 3,5 A para um potencial de aceleração de 90 kV e largura de pulso de 200 ns. A corrente catódica medida foi de aproximadamente 6,4 A, o que permitiu estimar a transparência dinâmica da grade em torno de 55%. O valor da corrente catódica está de acordo com o valor obtido por meio da simulação computacional, pois o programa considera que toda corrente gerada pelo catodo é transmitida sem perdas até o anodo, ou seja, a grade é assumida como tendo transparência de 100%. O diâmetro medido do feixe na saída do anodo foi de aproximadamente 20 mm, o que também está de acordo com a simulação computacional, conforme foi mostrado na figura 2.6. Essa tendência de abertura do feixe demonstra a necessidade do uso de lentes magnéticas para confinar o feixe até a entrada da estrutura aceleradora.

Com o objetivo de alcançar a meta de projeto de 10 A de corrente de feixe, devem ser continuados os estudos, por meio da simulação computacional, de outros formatos dos eletrodos, visando aumentar a perveança do canhão. Avaliação de outros tipos de grade, com melhor transparência, também podem ajudar a aumentar a corrente de feixe, assim como proporcionar o casamento de impedância com o circuito pulsador (a transimpedância medida do canhão é da ordem de 125 Ω e o circuito pulsador possui uma impedância de saída de 50 Ω). Deve-se estudar a substituição do catodo óxido pelo tipo dispenser, que proporciona maior emissão de corrente, maior vida útil e pode ser reativado diversas vezes, mesmo quando exposto à pressão atmosférica.

A eletrônica associada deverá ser modernizada, com a aquisição de fontes de alimentação programáveis que podem ser ajustadas remotamente. O circuito pulsador deverá ser reprojetoado minimizando suas dimensões, de modo a facilitar o resfriamento dos componentes eletrônicos que ficam submetidos a uma temperatura elevada, dentro do tubo cerâmico que sustenta o flange do catodo. A diminuição do número de conexões evitará maus contatos devido a manipulação mecânica ou problemas de aquecimento. Também se encontra em fase de estudos a montagem de um circuito pulsador com novos tipos de transistores que aumentem a amplitude do pulso e possuam controle de qualidade melhor, com menos dispersão de suas características. Esse novo circuito também deverá facilitar a obtenção de pulsos com larguras menores, da ordem de 10 ns, como está definido nas especificações do projeto do acelerador linear.

A conclusão do projeto do medidor de emitância e a inserção de monitores de corrente tipo toroidal na linha do feixe (método não destrutivo), auxiliarão na caracterização e nos ajustes do posicionamento radial do feixe extraído. O medidor de emitância permitirá uma análise quantitativa do feixe, uma vez que se obterá os valores do diâmetro, da emitância e da distribuição radial de corrente. Os medidores toroidais, colocados em vários pontos da linha de feixe, fornecerão permanentemente os valores de corrente.

APÊNDICE

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VÁCUO DO CANHÃO DE ELÉTRONS

Neste apêndice serão descritas as etapas realizadas para o projeto e construção do sistema de vácuo do canhão de elétrons.

1. Projeto preliminar

Tem o objetivo de avaliar o ambiente em que se quer fazer o bombeamento (câmara do canhão e os materiais que ficarão dentro dela), para verificar taxas de degaseificação, pressão final desejada, escolha das bombas, tipos de medidores e sistemas de proteção.

1. 1. Requisitos desejáveis

- pressão em torno de $1,0 \times 10^{-8}$ mbar (regime molecular): evitar ionizações na câmara, prolongar a vida útil da tinta emissiva, evitar oxidação nos componentes feitos de cobre;
- gás residual livre de agentes compostos por hidrocarbonetos (óleo, graxa): prejudica a emissão do catodo, contamina os elementos de alumina diminuindo a isolamento elétrica;
- período de condicionamento rápido, aproximadamente 10 horas, após uma abertura do sistema em pressão atmosférica;
- possibilidade de aquecimento ("baking") do sistema da ordem de 300 °C: atingir mais rapidamente a pressão final, limpeza térmica periódica;
- resistência à radiação: os elétrons emitidos poderão gerar raios X com energia de até 100 keV.

