

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SEMICONDUTORES,
INSTRUMENTOS E FOTÔNICA

De acordo
25/3/91


MEDIDOR DE DOSE DE ÍONS IMPLANTADOS

AUTOR: Carlos Alberto Pisani

ORIENTADOR: Prof. Dr. Furio Damiani

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Furio Damiani

Prof. Dr. Peter Jurgen Tatsch

Prof. Dr. Mario Lucio Côrtes

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

agosto de 1990

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Carlos Alberto Pisani e aprovada pela Comissão Julgadora em 31 / 08 / 90.


Orientador

B0/9103794

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma tenham contribuído na realização deste trabalho, seja através de discussões, sugestões ou críticas.

Ao Prof. Dr. Furio Damiani tanto pela orientação como pelo apoio que me prestou durante todo o trabalho.

Agradeço também à Coordenação da Área de Circuitos Integrados do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Telebrás, pelo apoio e pelo incentivo à realização deste trabalho, fornecendo os equipamentos que utilizei para a caracterização dos circuitos bem como suporte computacional.

À Faculdade de Engenharia Elétrica pelos insumos fornecidos para a confecção dos circuitos.

A minha mãe, Dona Sonia, que sempre me incentivou.

Finalmente, agradeço à minha mulher, Cláudia, pelo incentivo e pela ajuda no trabalho de revisão e sobre tudo pela compreensão nas horas em que me ausentei de sua companhia.

A ela dedico este trabalho.

CONTEÚDO

SUMÁRIO	S-1
CAPÍTULO I - HISTÓRICO SOBRE IMPLANTADORES IÔNICOS	I-1
I.1 Introdução	I-1
I.2 Aparecimento e Tipos de Implantadores de Íons	I-1
I.3 Implantadores Iônicos para Semicondutores	I-2
I.4 Os Primeiros Implantadores Industriais	I-4
I.5 - Possíveis Configurações para os Implantadores	I-4
I.5.1 - Pós Análise	I-5
I.5.2 - Pré Análise	I-5
I.5.3 - Pré Análise e Pós Aceleração	I-7
I.6 - Desenvolvimento da Intensidade e da Energia do feixe de Íons. I-7	
I.6.1 - Variação da Temperatura da Lâmina	I-10
I.7 - Desenvolvimento da Frequência e dos Métodos de Varredura. I-13	
I.8 Rendimento do Processo	I-14
CAPÍTULO II - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO ONDE SERÁ UTILIZADO O MEDIDOR DE DOSE	II-1
II.1 - O Implantador Iônico do LED/FEC-UNICAMP	II-1
II.2 - Câmara de Alvo	II-6

CAPÍTULO III - ESPECIFICAÇÕES DO DOSÍMETRO E CONCEITOS SOBRE MEDIDA DE CARGA	III-1
III. 1 Aplicações da Implantação Iônica	III-1
III.2 - Especificação do Equipamento.	III-4
III.3 O Dosímetro	III-5
III.3.1 - Sistema de Controle de Dose do Implantador	III-6
III.3.2 - Circuito de Medida de Quantidade de Carga.	III-8
CAPÍTULO IV - PROJETO DO MEDIDOR DE DOSE (DOSÍMETRO)	IV-1
IV.1 - Descrição do Circuito	IV-1
IV.1.1 Circuito Analógico	IV-1
IV.1.2 Circuito de Interface	IV-3
IV.1.3 Circuito Digital	IV-3
IV.2 Placa do Circuito Analógico (PA)	IV-5
IV.2.1 Módulo V/F	IV-7
IV.3 Placa do Circuito de Interface (PI)	IV-13
IV.4 Placa do Circuito Digital (PD)	IV-14
IV.5 Placa do Circuito Mostrador e Teclado (PMT)	IV-15
CAPÍTULO V - ALGORÍTMOS DE CONTROLE E MEDIDA	V-1
V.1 - Implementação do Programa Monitor	V-1
V.2 - Painel de Controle do Dosímetro	V-1

V.3 - Procedimento para uma Implantação	V-5
V.3 - Mensagens de Erro	V-7
CAPÍTULO VI - CARACTERIZAÇÃO E MEDIDAS	VI-1
VI.1 - Caracterização do Dosímetro.	VI-1
VI.2 - Caracterização da Placa Analógica	VI-2
VI.2.1 - Montagem para a Caracterização da Placa Analógica. ...	VI-2
VI.2.2 - Bloco Corrente-Tensão (I/V)	VI-3
VI.2.3 - Bloco Ganho e Filtro (G/F)	VI-16
VI.2.4 - Bloco Conversor Tensão-Frequência (V/F)	VI-19
VI.2.5 - Caracterização dos três Estágios em Cascata	VI-21
VI.2.6 - Caracterização em Função da Contagem dos Pulsos de Saída	VI-24
CAPÍTULO VII - CONCLUSÃO E SUGESTÕES	VII-1
VII - Conclusão	VII-1
VII.1 - Sugestões para a Continuação do Trabalho.	VII-2

SUMÁRIO

Este trabalho apresenta os aspectos teóricos e práticos envolvidos na construção de um Medidor de Dose de íons Implantados (Dosímetro). Nos detivemos na apresentação dos dados referentes à versão final do equipamento deixando de apresentar resultados obtidos com protótipos anteriores, que também construímos e que nos forneceram subsídios muito importantes para o aprimoramento dos circuitos de medida de dose. Outro aspecto que gostaríamos de ressaltar é que o trabalho de desenvolvimento do dosímetro não se limitou exclusivamente ao projeto dos circuitos elétricos do equipamento. Participamos ativamente do desenvolvimento do Implantador Iônico para o qual este equipamento se destina e que possui algumas características particulares que tiveram que ser estudadas para que pudessemos especificar corretamente o equipamento. Participamos também do projeto da Câmara de alvo que é parte integrante dos sistema de medida de dose.

Com relação à dissertação de tese, inicialmente é feito um histórico sobre os implantadores iônicos. Uma descrição sobre o Implantador iônico do LED/FED-UNICAMP e algumas aplicações da implantação iônica. São apresentadas as especificações e a teoria básica aplicada à medida de dose de íons implantados.

Por fim é apresentado o circuito do protótipo desenvolvido e os resultados da caracterização dos circuitos de medida, além de algumas sugestões para a continuação do trabalho.

CAPÍTULO I

I.1 Introdução

Neste capítulo procuraremos fazer um breve resumo histórico do desenvolvimento da implantação iônica como ferramenta para alterar as propriedades físicas dos materiais. Daremos ênfase somente aos fenômenos físicos associados à implantação artificial de íons. Procuraremos ainda salientar os aspectos relacionados com a medida da dose e do controle da uniformidade, visando obter subsídios para amparar o projeto do medidor de dose que é o objetivo central deste trabalho.

I.2 Aparecimento e Tipos de Implantadores de Íons

A partir de 1900, quando Marie Curie enunciou a hipótese de que os raios α perdiam energia quando atravessavam a matéria, muitos cientistas iniciaram seus experimentos com o intuito de revelar os segredos existentes até então sobre os átomos. Em 1906, Rutherford [1] foi um dos primeiros a fazer uma implantação iônica quando bombardeou uma folha de alumínio com partículas α , ou em nossa linguagem, íons de hélio com uma dupla carga positiva. O primeiro implantador de íons, era constituído por um simples tubo de vidro contendo um gás de um elemento radioativo, o radônio, que produzia um feixe de partículas α . É verdade que com este experimento, Rutherford não estava interessado em como

a estrutura da folha de alumínio era alterada, mas sim no espalhamento das partículas incidentes.

O próximo passo na evolução dos implantadores ocorreu com a invenção da fonte de íons no início dos anos trinta. Para a extração dos íons, eram utilizados eletrodos polarizados com um potencial alto, produzindo assim um feixe focalizado e energético[1]. Hoje em dia os implantadores com este tipo de fonte são utilizados para a produção de células solares, onde uma análise do feixe não é necessária, pois todos os íons produzidos pela fonte são implantados juntos. Este tipo de fonte trabalha com energias de até 5 KeV, que resultam em uma profundidade de penetração dos íons muito pequena e para sanar este problema, colocou-se um acelerador após a fonte de íons. Os potenciais típicos aplicados aos aceleradores estão entre 40 e 400 KeV, os quais permitem uma profundidade de penetração de até 1 μm . Este tipo de implantador, conhecido como implantador metalúrgico, é utilizado atualmente para implantações em metais. Em sua maioria eles são muito simples, pois para a produção de superfícies duras ou resistentes à corrosão não é necessária a separação dos diferentes tipos de íons implantados. A parte sofisticada deste tipo de máquina está no manuseio de amostras com um formato complicado, as quais necessitam ser giradas em todas as direções sob o feixe de íons.

I.3 Implantadores Iônicos para Semicondutores

Os tipos de implantadores descritos até agora não foram utilizados para a implantação de dispositivos semicondutores. As lâminas de silício apresentam uma vantagem em relação às amostras com um formato complicado, pois possuem uma superfície plana facilitando o processo de implantação. No entanto a extrema pureza dos materiais básicos (como por exemplo o silício monocristalino) e sua sensibilidade aos dopantes e à profundidade de penetração, exigiam um tipo diferente de implantador, que fosse capaz de produzir uma só

espécie de íon, a uma determinada energia e que pudesse implantar um número de íons por unidade de área bastante preciso com boa repetitividade e uniformidade superficial. A fim de atender todas estas imposições, era necessário um sistema que pudesse separar as diferentes espécies de íons geradas pela fonte; que tivesse um estágio de aceleração para que a profundidade de penetração fosse suficiente; que tivesse um sistema de varredura de tal forma que a distribuição dos íons por toda a lâmina fosse uniforme e finalmente que tivesse um sistema de medidas adequado para o controle preciso da dose implantada.

Apesar do bombardeamento de íons em semicondutores ter sido reportado a partir de 1948, nenhum dispositivo realmente operacional foi produzido naquele período. O primeiro implantador de íons que teve sucesso apareceu em 1954, quando Shockley [2] apresentou sua patente. Surpreendentemente a principal inovação apresentada por esta patente não era o bombardeamento iônico, que já era conhecido, mas uma novidade introduzida que era o recozimento da amostra após a implantação. O equipamento de Schokley era muito primitivo ao ponto de ser impossível a produção de uma junção, no entanto, ele mencionou em seu trabalho todas as técnicas possíveis para uma implantação iônica, tais como: separação de massa, sistema de varredura eletrostática e mecânica, implantação com escrita direta sobre a lâmina e implantadores com máscara de projeção.

A despeito do cepticismo de alguns que não esperavam uma vida muito longa para " *um sofisticado, dispendioso e brutal método para simples dopagem de delicados semicondutores*", [1] no início dos anos sessenta um grande número de laboratórios iniciou pesquisas neste campo. Uma circunstância favorável foi o fato de que muitos aceleradores e separadores previamente utilizados em pesquisas nucleares, tiveram que ser abandonados devido à tendência ao aumento da energia de aceleração. Existiam então equipamentos que poderiam ser utilizados para pesquisas em implantação iônica e que estavam parcialmente em

operação, apesar de que com sua alta energia e baixa corrente eles não eram os mais indicados para as implantações em semicondutores.

A partir daí, por volta da metade da década de sessenta os laboratórios de pesquisa desenvolveram seus próprios implantadores e os progressos obtidos nesta área foram muito rápidos culminando com equipamentos industriais de implantação poucos anos depois.

I.4 Os Primeiros Implantadores Industriais

Desde 1965 já se tem notícia de indústrias que fabricavam implantadores iônicos. Provavelmente um dos primeiros implantadores industriais de baixa tensão construídos na Europa foi o *Scandinavian Implanter*. Nos Estados Unidos o primeiro implantador comercial foi construído por *Peter Rose at High voltage Inc.*. Curiosamente ele era utilizado para implantações em células solares. Uma característica destes implantadores que nos chama a atenção era a dimensão extremamente pequena da tubulação utilizada para a condução do feixe de íons. Este era um erro frequentemente cometido nos novos desenvolvimentos. Um erro, por que as linhas de vácuo estreitas produziam efeitos de reflexão, que propiciavam o arrancamento de átomos contaminando assim o feixe e a amostra. Foi somente a partir de 1974 que os primeiros implantadores realmente industriais com linhas de vácuo largas foram produzidos.

I.5 - Possíveis Configurações para os Implantadores

Um implantador de íons é formado em geral por: uma fonte de íons capaz de ionizar sólidos, líquidos ou gases, um campo eletrostático para a extração destes íons, um sistema de focalização e aceleração do feixe de íons, um sistema de análise onde os íons são separados de acordo com sua massa e um sistema de

varredura encarregado pela implantação uniforme dos íons em toda a superfície da lâmina.

Podemos agrupar cada uma destas partes de diferentes maneiras dando origem às três principais configurações utilizadas [1] e que podem ser vistas na figura I.1.

I.5.1 - Pós Análise

Neste caso, os íons são acelerados até a sua energia final antes da análise do feixe para a separação da massa. A principal vantagem desta configuração, que pode ser vista na figura I.1-a, é que somente a fonte e o acelerador estão em alta tensão, enquanto todas as outras partes estão em potencial de terra podendo ser acessadas diretamente. Uma desvantagem é a necessidade de um espectrômetro de massas com um magneto muito grande, necessário devido à energia alta dos íons. Uma outra desvantagem é que a corrente de feixe depende da tensão de aceleração, de tal forma que é possível obter-se correntes altas somente com altas energias. Existe a possibilidade de se usar um espectrômetro de massas com um campo cruzado $E \times B$, o que permite uma configuração linear para o implantador (figura I.1-b).

I.5.2 - Pré Análise

Nesta configuração os íons são extraídos com potenciais entre 15 e 40 KeV, são analisados e finalmente acelerados até atingirem a energia desejada. O separador de massa pode ter um magneto pequeno e a variação da energia final pode ser facilmente obtida pelo controle da tensão de aceleração. A corrente de íons não é muito sensível às variações da energia. A figura I.1-c nos mostra um diagrama esquemático desta configuração. Uma das desvantagens deste tipo de

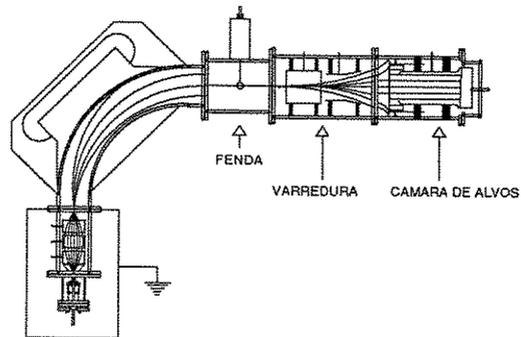


FIGURA I-1.a

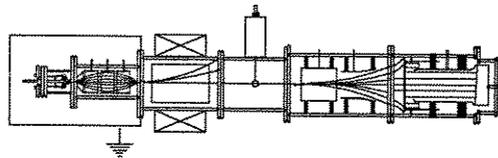


FIGURA I-1.b

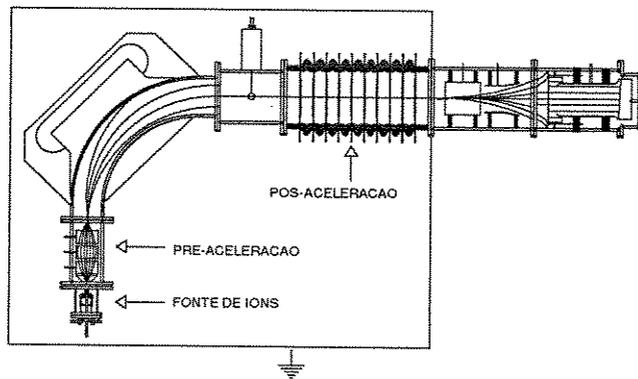


FIGURA I-1.c

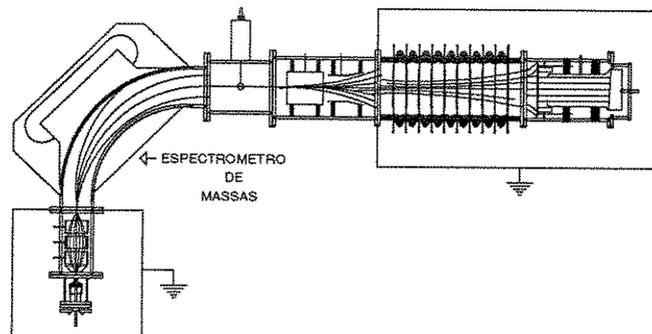


FIGURA I-1.d

implantador é o fato de que a fonte de força, tanto para o magneto como para o acelerador, com seus respectivos sistemas de controle e pelo menos uma estação de bombeamento necessitam ser isoladas eletricamente por estarem em potencial alto. No início esta configuração foi um problema, porém hoje em dia com as técnicas de transmissão de dados via fibras ópticas ela tornou-se uma das mais utilizadas.

I.5.3 - Pré Análise e Pós Aceleração

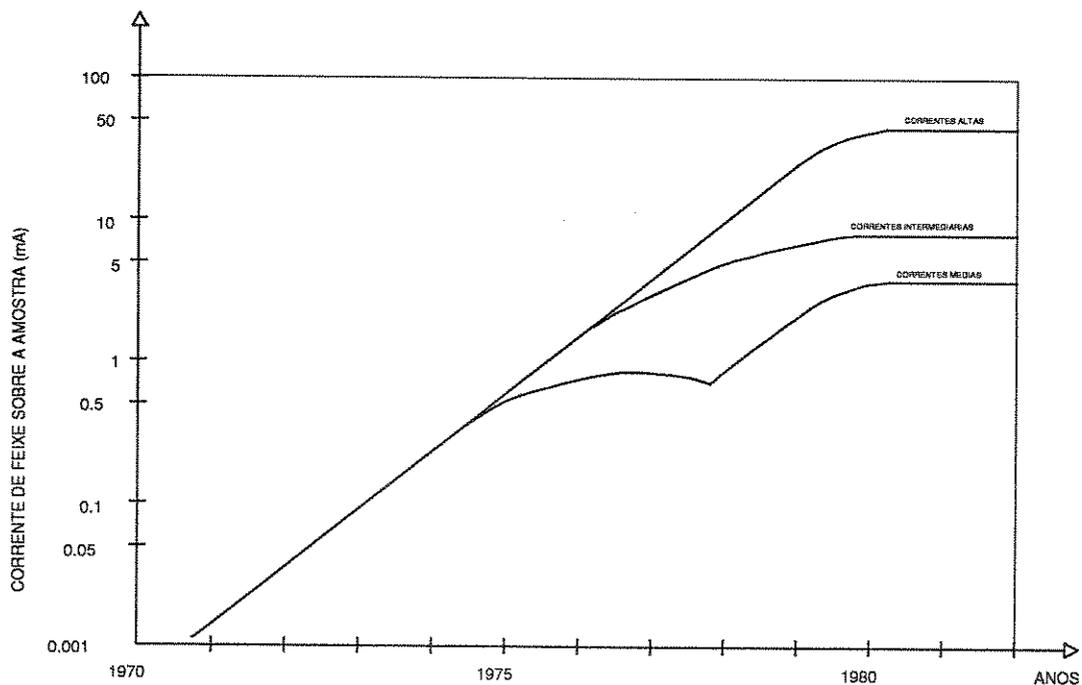
Neste caso, figura I.1-d, um aumento adicional de energia foi obtido colocando-se um segundo estágio de aceleração, o que implica na colocação das amostras em potencial alto. Esta configuração traz alguns inconvenientes tanto no manuseio das lâminas quanto na medida da dose implantada.

I.6 - Desenvolvimento da Intensidade e da Energia do feixe de Íons.

Nos itens anteriores nós apresentamos diversos tipos de implantadores sem entrarmos em muitos detalhes a respeito da intensidade e da energia da corrente de íons. Seria interessante fazermos agora um breve apanhado da evolução da corrente de íons desde o início da produção de semicondutores por implantação iônica.

No início dos anos setenta os implantadores existentes possuíam correntes de feixe pequenas, sendo usados somente para implantações com baixas doses. O gráfico da figura I.2, nos mostra a demanda por correntes de feixe cada vez maiores, através do aumento exponencial e ininterrupto da curva nos últimos 20 anos. Podemos notar

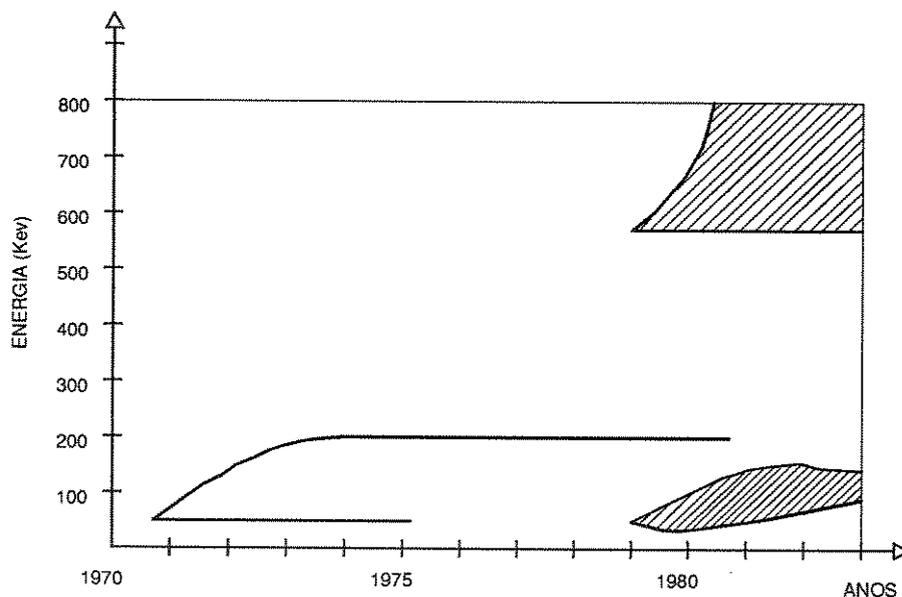
que existem diferentes ramos da curva que atingem a saturação em diferentes pontos. A razão para esta divisão entre os implantadores com correntes médias e intermediárias entre 3 e 4 mA e os implantadores com correntes altas entre 10 e 20 mA é principalmenete econômica. Não faz sentido utilizar sistematicamente um implantador de alta corrente que é excessivamente caro, para fazer implantações com baixas doses. A curva menor da figura I.2 mostra um implantador com uma corrente média. Todos eles trabalham com varredura x-y eletrostática ou híbrida. Até o final dos anos setenta, havia um consenso geral de que não era possível fazer a varredura de correntes de 1mA ou mais eletrostaticamente. No entanto, com o desenvolvimento da técnica foi possível aumentar este limite até 3 ou 4 mA.



• FIGURA I.2 - CORRENTE DE ÍONS SOBRE A LÂMINA

O segundo ramo da curva mostra os implantadores com correntes intermediárias. Este tipo de implantador geralmente possui uma varredura híbrida ou simplesmente mecânica.

A saturação do ramo de alta corrente deve ser atribuída às limitações dos sistemas de resfriamento das lâminas implantadas [3][4]. Ainda não está claro se estas dificuldades podem ser completamente superadas no futuro, ou se as altas correntes serão somente úteis na produção de células solares.



• FIGURA I.3 - DESENVOLVIMENTO DA ENERGIA DE IMPLANTAÇÃO

O desenvolvimento da energia de implantação durante o mesmo período apresenta um comportamento completamente diferente que pode ser visto na figura I.3. Após um aumento no começo dos anos setenta, de 60 para 200 KeV, a energia usada em implantadores de produção permanece a mesma até hoje. A

razão para a não utilização de feixes altamente energéticos é novamente econômica, pois o aumento do custo dos equipamentos possui uma relação aproximadamente linear com o aumento da energia.

Uma nova técnica, chamada de *pré-deposição*, foi desenvolvida com o intuito de contornar este problema. Surgiram então as máquinas com energias entre 60 e 120 KeV que podem ser vistas em um novo ramo da curva. Esta técnica coloca os átomos abaixo da superfície da amostra para o seu subsequente aprofundamento. Ela garante a precisão na dose e na uniformidade, sendo no entanto muito mais barata do que as implantações com alta energia. O termo *pré-deposição* foi uma expressão infeliz para esta técnica. A *pré-deposição* pode ser obtida tanto por evaporação como por CVD, porém com resultados não muito bons, pois durante o processo de difusão os íons terão que passar através da superfície da amostra.

O ramo da curva com energia de 60 KeV é devido a uma família de implantadores, chamados de implantadores dedicados, que podiam implantar somente átomos de boro com baixa dose de implantação.