1.2. Materiais e componentes utilizados

Com base nos requisitos citados acima, foi possível especificar os materiais mais apropriados para a construção de todo o sistema.

- construção do sistema: foi usado aço-inox 304 para a fabricação dos flanges, tubos, cruzetas e foles. Este material possui baixa taxa de degaseificação, é resistente à radiação e pode ser feito “baking” na faixa de 400 °C.
- flanges: foram construídos com o sistema de vedação tipo Conflat, com selo metálico de cobre OFHC (“oxygen-free high-conductivity”) pois é melhor vedante, possui baixa taxa de degaseificação e é resistente à radiação.
- válvulas: foram escolhidas as de fechamento por processo pneumático e vedação por selo metálico.

2. Cálculos

2.1. Taxa de degaseificação

O conhecimento da taxa de degaseificação dos materiais que compõem o sistema é importante para o cálculo da pressão final que o sistema pode atingir ou, imposta a pressão final, para o cálculo da velocidade efetiva de bombeamento.

A degaseificação ocorre devido a dois processos principais:

- dessorção, onde moléculas de gás que estão incrustadas nos materiais são retiradas por meio de processo térmico ou por radiação;
- evaporação, onde um elevado aquecimento do material faz com que o mesmo solte parte dos próprios elementos que o constituem. Isto ocorre em pequena quantidade no canhão, principalmente, na base metálica de níquel do catodo, que trabalha a uma temperatura de 980 °C.

A tabela A.1 mostra a taxa de degaseificação para os vários materiais existentes no interior do canhão.

Tabela A.1 - Taxa de degaseificação para diversos materiais (valores por cm²).

Material	1 hora de vácuo (mbar.Ls ⁻¹)	10 horas de vácuo (mbar.Ls ⁻¹)
Alumínio	8,0x10 ⁻⁹	7,0x10 ⁻¹⁰
Cobre OFHC (polido)	2,6x10 ⁻⁹	2,6x10 ⁻¹⁰
Aço inox (polido mecanicamente)	2,6x10 ⁻⁹	4,0x10 ⁻¹¹
Alumina	6,5x10 ⁻⁷	6,0x10 ⁻¹⁰

2.2. Velocidade de Bombeamento

A velocidade efetiva de bombeamento é dada pela fórmula:

$$S_{ef} = \frac{Q_t}{p}, \quad (A.1)$$

onde:

S_{ef} é a velocidade efetiva de bombeamento na câmara, considerando todos os tipos de materiais que existem em seu interior,

Q_t é a taxa de degaseificação total dos materiais e

p é a pressão final do sistema.

Para as condições da câmara do canhão, têm-se os seguintes valores:

área total de aço inox	694,3 cm ²	$Q_x = 27,0 \times 10^{-9}$ mbar.l.s ⁻¹
área total de alumina	1106 cm ²	$Q_{ce} = 670 \times 10^{-9}$ mbar.l.s ⁻¹
área total de cobre	234 cm ²	$Q_{cu} = 60 \times 10^{-9}$ mbar.l.s ⁻¹
taxa de degaseificação total		$Q_t = 790 \times 10^{-9}$ mbar.l.s ⁻¹

Para uma pressão final desejada na câmara de $p = 1,0 \times 10^{-8}$ mbar, deve-se optar por uma bomba que tenha uma velocidade de bombeamento igual ou superior a:

$$S_{ef} = 80 \text{ l.s}^{-1}.$$

2.3. Condutância

A requerida velocidade efetiva de bombeamento de uma câmara, ou de qualquer sistema que opere em vácuo, somente estará em concordância com a velocidade nominal da bomba usada (ou de um sistema de bombeamento) se essa estiver conectada diretamente à câmara. Na prática isso raramente é possível. Quase sempre é necessário a inserção de um sistema de tubulação, contendo válvulas, foles, reduções, etc. Isso introduz uma resistência ao fluxo dos gases, que resulta em uma velocidade efetiva de bombeamento (S_{ef}) menor que a velocidade de bombeamento da bomba (S), ou do conjunto de bombas.