I.6.1 - Variação da Temperatura da Lâmina

A energia do feixe de íons é dissipada e convertida em calor causando um aumento na temperatura da amostra. Se a amostra tiver uma capacitância térmica muito alta, o aumento de temperatura será desprezível. No entanto, as lâminas de semicondutores possuem um coeficiente térmico pequeno, implicando em um possível aumento de temperatura. Um parâmetro convenientemente usado quando se trata com o aquecimento produzido pelo feixe iônico incidente sobre a amostra é a irradiância (I_r), definida por Freemam [5] como:

$$I_r = I \times E / A \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (\text{I.1})$$

onde I é a corrente de íons [A]

E é a energia [eV]

A é a área varrida pelo feixe [m^2]

A transferência de calor nas lâminas presas à superfícies metálicas em vácuo, não se dá através de condução, exceto por uma pequena parcela na região da interface. Toda a dissipação do calor é feita por radiação. A potência térmica removida por radiação pode ser obtida por:

$$P = \epsilon A_t \sigma (T_t^4 - T_0^4) \quad (\text{I.2})$$

onde ϵ é a emissividade térmica da superfície

A_t é a área da amostra

σ é a constante Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-12} \text{ w} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ K}$)

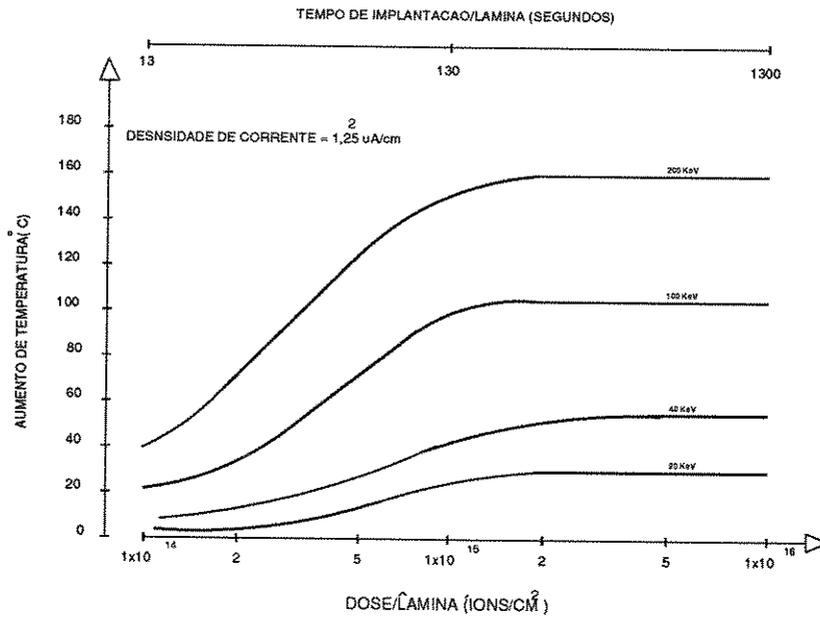
T_t é temperatura da amostra K

T_0 é a temperatura nas redondezas da amostra em K

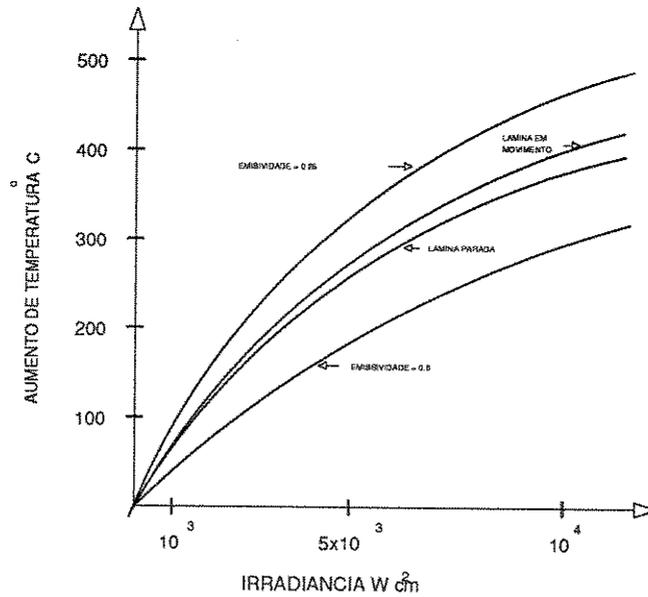
Se assumirmos que o feixe esta varrendo toda a amostra a temperatura de equilíbrio pode ser obtida por:

$$T_t - T_0 = (I_r w / 2 \epsilon \sigma)^{1/4} \quad (\text{I.3})$$

As figuras I.4 e I.5 nos mostram o aumento da temperatura das lâminas de silício em função da irradiância e da dose implantada respectivamente. Para implantações sem refrigeração a temperatura permanece abaixo de 120°C para I_r menor do que $0,1 \text{ w/cm}^2$.



• FIGURA I.4 - AUMENTO DE TEMPERATURA DURANTE UMA IMPLANTAÇÃO.



• FIGURA I.5 - AUMENTO DE TEMPERATURA EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA

Existem basicamente duas maneiras que podem ser utilizadas para minimizar o aumento da temperatura nas amostras implantadas, uma vez que a utilização de baixas taxas de implantação torna-se economicamente inviável. A primeira é diminuir a irradiância pelo aumento da área implantada. A forma mais conveniente de se fazer isto é introduzir algum mecanismo que possibilite a movimentação de várias lâminas através do feixe. A segunda maneira é a introdução de algum mecanismo para a refrigeração forçada da lâmina implantada.

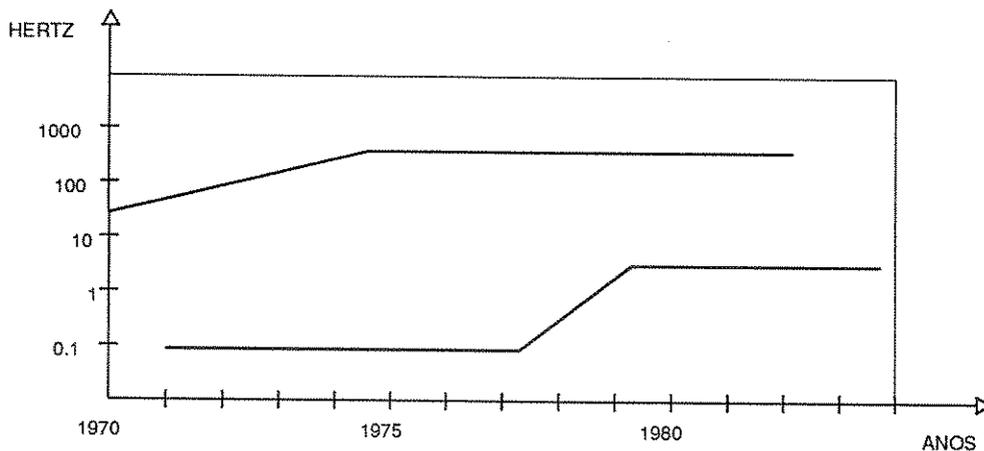
I.7 - Desenvolvimento dos Métodos e da Frequência de Varredura.

A frequência de varredura teve um desenvolvimento interessante. No início a tendência foi a de aumentar a frequência que variava desde centenas até milhares de Hertz. Com o aparecimento de problemas na uniformidade devido aos tempos de implantação muito curtos, a frequência de varredura chegou a atingir 4KHz. Aproximadamente ao mesmo tempo iniciou-se um desenvolvimento paralelo da técnica de varredura com frequências entre 1 a 10 Hz. Para um melhor entendimento deste fenômeno seria interessante analisarmos as diversas técnicas de varredura.

Os implantadores com baixa e média corrente utilizam a varredura eletrostática, ou x-y, onde o feixe é eletricamente defletido nas duas direções. Alguns implantadores utilizam a varredura híbrida, onde o feixe é defletido eletricamente em uma direção sobre um carrossel, e mecanicamente na outra através de rápida rotação do mesmo. Nos sistemas eletrostáticos o ângulo de deflexão deve ser pequeno a fim de se evitar grandes variações no ângulo de incidência do feixe sobre a amostra, o que poderia acarretar problemas, como por exemplo o da canalização do feixe . Esta característica faz com que este tipo de

varredura possa processar somente uma lâmina por vez, ao passo que os sistemas de varredura híbrida conseguem processar um lote de lâminas ao mesmo tempo.

As varreduras híbridas são um método ideal para implantadores com altas correntes. Infelizmente, a corrente de feixe iônico que pode ser defletida eletricamente é limitada, pois o potencial elétrico das placas de varredura destrói a neutralização da carga espacial do feixe de íons tornando-o desfocado. Com arranjos especiais que são barreiras para elétrons antes e depois das placas, e um quadrupolo magnético para sobrefocar o feixe na entrada do sistema de varredura, é possível efetuar varreduras de correntes de feixe de até 4 mA a 1000Hz. Cuidadas investigações [6] mostram que 4 mA é o limite superior para varreduras eletrostáticas particularmente para arsênio e fósforo a 40 KeV. Altas energias e baixo peso atômico permitem a utilização de correntes entre 6 a 8 mA.



• FIGURA I.6 - FREQUÊNCIAS DE VARREDURA

Existem ainda diversos tipos de mecanismos, chamados de varredura mecânica, que movimentam a lâmina nas duas direções enquanto o feixe permanece estacionário. Eles são utilizados em implantadores com altas correntes e são a razão para a utilização de frequências de varreduras muito menores.

I.8 Rendimento do Processo

Nos primeiros anos de produção comercial, a implantação iônica foi usada principalmente para a dopagem do canal de transistores MOS, onde o rendimento do processo de difusão não era satisfatório. Mais tarde as vantagens da implantação iônica tais como: precisão, baixa temperatura e processos secos, foram reconhecidas como sendo de interesse para processos com altas doses, e a implantação iônica passou a competir com o processo de difusão. Neste ponto o custo de cada pastilha tornou-se muito importante. Não é possível plotar uma curva mostrando o aumento do rendimento durante os últimos 15 anos, por causa da grande diferença existente entre o rendimento para pequenas e altas doses de implantação. Podemos no entanto mencionar as diversas maneiras pelas quais o rendimento aumentou. Uma das formas mais efetivas foi o aumento no tamanho da lâmina. Desde o começo da implantação iônica industrial os fabricantes foram forçados a atualizar constantemente seus equipamentos para acompanhar o aumento do tamanho das lâminas. A outra maneira de aumentar o rendimento foi obviamente o aumento da corrente de íons discutida anteriormente.

O rendimento é uma função da capacidade de processamento das lâminas que pode ser calculado por:

$$T = N / t_i + t_r + t_h \quad (I.4)$$

onde t_i é o tempo de implantação

t_r é o tempo de abertura e fechamento da câmara de alvos

t_h é o tempo de manuseio da lâmina

Várias foram as tentativas no sentido de melhorar a capacidade de processamento dos implantadores. Procurou-se diminuir o tempo de carga aumentando a eficiência no manuseio das lâminas e diminuindo-se o tempo de bombeamento da câmara. Uma outra maneira encontrada foi a utilização de um único feixe de íons que pudesse fazer implantações em duas câmaras distintas.

Finalmente o rendimento é influenciado pela precisão e limpeza da implantação. Desde o início, grandes esforços foram feitos no sentido de melhorar o rendimento pela obtenção de uma medida da dose mais precisa; por um controle melhor da varredura; pela eliminação das possíveis fontes de contaminação e pela melhoria do processo de recozimento. Devemos nos conscientizar de que muitas das coisas discutidas aqui não são partes integrantes dos implantadores iônicos, mas são fundamentais e foram decisivas para seu sucesso deste processo.

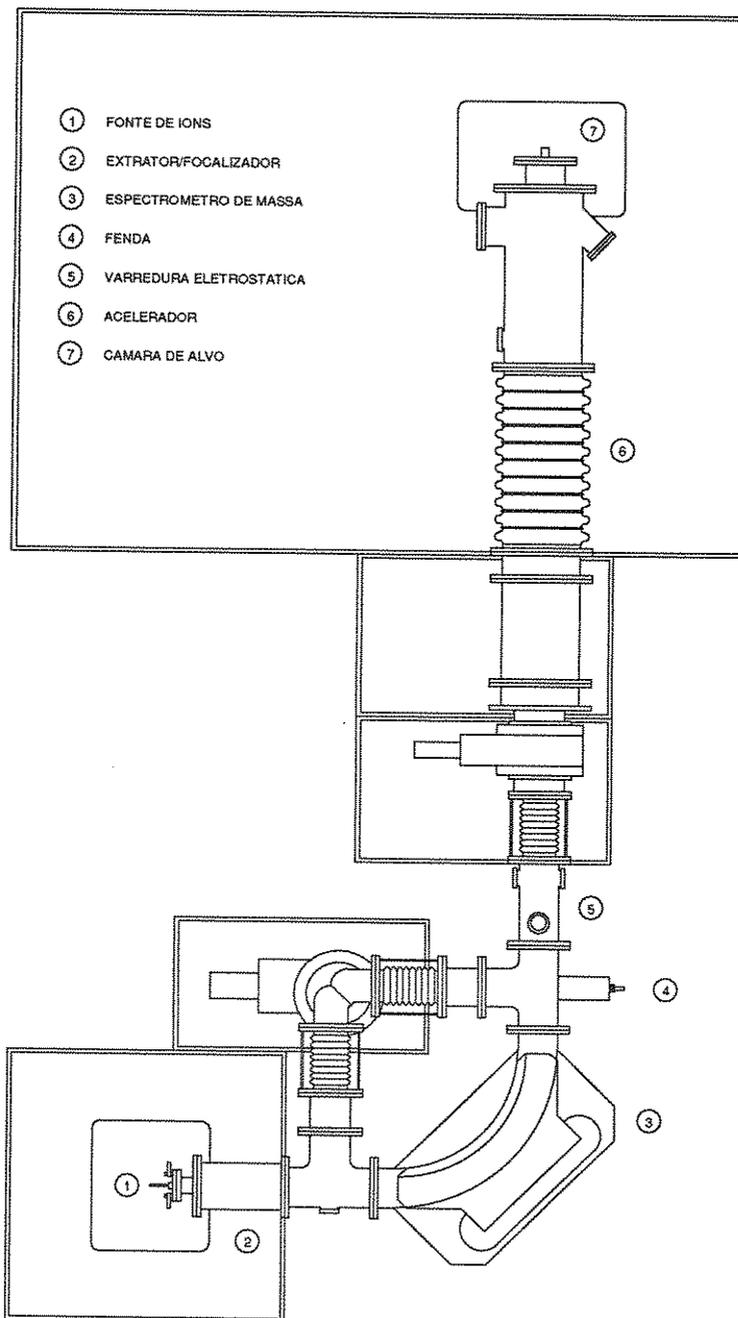
É clara a importância dos implantadores iônicos para a construção de dispositivos semicondutores. Algumas de suas principais vantagens são a uniformidade e a precisão com que se consegue controlar a dose recebida pela lâmina. No entanto é necessário que se tenha um sistema de medida de dose que possibilite o controle da dosagem de implantação com uma precisão de pelo menos 1 %.