Para assegurar que a câmara tenha a real velocidade efetiva de bombeamento, deve-se optar por uma bomba com velocidade relativamente maior.

A relação entre S e S_{ef} é dada pela seguinte fórmula básica em tecnologia de vácuo:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L}, \tag{A.2}$$

onde L é a condutância total do sistema de tubulação, que é a somatória dos valores individuais dos vários componentes (tubos, flanges, válvulas, foles, reduções, etc).

A associação em série é dada pela fórmula:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}. \tag{A.3}$$

A associação em paralelo é dada pela fórmula:

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n. \tag{A.4}$$

A condutância dos componentes é calculada levando-se em consideração o tipo de fluxo do gás (que depende da pressão do sistema na qual se deseja trabalhar) e as características dimensionais e geométricas dos componentes.

vácuo grosseiro	atmosfera—1 mbar	fluxo viscoso
médio vácuo	1—10 ⁻³ mbar	fluxo Knudsen
alto e ultra-alto vácuo	10 ⁻³ mbar e abaixo	fluxo molecular

Com o uso das fórmulas adequadas, para o regime de fluxo molecular (ultra-alto vácuo) [AP.1], obtém-se os valores da condutância, velocidade efetiva e pressão final para os dois sistemas de bombeamento da câmara do canhão (Tabela A.2).

Tabela A.2 - Parâmetros dos dois sistemas de bombeamento da câmara do canhão de elétrons.

	Bomba turbomolecular	Bomba iônica
Condutância total (L) [l.s ⁻¹]	43,5	264,3
Velocidade da Bomba (S) [l.s ⁻¹]	1500	40
Velocidade efetiva (S_{ef}) [l.s ⁻¹]	42,2	34,7
Pressão final (p) [mbar] *	1,8x10 ⁻⁸	2,3x10 ⁻⁸

* pressão calculada considerando-se a taxa de degaseificação total do canhão e a velocidade efetiva corrigida com o termo da condutância.

3. Bombas

Para o sistema de pré-vácuo foi escolhida uma bomba turbomolecular, por ser eficiente e limpa (não contaminando o sistema com hidrocarbonetos). No processo de ativação do catodo, devido a alta emissão de gases, ela é usada, preservando a bomba iônica, já que o processo evolui para pressões na faixa de 10^{-5} mbar.

Durante o regime normal de funcionamento do canhão (ultra-alto vácuo) é utilizada uma bomba iônica, por ter alta eficiência, ser mais limpa do que uma bomba turbomolecular e de operação mais simples.

REFERÊNCIAS

- 2.1. Lapostolle, P. M.; Septier, A. L. *Linear Accelerators* Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1970. cap. A.1.
- 2.2. Abramyan, E. A. *Industrial Electron Accelerators and Applications* USA, Hemisphere Publishing Corp., 1988.
- 2.3. Lapostolle, P. M.; Septier, A. L. *Linear Accelerators* Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1970. cap. A.2.
- 2.4. Stopa, C. R. S. *Acelerador Linear de Elétrons “ Progress Report ”* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1990. (Memorando Técnico Nº 059 (04 jul 90) 376)
- 2.5. Reiser, M. *Theory and Design of Charged Particles Beams* New York, John Wiley & Sons Inc., 1994. cap. 2.
- 2.6. Spangenberg, K. R. *Vaccum Tubes* New York, McGraw-Hill Book Company, 1948. cap. 8.
- 2.7. Spangenberg, K. R. *Fundamentals of Electron Devices* New York, McGraw-Hill Book Company, 1957. apendix 9.
- 2.8. Septier, A. *Focusing of Charged Particles* New York, Academic Press Inc., 1967. v. II, cap. 3.1.
- 2.9. Pierce, J. R. *Theory and Design of Electron Beams* 2 ed., New York, D. Van Nostrand Company Inc., 1954.
- 2.10. Septier, A. *Focusing of Charged Particles* New York, Academic Press Inc., 1967. v. II, cap. 3.2.
- 2.11. Septier, A. *Focusing of Charged Particles* New York, Academic Press Inc., 1967. v. II, cap. 3.2.