CAPÍTULO II

II.1 - O Implantador Iônico do LED/FEC-UNICAMP

Neste capítulo faremos uma descrição do sistema de Implantação Iônica desenvolvido no LED/FEC-UNICAMP, a fim de que se conheça a sua estrutura e conseqüentemente as especificações do equipamento de medida de dose que está sendo desenvolvido para atender às necessidades específicas do mesmo. Na figura II.1 podemos ver um diagrama esquemático do implantador [7]. Dentre as configurações mais utilizadas para os sistemas de implantação iônica, foi escolhida a apresentada na figura I.1-d. A fonte de íons é do tipo catodo quente e pode ser utilizada com substâncias sólidas, líquidas ou gasosas. Um filamento de tungstênio aquecido é utilizado tanto para vaporizar as substâncias sólidas e líquidas como para gerar elétrons, os quais são atraídos por um ânodo a um potencial de algumas centenas de volts. Durante a trajetória entre o filamento e o ânodo, os elétrons colidem com as moléculas do gás gerando íons, que são retirados da fonte através de um sistema extrator e focalizados por uma lente eletrostática, cujo potencial varia entre 20 e 40 Kv conferindo-lhes uma energia $E = q \cdot V_{ext}$, onde q é o valor numérico da carga do elétron e V_{ext} é o potencial de extração.

Após a extração o feixe passa por um espectrômetro de massa do tipo setor magnético com um ângulo de abertura de 90° . Quando os íons passam através do campo magnético do analisador, eles são defletidos adquirindo uma trajetória circular [8] com um raio dado por:



• FIGURA II.1 - IMPLANTADOR IÔNICO DO LED/FEC/UNICAMP.

$$\text{com,} \quad R = K_n \cdot K \cdot M^{1/2} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{e} \quad K_n = (2 / n^2 q)^{1/2} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{onde,} \quad K = V^{1/2} / B \quad (\text{II.3})$$

- V é o potencial de extração dos íons
- B é o campo magnético
- q é a carga do elétron
- n é a condição de ionização.

Dessa forma conseguimos separar os íons com diferentes massas atômicas, obtendo um feixe iônico de elevada pureza a partir de materiais de baixa pureza ionizados na fonte. Uma outra consequência da utilização do espectrômetro de massas, muito importante para o sistema de medida de doses, é que conseguimos separar os feixes de íons monoionizados ($n=1$) fazendo com que as equações II.1 e II.2 fiquem respectivamente:

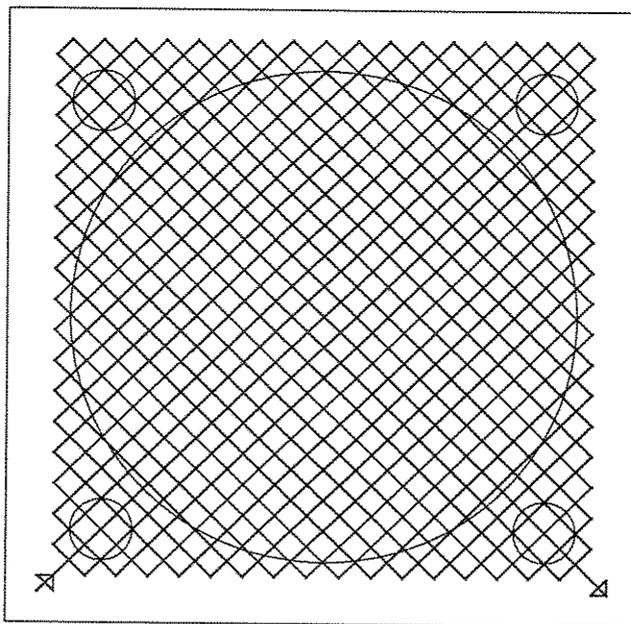
$$R = K_1 \cdot K M^{1/2} \quad (\text{II.4})$$

$$K_1 = (2 / q)^{1/2} \quad (\text{II.5})$$

No caso de íons duplamente ionizados ($n=2$), estes se comportam como se sua massa fosse a metade da massa que possuem, uma vez que sua energia dobra em virtude da carga $2q$.

A fim de possibilitar a separação física dos feixes iônicos dispersos pelo espectrômetro de massas, foi colocado um sistema de fenda ajustável logo após o mesmo. Desta maneira permitimos que somente o feixe iônico desejado passe, bloqueando todos os outros feixes emergentes.

Durante toda a sua trajetória, desde a fonte de íons até a fenda, o feixe é focalizado primeiro pela lente eletrostática e depois pelo analisador de massas, fazendo com que a sua seção reta seja muito menor do que a área das amostras que se deseja implantar. Após a fenda encontramos o sistema de varredura eletrostática encarregado de fazer com que o feixe percorra toda a área da lâmina, devendo no entanto manter uma uniformidade na dopagem durante toda a implantação. Para tanto, foi desenvolvido um circuito que aplica duas ondas triangulares com frequências de 400 Hz e 402 Hz, respectivamente às placas de deflexão vertical e horizontal. A composição dessas formas de onda nos fornece uma varredura do feixe sobre a amostra com uma trajetória



• FIGURA II.2 - COMPOSIÇÃO DAS FORMAS DE ONDA DE DEFLEXÃO

semelhante à da figura II.2. O tamanho da malha do reticulado que aparece é função da relação entre as frequências utilizadas, sendo que as desuniformidades nunca terão uma extensão maior do que a da malha. Dependendo da área a ser implantada temos um tempo mínimo para efetuar uma varredura completa sobre a lâmina, o qual determina o tempo mínimo de implantação para se obter uma boa uniformidade.

Excetuando-se a fonte de íons e o conjunto extrator-lente eletrostática, todo o restante do implantador está em potencial de terra. Na saída do sistema de varredura o feixe já analisado possui uma energia máxima de 40 KeV. Porém esta energia não é suficiente para que os íons alcancem uma profundidade de dopagem suficiente para muitas das aplicações em microeletrônica. Colocou-se então, após o sistema de varredura um tubo acelerador que irá aumentar a energia do feixe até 340 KeV. Este tubo é constituído por diversos anéis metálicos isolados por separadores cerâmicos, nos quais o potencial varia linearmente acelerando os íons que penetram no tubo. Na saída do acelerador está a câmara de alvo, a qual descreveremos detalhadamente pois nela estão alguns componentes que fazem parte do medidor de dose.

A câmara de alvo e o acelerador estão separados do resto do sistema por uma válvula gaveta, de tal forma que se possa trocar as lâminas a serem implantadas sem que o ciclo de vácuo fique demasiadamente longo. Duas bombas de vácuo de difusão de óleo, com as respectivas bombas mecânicas para pré-vácuo, estão instaladas de tal forma que, uma evacua a região entre a fonte de íons e o sistema de varredura e a outra a região entre a varredura e a câmara de alvo. A pressão na região da fonte deve ser da ordem de 10^{-3} torr e na região da câmara da ordem de 10^{-7} torr. Para manter a pressão necessária na câmara de alvo, uma vez que tanto ela como o tubo acelerador estão em alta tensão, existem duas possibilidades: a colocação de uma terceira bomba de vácuo, o que implicaria na instalação de um transformador com isolamento de alta tensão para a sua alimentação ou o aumento do diâmetro da tubulação até a bomba já existente, diminuindo-se

assim a impedância do sistema ao bombeamento, o que possibilita a manutenção da pressão requerida na câmara de alvo. Optou-se pela segunda solução devido às facilidades de implementação que ela apresenta em relação à primeira.

II.2 - Câmara de Alvo

Uma das principais vantagens da implantação iônica é a precisão com que se consegue controlar a dose recebida pela lâmina que está sendo implantada. Os sistemas de medidas mais precisos são aqueles que empregam um *copo de Faraday longo* com a lâmina formando o fundo do copo. A corrente de feixe varrida sobre a lâmina pode ser medida diretamente do copo. Entretanto, quando íons energéticos atingem a amostra ocorrem alguns fenômenos como a produção de correntes secundárias e terciárias, que fazem com que a integração da corrente não seja tão trivial como parece. A figura II.3-a nos mostra um diagrama esquemático do copo de Faraday com as correntes que podem existir [1]. O feixe primário incidente (I_f) pode estar acompanhado por elétrons (I_e) originários na fenda ou em uma outra fonte qualquer. Com os íons incidindo sobre a amostra várias correntes secundárias são geradas, dentre elas: uma corrente de elétrons secundários que são arrancados da superfície da amostra (I_{fe}), uma corrente de íons que são arrancados da superfície ou refletidos por ela (I_{fi}), um fluxo de átomos metaestáveis neutros ($\eta_{\phi n}$) além de um fluxo de fótons com uma faixa de energia desde eV até Kev ($\eta_{f\theta}$). Quando cada uma destas espécies de partículas encontram as paredes ao redor da amostra, elétrons terciários podem ser produzidos. Então a corrente de elétrons (I) utilizada para medir a carga total implantada é diferente da corrente real e pode ser obtida por:

$$I = I_f - I_e + I_{fe} - I_{fi} - (I_{fe}^e + I_{fn}^e + I_{f\theta}^e) \quad (II.6)$$

onde, o primeiro índice subscripto representa as espécies primárias, o segundo índice as espécies secundárias e os índices superescritos os elétrons terciários.

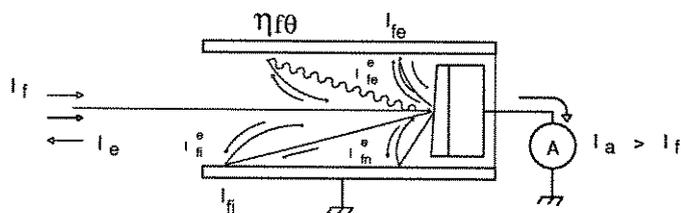


FIG. II.3-a

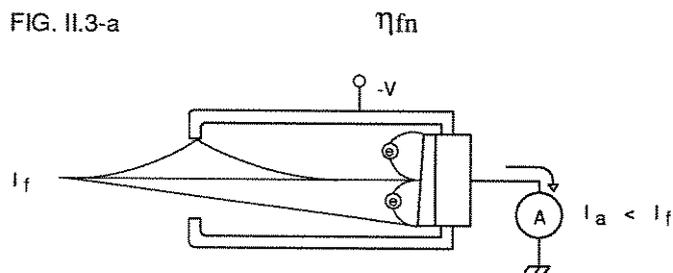


FIG. II.3-b

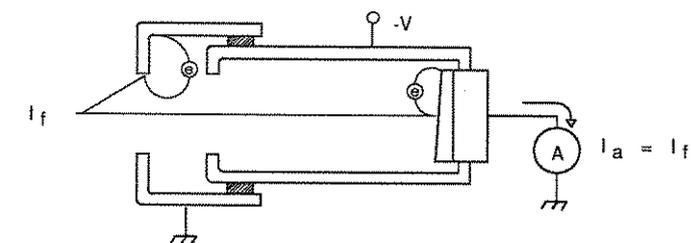


FIG. II.3-c

• FIGURA II.3 - CÂMARA DE ALVO.

Para evitar este fato coloca-se uma estrutura metálica envolvendo a amostra. Ela deve estar polarizada com um potencial negativo em relação ao suporte da mesma e é chamada de copo de Faraday. Na figura II.3-b podemos ver o efeito que esta estrutura causa repelindo os elétrons secundários, fazendo com que eles retornem para a amostra. A corrente I_e também é reduzida à proporções irrisórias. Observamos também que a simples inclusão desta estrutura não soluciona o problema da medida, pois o choque da corrente de feixe com o copo de Faraday gera elétrons secundários que seriam repelidos pelo mesmo e atraídos pela amostra fazendo com que a corrente seja maior do que a real. A figura II.3-c nos mostra uma estrutura utilizada para evitar estes acontecimentos. Sobrepõem-se ao copo de Faraday um segundo copo ligado ao mesmo potencial do porta amostras, de tal forma que o feixe não possa atingir o primeiro copo. Dessa forma os elétrons secundários gerados pela colisão do feixe com o segundo copo são repelidos pelo primeiro não conseguindo atingir a amostra, assim a corrente de elétrons utilizada para medir a dose implantada é igual à carga total implantada.

Um outro importante parâmetro a se considerar é a uniformidade de implantação, por isto estão previstos na câmara de alvo quatro pequenos copos de Faraday, localizados simetricamente em um quadrado circunscrito à região da amostra. Um pequeno copo de Faraday central pode ser implementado também a fim de se calibrar o equipamento de medida de doses e monitorar a corrente antes de se iniciar uma implantação. Em alguns casos, quando a amostra implantada necessita ser aquecida ou resfriada, existem algumas vantagens em se fazer com que ela não faça parte do sistema de medida. Nestes casos a dose implantada pode ser perfeitamente medida, através da interceptação de uma fração bem conhecida do feixe que é varrido pelos quatro copos de Faraday.

Com relação ao porta amostras, deve-se salientar ainda que ele deve proporcionar um excelente contato elétrico e térmico com a lâmina que está sendo implantada. O contato elétrico é importante para que se possa manter uma corrente de elétrons chegando à lâmina de tal forma a neutralizar as cargas positivas da

corrente de feixe iônico, mantendo-a a um potencial constante e possibilitando assim a medida da dose de implantação através desta corrente. A relação entre esta corrente e a dose implantada para esta estrutura pode ser obtida da seguinte forma:

$$D = I \cdot t \cdot q / A \quad (\text{II.7})$$

onde ,

- I é a corrente em microamperes
- t é o tempo de implantação em segundos
- A é a área da amostra na qual deve incidir o feixe iônico em cm^2
- q é a carga iônica e vale $6,2 \times 10^{12}$.

Note que a corrente de feixe iônico não deve incidir em nenhuma região do copo de Faraday, exceto em uma área sobre a amostra na qual se deseja uma implantação. Esta área é definida através de diafragmas colocados na entrada do copo de Faraday.

Como vimos anteriormente, a transferência de calor por condução é pequena, uma vez que ela é uma função da área de contato entre a lâmina e o suporte e esta é bastante reduzida devido às imperfeições da superfície posterior da lâmina. Por esta razão um bom contato térmico entre a lâmina e o suporte é muito importante, a fim de se aumentar o máximo possível a eficiência na transferência de calor entre ambos. Várias técnicas diferentes foram desenvolvidas para melhorar este contato [4], entre elas a interposição de uma fina camada de um elastômero entre a lâmina e o suporte, ou ainda a utilização de um gás ao invés do elastômero. Ainda em relação à uniformidade de implantação podemos observar que o suporte da amostra mantém um ângulo que está entre 7° e 11° em relação

à normal, para evitar a direção de um canal cristalográfico aberto, o que faria com que o íons penetrassem muito mais do que com um bombardeamento em uma direção aleatória.

CAPÍTULO III

III. 1 Aplicações da Implantação Iônica

A implantação iônica é tida como um processo tecnológico prático e é utilizada pelas indústrias na maioria dos processos de fabricação de dispositivos semicondutores. Podemos resumir as aplicações da implantação iônica na fabricação de dispositivos em:

1 - Dopagem de impurezas.

- * controle do total das impurezas
- * controle do perfil de dopagem

2 - Formação de compostos.

- * Óxido de silício
- * Nitreto de silício

3 - Introdução de desordem.

- * Captura de impurezas
- * Controle da taxa de ataque ou oxidação do processo.

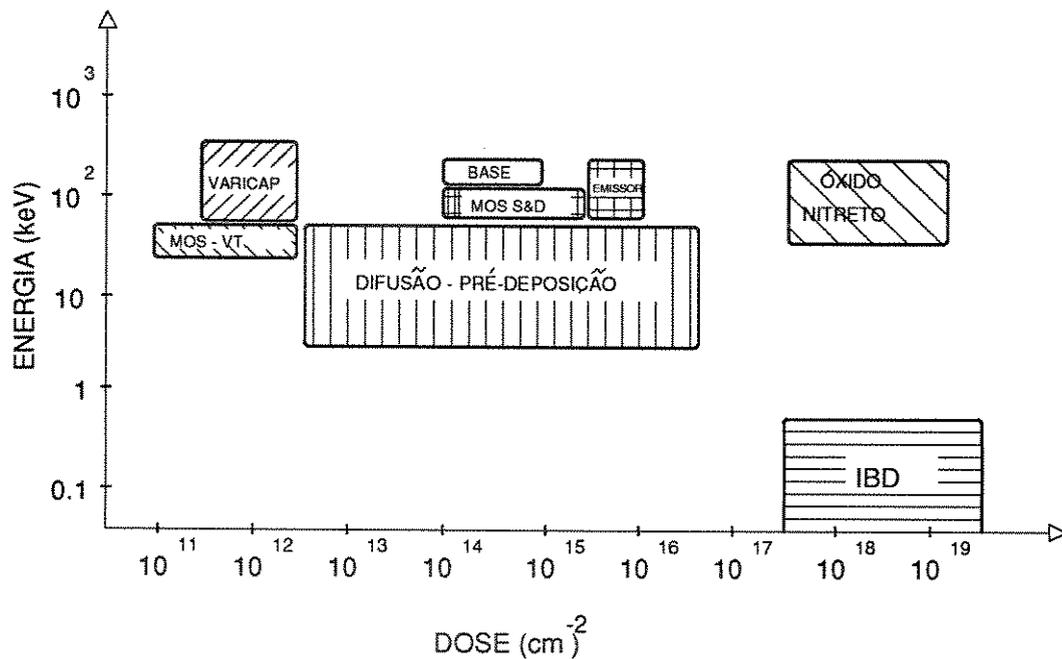
A controlabilidade tanto do perfil como da dose implantada é uma das principais vantagens da implantação iônica. Entretanto, como é bem conhecido, a uniformidade e a reprodutibilidade e em alguns casos o próprio método de medida da uniformidade, possuem alguns problemas técnicos de difícil solução. Os

processos LSI de hoje exigem uma uniformidade na implantação da lâmina no entorno de $\pm 1\%$.

Existem alguns fatores que podem deformar os perfis de implantação, dentre eles: o tunelamento e a ativação local de certas impurezas que ocorrem em conjunto com configurações especiais dos defeitos, resultando em um fenômeno com um efeito contrário ao do recozimento. Estes fenômenos podem ser perfeitamente controlados pela escolha adequada das condições de processo. O recozimento é usualmente feito em conjunto com o processo e não é necessariamente otimizado para refazer os danos das camadas atingidas. Muitas estruturas defeituosas continuam existindo mesmo após o processo de recozimento, especialmente quando a dose iônica é elevada ou quando algum elemento especial de impureza é introduzido. Estas estruturas, tais como linhas deslocadas, anéis e redes são formadas a partir de defeitos primariamente gerados. Os efeitos elétricos destes defeitos secundários e terciários ainda não são compreendidos totalmente. Em dispositivos onde as camadas implantadas permanecem em regiões ativas e a dose de íons é alta, como a região da base de um transistor bipolar, a implantação continua sendo um processo inviável.

A formação de compostos ainda não é amplamente utilizada no processamento do silício, no entanto a implantação de altas doses de oxigênio ou nitrogênio para a formação de óxidos ou nitretos, vêm sendo aplicada com maior intensidade na fabricação de novos dispositivos. A introdução de desordem, ou destruição da rede cristalina, é intencionalmente aplicada em várias partes do processamento do silício, por exemplo, para definir regiões ativas de lasers semicondutores ou para criar resistores integrados de alto valor de resistência. Uma outra aplicação importante da implantação é no controle da taxa de ataque ou oxidação. Na fabricação de estruturas integradas complexas, especialmente quando o tamanho dos dispositivos elementares tornam-se cada vez menores, o controle local da velocidade do processamento fica cada vez mais importante.

A figura III.1 nos mostra o campo de aplicação da implantação em dispositivos de silício como uma função da energia e da dose. Aplicações com baixas doses, como por exemplo, para o controle da tensão de limiar em dispositivos MOS ou da curva capacitância-tensão de varicapes, possuem uma relação muito estreita. Após um período de recozimento adequado, os problemas que podem ocorrer devido aos defeitos remanescentes são desprezíveis, entretanto, um controle preciso da reprodutibilidade da dose é essencial neste intervalo.



• FIGURA III.1 - APLICAÇÕES DA IMPLANTAÇÃO IÔNICA

No intervalo de doses médias, podemos citar as seguintes aplicações: a formação de fonte e dreno em dispositivos MOS, a formação da região do poço em dispositivos CMOS, a região do canal nas junções FETS e a região da base em transistores bipolares. As doses usualmente utilizadas para estas aplicações estão entre 10^{14} e 10^{15} cm^{-2} . O recozimento é usualmente feito durante o processo de

difusão para alcançar a profundidade requerida da junção. As limitações dos implantadores para assegurar a continuidade do processo não são rigorosas para este intervalo, além do que os efeitos secundários causados pelos defeitos residuais são menores, exceto em casos não usuais.

No intervalo de doses altas, a capacidade da máquina para aumentar a taxa de dopagem em conjunto com um aquecimento não uniforme feito pelo feixe [9], impedem o uso pleno deste intervalo devido a certas incertezas que ainda persistem no processo. Os maiores problemas neste intervalo são obviamente os defeitos residuais e sua influência nas características dos dispositivos.

No limite superior do intervalo de altas doses temos a formação de compostos e a deposição de partículas por feixe de íons

III.2 - Especificação do Equipamento.

Através do breve resumo feito no ítem anterior pudemos observar a ampla gama de dopagens com que se trabalha normalmente na fabricação de semicondutores. Portanto é necessário que se construa um equipamento que possa efetuar medidas em todo o intervalo de interesse.

Existem ainda outros fatores que devem ser levados em consideração, como por exemplo, a intensidade da corrente de feixe, a qual tem uma influência direta no tempo total de implantação, bem como as limitações do implantador a que este equipamento se destina. A análise destes fatores, balizaram os nossos estudos possibilitando-nos a geração das seguintes especificações para o equipamento.

- Limite de corrente: 100 nA até 10 mA
- Precisão na dose: $\pm 1\%$ da leitura
- Limite de dose: 1×10^{10} até 9.999×10^{17} íons/cm²
- Limites de área: 0,1 até 255 cm² com resolução de 0,1 cm²
- Tempo de implantação: mínimo 5 seg máximo 18 horas

III.3 O Dosímetro

O objetivo do equipamento de medida de dose implantada é fazer com que uma amostra com uma área conhecida receba uma quantidade de íons pré-determinada. Para alcançá-lo é necessário que se meça a quantidade de íons incidentes sobre a amostra, o que é feito de uma maneira indireta através da medida da corrente de elétrons necessária para manter a amostra em um potencial fixo. Portanto podemos dizer que o dosímetro é basicamente um medidor de corrente de precisão. O método desenvolvido para a medida da corrente foi o do acúmulo de cargas em um elemento capacitivo, com um processamento posterior desta informação por um circuito de controle. O equipamento em si possui uma partição natural que será utilizada para compreendermos melhor o seu funcionamento. Ele pode ser dividido em três partes:

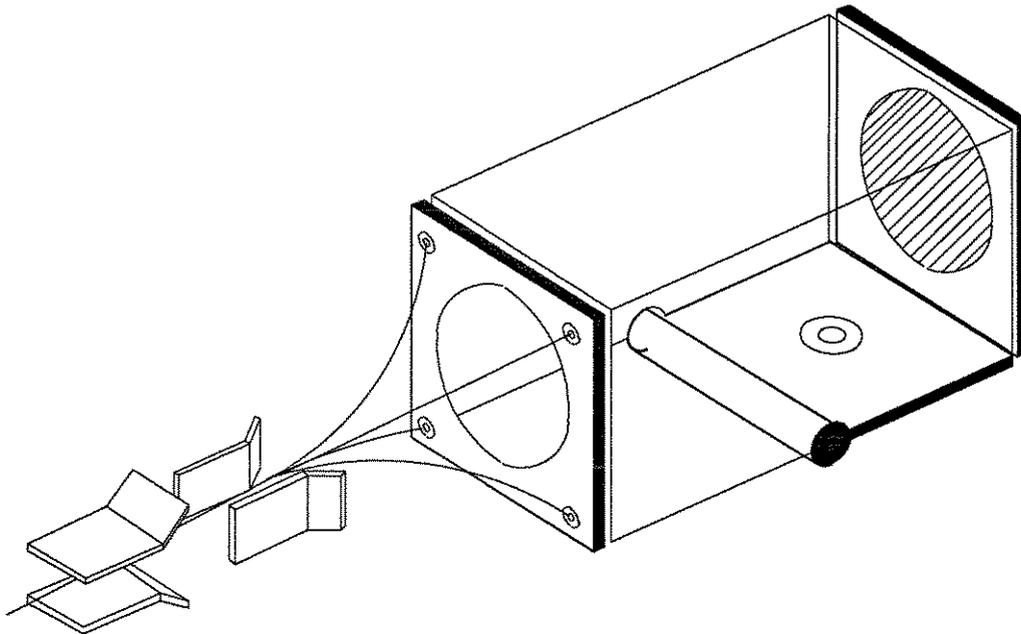
A primeira parte corresponde ao circuito de medida de corrente, que tem características de um circuito analógico e é a que inspira maiores cuidados no projeto, pois dela depende a precisão com que as medidas serão efetuadas. Devido à configuração adotada no implantador de íons, este circuito deverá estar em alta tensão. A segunda parte corresponde ao circuito de controle e monitoração das medidas, o qual possui características de um circuito digital. A terceira parte corresponde à interface entre o circuito de medida e o de controle, sendo a responsável pela isolação entre as partes em alta e baixa tensão.