- 2.12. Herrmannsfeldt, W. B. *EGUN-An Electron Optics and Design Program* California, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, January 1988.
- 2.13. Spangenberg, K. R. *Vacuum Tubes* New York, McGraw-Hill Book Company, 1948. cap. 8.
- 2.14. Tessarotto, L. A. B.; Takahashi, J. *Desenvolvimento da Solda Cerâmica Metal no IEAv* São José dos Campos, CTA/IEAv, 1987. (Nota Técnica IEAv -001/87, fevereiro 1987)
- 2.15. Tessarotto, L. A. B. *Aspectos da Construção de um Canhão de Elétrons de Alta Corrente* São Paulo, 1989. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo.
- 2.16. Migliano, Y. C. D. P.; Stopa, C. R. S.; Muraro, A. Jr. *Estudos de Parâmetros Físicos e Geométricos do Canhão de Elétrons do Acelerador do IEAv, Utilizando o Código Computacional EGN87c* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1994. (Memorando Técnico Nº 086 (17 mai 94) 584)
- 2.17. Passaro, A.; Migliano, Y. C. D. P.; Muraro, A. Jr.; Abe, N. M.; Clabunde, D.; Stopa, C. R. S.; Cardoso, J. R. *Estudo da Óptica do Canhão de Elétrons do IEAv - uma Contribuição para Caracterização* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1994. (Memorando Técnico Nº 092 (08 set 94) 662)
- 3.1. Herrmann, G.; Wagener, S. *The Oxide-Coated Cathode* Chapman & Hall Ltd., 1951. v. 2, cap. 6, sec. 31.3.
- 3.2. *Chemical Transport in Oxide Cathodes*, Philips Research Reports, 26, p. 519-531, dec. 1971.
- 3.3. Romão, B. M. V.; Muraro, A. Jr.; Tessarotto, L. A. B.; Takahashi, J. *Processos de Preparação, Deposição e Análise de Substâncias Emissoras de Elétrons* São José dos Campos, CTA/IEAv, 1992. (Nota Técnica IEAv - 006/92, setembro 1992)
- 3.4. Comunicação particular, Prof. Jiro Takahashi, Instituto de Física, USP-SP.

3.5. *Testing Relative Thermionic Emissive Properties of Electron Tube Materials using a Reference Cylindrical Diode*, ASTM, F270-56.

3.6. Muraro, A. Jr.; Romão, B. M. V.; Tessarotto, L. A. B.; Cavalheiro, F. R. F.; Rubini, J. Jr.; Stopa, C. R. S.; Passaro, A.; Takahashi, J. *Procedimentos para Ativação do Catodo Óxido do Canhão de Elétrons* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1993. (Memorando Técnico Nº 075 (30 mar 93) 519)

3.7. Tessarotto, L. A. B. *Aspectos da Construção de um Canhão de Elétrons de Alta Corrente* São Paulo, 1989. Dissertação de mestrado - Instituto de Física, Universidade de São Paulo.

3.8. Muraro, A. Jr.; Romão, B. M. V.; Neves, D. *Confecção de uma Grade Plana Furada para o Canhão do Acelerador Linear de Elétrons do IEAv* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1993. (Memorando Técnico Nº 073 (15 mar 93) 512)

3.9. Rubini, J. Jr.; Cavalheiro, F. R. F. *Evolução do Projeto do Amplificador de Resposta Rápida* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1993. (Memorando Técnico Nº 072 (10 fev 93) 497)

3.10. Rubini, J. Jr., *Unidade Geradora de Pulsos para um Canhão de Elétrons de um Acelerador Linear de Partículas* São Paulo, 1997. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

4.1. Muraro, A. Jr.; Romão, B. M. V.; Neves, D. *Confecção de uma Grade Plana Furada para o Canhão do Acelerador Linear de Elétrons do IEAv* São José dos Campos, CTA/IEAv/FEX, 1993. (Memorando Técnico Nº 073 (15 mar 93) 512)

4.2. Glasoe, G. N.; Lebacqz, J. V. *Pulse Generators* New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1948. cap. 6, p. 175-179.

AP.1. Holland, L.; Steckelmacher, W.; Yarwood, J. *Vacuum Manual* London, E & F N Spon, 1974.