A parte analógica do circuito deve ser capaz de efetuar medidas em toda a faixa prevista para as doses de implantação. Várias são as possibilidades de implementação de um circuito que atenda estas necessidades. Dentre elas, podemos salientar um circuito com um integrador de corrente, encadeado por um amplificador logarítmico que operasse nas oito décadas. Esta solução seria de difícil realização, necessitando de uma lógica de controle e de circuitos de compensação e calibração muito complicados.

Uma segunda implementação possível seria a de um circuito com ganho comutado que acumulasse uma certa quantidade de cargas em um capacitor. A tensão sobre o capacitor está linearmente relacionada com a carga, e portanto com a dose. Dessa forma a dose implantada poderia ser obtida pela medida direta da tensão sobre o capacitor através de um voltímetro de precisão. Esta solução foi implementada em um trabalho anterior [10] e na prática não se mostrou muito adequada para este tipo de implantador, pois as correntes de fuga envolvidas no circuito e a alta sensibilidade do equipamento a certas condições adversas que ocorrem durante uma implantação, como por exemplo, o faiscamento das fontes de alta tensão, nos levaram a abandoná-la. No entanto a idéia básica do acúmulo de carga em um capacitor é uma solução bastante viável, e foi aproveitada para a implementação do primeiro protótipo do medidor de dose implantada.

III.3.1 - Sistema de Controle de Dose do Implantador

Para compreendermos melhor o funcionamento do circuito que utilizamos na construção do primeiro protótipo do dosímetro, seria útil nos familiarizarmos um pouco mais com os princípios do sistema de controle de dose de implantação. A figura III.2 nos mostra um diagrama esquemático, onde podemos ver a lâmina a ser implantada presa a um suporte formando o fundo de um copo de Faraday.



- FIGURA III.2 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE MEDIDA NA CÂMARA DE ALVO.

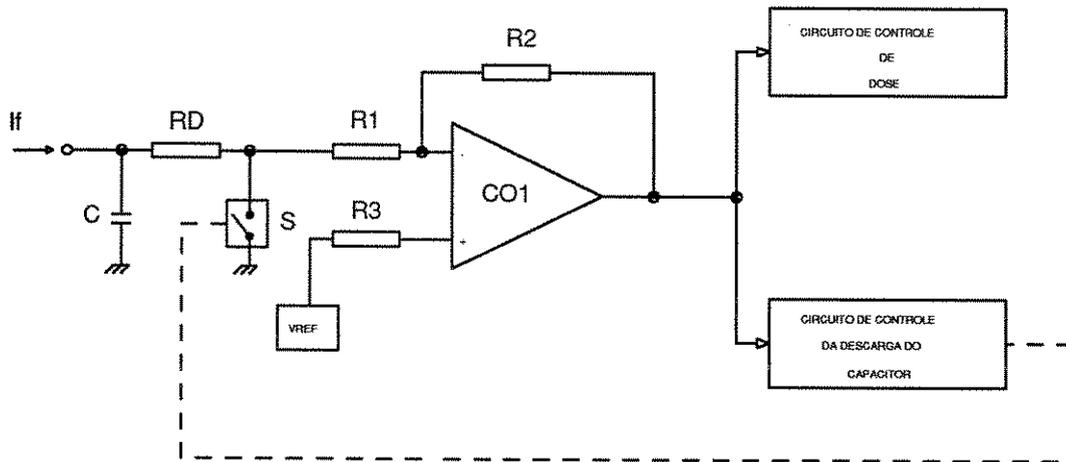
A parte anterior do copo de Faraday é formada por uma máscara, ligada ao terra local, que serve de anteparo para o feixe incidente. Existem quatro pequenos copos montados sobre a máscara que serão utilizados para a monitoração da uniformidade da implantação. O feixe possui uma varredura a fim de que a quantidade de cargas implantadas em toda a lâmina seja uniforme, sendo que a área coberta pela varredura é tal que inclui completamente os sensores de uniformidade (figura II.2). Os íons que passam através da abertura são implantados na lâmina, fazendo com que uma corrente elétrica vinda do terra local chegue à amostra de maneira a neutralizar as cargas dos íons implantados, mantendo assim a amostra em um potencial constante.

Esta corrente elétrica é medida pelo circuito analógico e enviada para o circuito digital, que através de um processador determina a dose (em íons/cm²) recebida pela lâmina. No instante em que a dose for igual á selecionada pelo operador, um anteparo é acionado para impedir que a corrente de feixe continue incidindo sobre a amostra. Este sistema prevê ainda a possibilidade da utilização de um alimentador automático de lâminas, que faria com que a lâmina implantada fosse retirada da câmara de alvo e reciclaria uma nova lâmina para ser implantada.

III.3.2 - Circuito de Medida de Quantidade de Carga.

A idéia básica deste circuito é muito simples e pode ser vista através do diagrama da figura III.3. A corrente de feixe I_f acumula uma carga no capacitor C fazendo com que a tensão na entrada do comparador CO_1 aumente gradativamente. A tensão na saída do comparador varia da seguinte forma: Quando a tensão no capacitor atinge o mesmo valor da tensão de referência V_{ref} , o comparador vira fazendo com que o capacitor se descarregue através da chave S . O mesmo pulso que faz com que a chave S feche atua no circuito de controle de dose incrementando um contador. A carga acumulada no capacitor pode ser dada por $Q = C \cdot V$ onde C é dado em Farads, V em volts e Q em Coulombs. Então para uma determinada tensão de referência V_{ref} e uma capacitância C_1 teremos uma carga $q_0 = C_1 V_{ref}$ acumulada no capacitor. Se considerarmos a corrente de feixe I_f igual à corrente de elétrons I_e , ou seja, para cada íon monoionizado que chega à amostra corresponda um elétron, e q_0 uma unidade básica de carga, para sabermos a quantidade total de cargas implantadas pela corrente de feixe I_f em um tempo t basta contarmos o número de vezes que o capacitor se carregou com q_0 .

$$Q_{total} = n q_0 \quad (III.1)$$



• FIGURA III.3 - CIRCUITO DE MEDIDA DA QUANTIDADE DE CARGA

Sabemos ainda que a uma corrente de 1 Ampère por segundo corresponde uma carga de 1 Coulomb, ou seja, um fluxo K de elétrons por segundo.

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{seg} = K \cdot q \quad (\text{III.2})$$

A carga do elétron vale $1,6 \times 10^{-19}$ Coulombs, portanto nas condições de monoionização a uma corrente de 1 Ampère corresponderá um fluxo de $6,25 \times 10^{18}$ íons/seg. A dose de implantação é dada em íons/cm², portanto se soubermos a área da amostra implantada podemos calcular a dose D através da seguinte relação:

$$Q_t = I \cdot t = D \cdot A \cdot q \quad (\text{III.3})$$

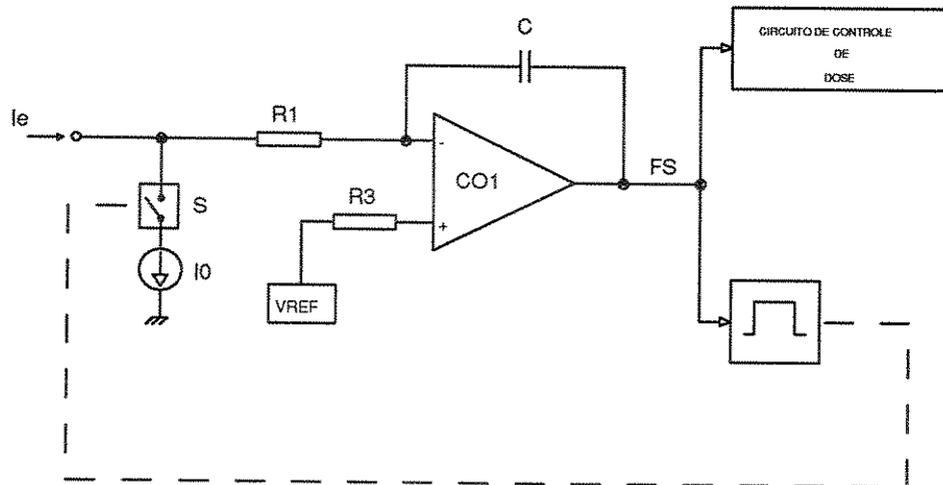
$$D = I \cdot t \cdot K / A \quad (\text{III.4})$$

onde ,

- D é a dose em [íons/cm²]
- I é a corrente de elétrons em [A]
- t é o tempo de implantação [s]
- A é a área da amostra em [cm²]

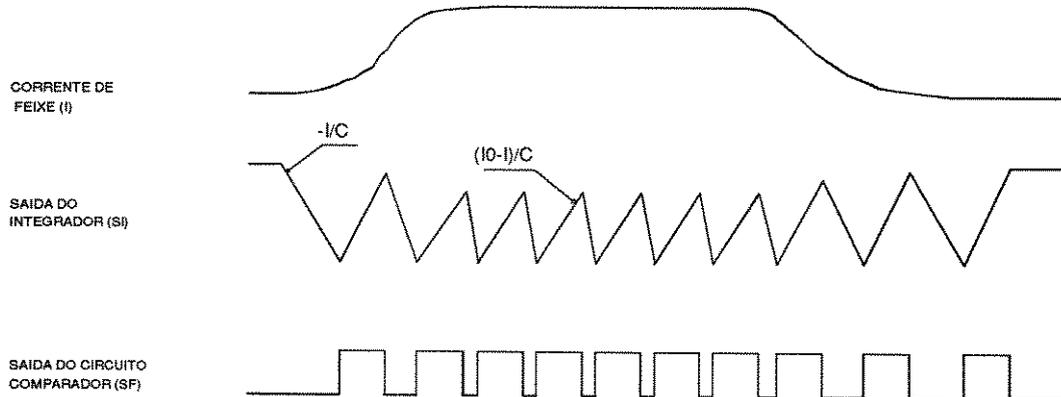
Este circuito no entanto apresenta uma fonte de erro, pois durante o tempo em que o capacitor se descarrega a corrente de feixe continua incidindo sobre a amostra o que faz com que uma parte da corrente implantada deixe de ser considerada. Este erro poderia tornar-se significativo nas implantações com altas doses, pois para não aumentarmos demais o tempo de implantação é necessário utilizar-se de correntes relativamente elevadas, aumentando assim o Δq de carga perdida durante a descarga do capacitor.

Para contornar este problema resolvemos modificar ligeiramente o circuito de tal forma a compensar a corrente perdida durante a medida. O circuito da figura III.4 nos mostra a nova configuração que foi escolhida para a implementação do circuito analógico de medida de corrente.



• FIGURA III.4 CIRCUITO DE MEDIDA DE CARGA UTILIZADO NO DOSÍMETRO.

A idéia básica deste circuito é igual à anterior, alterando-se somente o processo de descarga do capacitor. A corrente de entrada I_e é integrada pelo amplificador operacional até o limite do nível limiar do comparador. Quando isto ocorre, um pulso com um intervalo de tempo bem definido faz com que a chave S seja fechada. Uma corrente negativa de precisão I_0 é aplicada ao integrador durante este período, retirando uma quantidade de carga precisa e conhecida. A figura III.5 ilustra o funcionamento do circuito durante uma varredura do feixe sobre a amostra.



• FIGURA III.5 - FORMA DE ONDA DO CIRCUITO DE MEDIDA DE DOSE.

Toda a carga que entra pelo terminal I_e é descarregada dessa maneira, onde cada pulso de saída corresponde a uma certa quantidade de carga suprida pela fonte de corrente I_0 . O *off-set* do sistema, que é uma das fontes de erro, é determinado pelo amplificador operacional e pela fuga de corrente através da chave S. A variação no ganho é uma função somente de um intervalo de descarga e da estabilidade da fonte. Este princípio é conhecido como integração de dupla rampa e apresenta uma série de vantagens [11] a saber:

Os diversos erros do integrador estão presentes durante a subida e a descida da rampa e se cancelam mutuamente, a precisão da conversão depende somente da precisão e estabilidade da referência, as especificações, normalmente rigorosas quanto a estabilidade dos resistores e capacitores do integrador são relaxadas, as interferências das fontes de tensão presentes no sinal de entrada são também integradas no período, o que significa que sua contribuição é zero e devido à integração o ruído também é suprimido. Este método é altamente preciso e linear e sua principal desvantagem é que ele não pode ser usado em sistemas muito rápidos.

CAPÍTULO IV

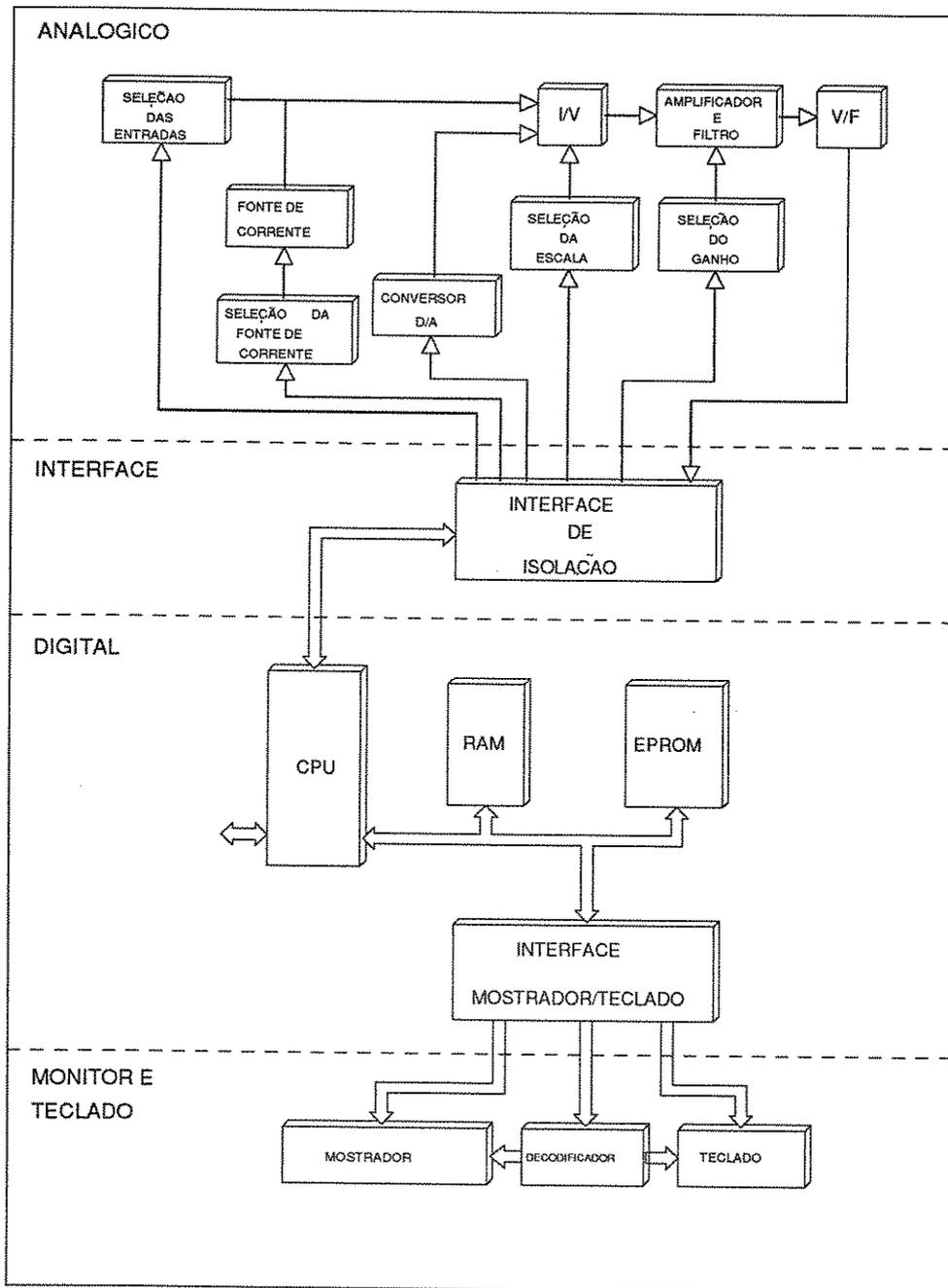
IV.1 - Descrição do Circuito

A figura IV.1 nos mostra um diagrama em blocos de todo o circuito do medidor de dose implantada (dosímetro). Os circuitos que compõem o dosímetro dividem-se em quatro partes: circuito analógico, circuito de interface, circuito digital e circuito do mostrador e teclado. Cada uma destas partes está constituída fisicamente em uma placa de circuito impresso diferente. Faremos a seguir uma descrição geral da teoria dos circuitos analógicos e digitais, seguida por uma explicação detalhada de cada uma das placas que compõem o equipamento.

IV.1.1 Circuito Analógico

A função básica do circuito analógico é converter corrente em frequência. Através das relações apresentadas anteriormente, podemos estabelecer uma correspondência entre uma certa quantidade de corrente integrada e um pulso na saída do circuito analógico. Assim, a medida da corrente de integração se transforma em uma simples contagem de pulsos.

Um amplificador operacional força a corrente de entrada a fluir através de um resistor de realimentação, fornecendo uma tensão de saída que é



• FIGURA - IV.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO DOSÍMETRO

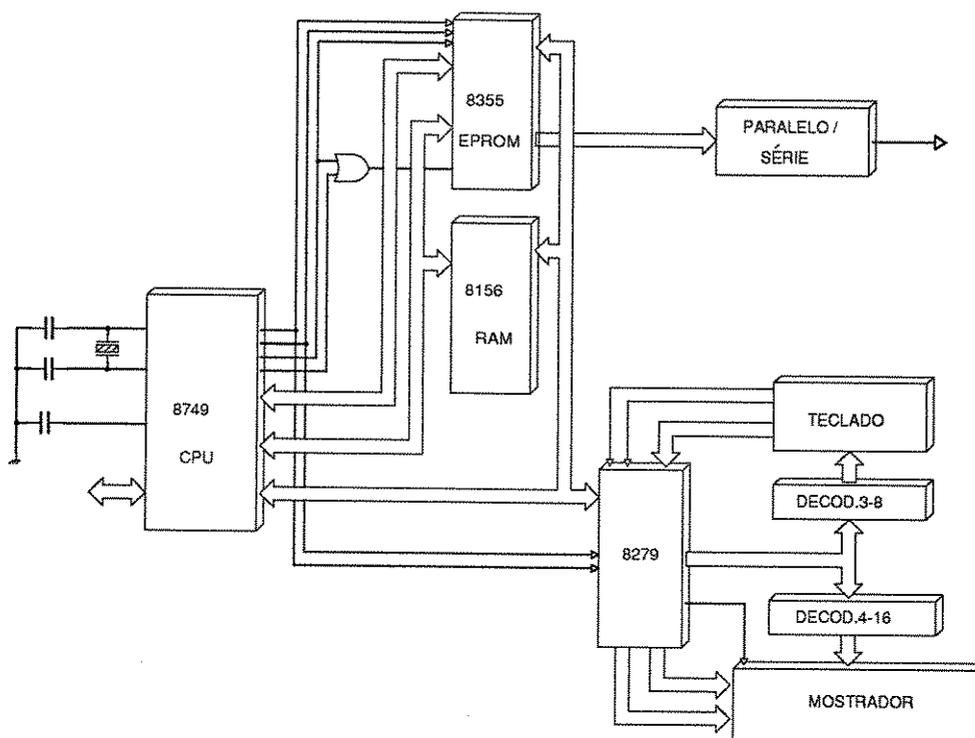
proporcional à corrente de entrada (I/V). Esta tensão é então aplicada a um estágio de filtragem e estabilização do ganho (amplificador e filtro), e em seguida é aplicada a um conversor tensão-frequência (V/F), que é formado por um integrador de dupla rampa projetado de tal forma a oferecer uma boa imunidade aos desvios térmicos por um longo tempo. Os circuitos restantes são utilizados para o selecionamento do sinal de entrada, comutação de ganho e seleção da fonte de corrente de precisão. Devido à configuração do implantador, como vimos anteriormente, a placa analógica está localizada na região de alta tensão, por isto, foi necessária a implementação de um circuito de interface e isolamento com o circuito de controle.

IV.1.2 Circuito de Interface

O circuito de interface tem por finalidade a isolamento elétrica entre o circuito de medida e o de controle, mantendo no entanto a comunicação de dados entre eles. Isto será feito através de canais de comunicação utilizando fibras ópticas. Se fossem utilizados somente os fotoacopladores com os respectivos rabichos de fibra óptica, seriam necessários 21 canais de comunicação entre a placa analógica e a digital, sendo 17 de entrada e 4 de saída. Para se evitar este elevado número, foi implementado um circuito de comunicação serial, reduzindo o número de canais para apenas 4. Todos os sinais de controle e monitoração entre os dois circuitos são digitais e de baixa frequência, evitando-se assim a implementação de circuitos visando a correção das não linearidades introduzidas nas transmissões de sinais analógicos.

IV.1.3 Circuito Digital

A figura IV.2 nos mostra um diagrama em blocos do circuito digital do dosímetro. Ele é constituído por uma CPU, uma expansão de memória ROM,



• FIGURA - IV.2 - DIAGRAMA EM BLOCOS DA PLACA DIGITAL

uma expansão de memória RAM, um conversor paralelo-série e uma interface entre o microprocessador e os circuitos de entrada e saída de dados situados no painel central.

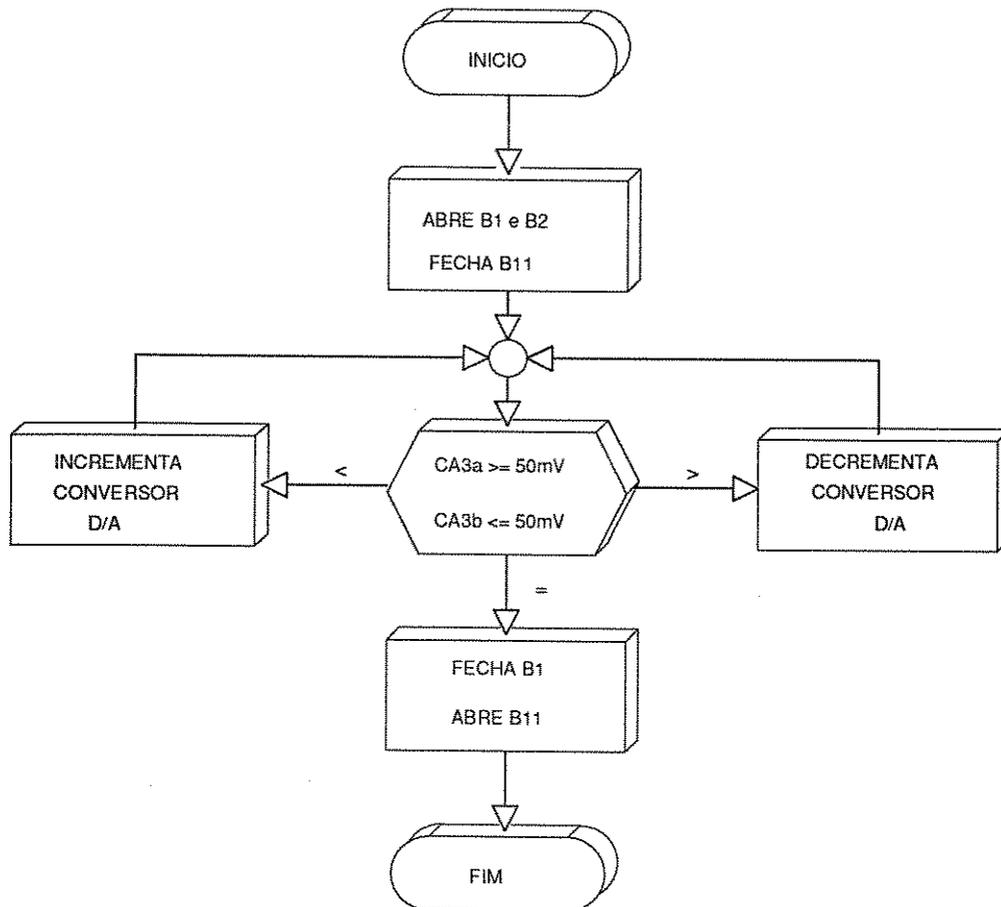
A área a ser implantada pode ser programada e é utilizada por uma rotina de *software* para converter as cargas acumuladas na amostra (em Coulombs), que são obtidas através da monitorização dos pulsos de saída do conversor (V/F), para dose (em íons/cm²). O microprocessador também controla os vários modos de operação do equipamento, os circuitos de entrada e saída de dados, diversas funções na placa de circuitos analógicos, além de poder ser programado para controlar um canal serial de entrada e saída de dados digitais.

IV.2 Placa do Circuito Analógico (PA)

A figura A-1 do apêndice A apresenta o diagrama esquemático do circuito da placa analógica. O amplificador operacional 3140 (CA1) é um circuito de baixa fuga e alta velocidade que serve como um conversor de corrente para tensão (I/V). A realimentação é composta por um conjunto de seis resistores separados (R1 até R6) que são ligados ou desligados através de um chaveamento feito por relês (B3 até B8). Os relês são controlados por um decodificador 7445 (CA4).

Os limites efetivos das resistências de realimentação vão desde 100Ω até $10M\Omega$ variando em décadas. O amplificador operacional 2905 (CA2) atua como um filtro passa-baixa e inversor. Seu ganho é controlado por B10 fazendo com que a tensão máxima na sua saída seja 5,0V para qualquer limite de corrente. O filtro passa-baixa executa diversas funções, entre elas: a média do sinal de alta velocidade visto na saída do estágio (I/V), cujo valor instantâneo de pico pode alcançar dez vezes o valor máximo da escala; atenua o ruído A.C., especialmente 60 Hz, que pode ser significativo para os limites de baixa corrente e finalmente reduz a possibilidade de não linearidades induzidas na virada do conversor tensão-frequência (V/F), uma vez que este estágio será submetido a uma forma de onda muito lenta. O conceito relacionado ao funcionamento do módulo (V/F) e a forma como ele será utilizado no circuito já foram mencionados no ítem III.3.2. No ítem subsequente faremos uma análise mais detalhada da utilização deste componente devido à sua grande importância para o circuito.

O microprocessador controla o *off-set* de (CA1) utilizando dois integrados adicionais: o comparador LM339 (CA3) e o conversor D/A (CI6). Este procedimento, que será tratado daqui em diante como rotina de auto-zero, é controlado por *software* e segue o fluxograma da figura IV.3.



• FIGURA - IV.3 - FLUXOGRAMA DA ROTINA DE AUTO-ZERO

- 1- O microprocessador abre as entradas de corrente através dos relês B₁ e B₂. Aumenta o ganho de CA₂ de 20 vezes através do acionamento de B₁₁.
- 2- Verifica as saídas dos dois comparadores CA_{3a} e CA_{3b} e determina quando a saída de CA₂ é maior, menor, ou está em uma faixa de 50mV no entorno do potencial de terra.
- 3- De acordo com o resultado do passo (2) o micro ou salta para o passo (4) ou incrementa/decrementa os valores apropriados nas entradas do conversor D/A. O D/A estabelece uma referência para o amplificador operacional trabalhando como uma *alavanca* para forçar a saída de CA₂ para zero volts. Após um incremento ou decremento o micro retorna para o passo (2).

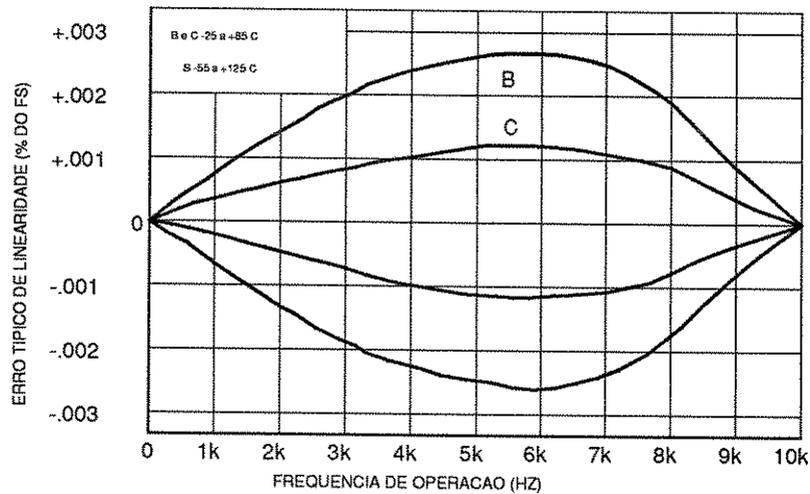
- 4- Quando este passo for alcançado, a saída de CA₂ está com ± 50 mV do zero o que corresponde à $\pm 2,5$ mV em operação normal, ou a 0,05% do valor da tensão de fundo de escala neste nó. As ações do passo (1) são revertidas e o micro sai da rotina de auto-zero.

Como a variação do *off-set* do módulo (V/F) é menor do que 2,5mV, a especificação do *off-set* total do circuito analógico está garantida por esta rotina.

IV.2.1 Módulo V/F

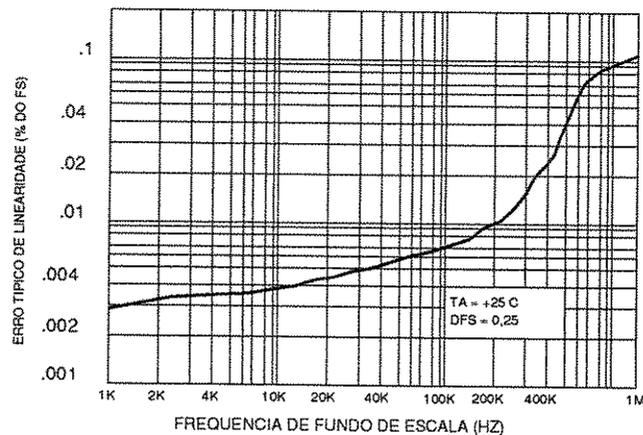
Ao invés de implementarmos o circuito apresentado na figura III.4 com componentes discretos, optamos pela utilização de um conversor (V/F) integrado (VFC62), utilizando-o para gerar os pulsos correspondentes a uma certa quantidade de carga retirada do capacitor de integração. As propriedades de suas entradas integradas possibilitam a sua utilização em ambientes ruidosos. A combinação da alta precisão e linearidade com pequenas variações em função da temperatura, frequentemente são características que proporcionam uma performance inatingível com outras técnicas. Uma precisão elevada pode ser obtida ($\pm 0,005\%$ max. de não linearidade a 10 KHz) com relativamente poucos componentes externos: um resistor e dois capacitores.

Faremos a seguir uma análise das especificações do conversor (V/F) uma vez que a precisão na medida da dose implantada está diretamente relacionada com o desempenho deste circuito. Iniciaremos pela linearidade que é a medida verdadeira do desempenho do conversor e é uma função da frequência do fundo de escala. Na figura IV.4 [12] podemos avaliar o erro típico de linearidade em função da frequência de operação. As melhores linearidades são obtidas com ganhos baixos ($\Delta F_s/\Delta V_e$) e com pontos de operação tão próximos quanto possível da frequência de fundo de escala escolhida. A figura IV.5 [12] nos mostra a variação da linearidade para uma dada frequência de fundo de escala, em função da variação do ponto de operação. A estabilidade da frequência em função da



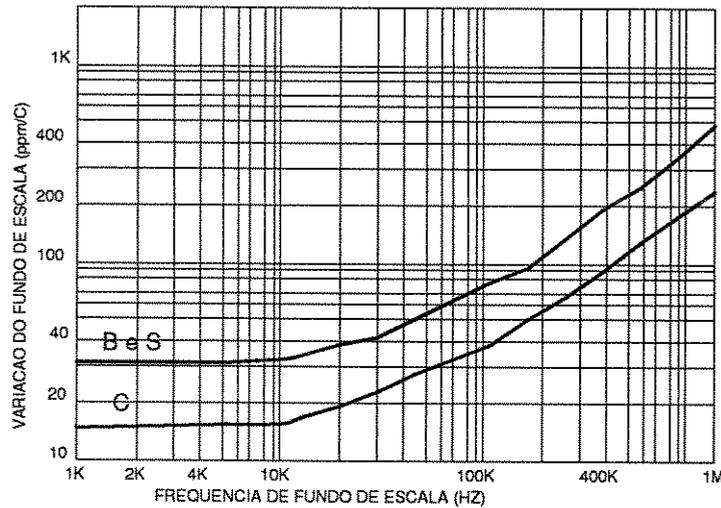
• FIGURA - IV.4 - ERRO TÍPICO DE LINEARIDADE VERSUS FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

temperatura também é um importante fator a se considerar. Ela é expressa em partes por milhão do intervalo de variação da frequência de fundo de escala por °C. Através da figura IV.6 [2] podemos ver que ela aumenta consideravelmente acima de 10 KHz. Para se obter uma medida mais precisa da variação total com a temperatura, para frequências acima deste valor, é necessário que se some as variações dos componentes externos, especialmente R_1 e C_1 , à variação do conversor.



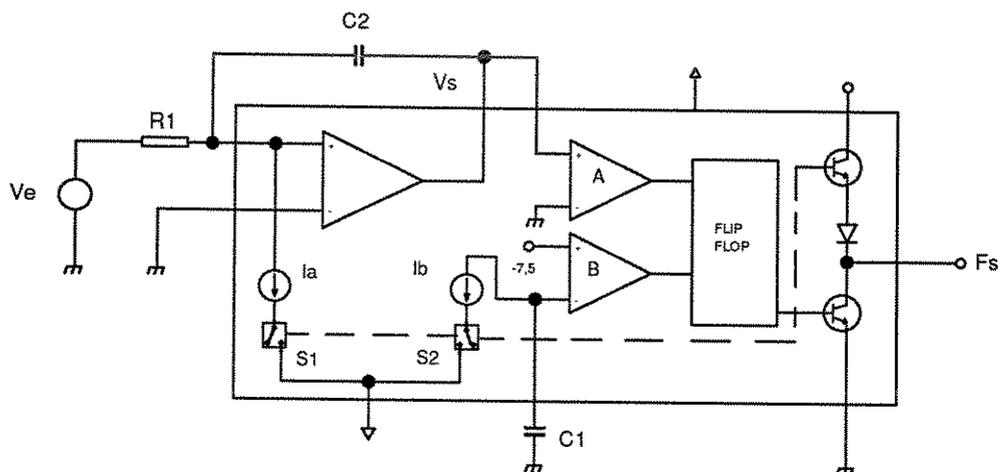
• FIGURA -IV.5 - ERRO TÍPICO DE LINEARIDADE VERSUS FREQUÊNCIA DE FUNDO DE ESCALA

O conversor VFC62 provê um trem de pulsos digitais na saída cuja taxa de repetição é diretamente proporcional à tensão de entrada. O circuito pode ser visto na figura IV.7 e é composto por um amplificador de entrada, dois comparadores e um flip-flop (que formam o circuito que dispara um pulso), duas fontes de corrente ligadas através de chaves e um estágio de saída com um transistor em *pull-up*. O amplificador de entrada atua essencialmente como um



• FIGURA - IV.6 - VARIAÇÃO DO FUNDO DE ESCALA VERSUS FREQUÊNCIA DE FUNDO DE ESCALA

integrador produzindo uma rampa de duas partes (integração de dupla rampa). Quando uma tensão positiva é aplicada à entrada V_e , uma corrente fluirá através do resistor de entrada, fazendo com que a tensão em V_s comece a decrescer em direção ao zero, de acordo com $dv/dt = V_e/R_1C_1$. Durante este tempo a fonte que irá *drenar* corrente do capacitor está desligada. Note que este período depende somente da tensão V_e e dos componentes de integração. Quando a rampa atinge uma tensão próxima de zero, o comparador *seta* o flip-flop, o que ocasiona uma mudança no nível lógico da saída F_s de 0 para 1. As fontes de corrente são acionadas através das chaves S_1 e S_2 , fazendo com que a rampa de tensão mude de direção; seu período depende agora da corrente de drenagem de 1 mA conectada à entrada negativa do amplificador e da tensão de entrada.



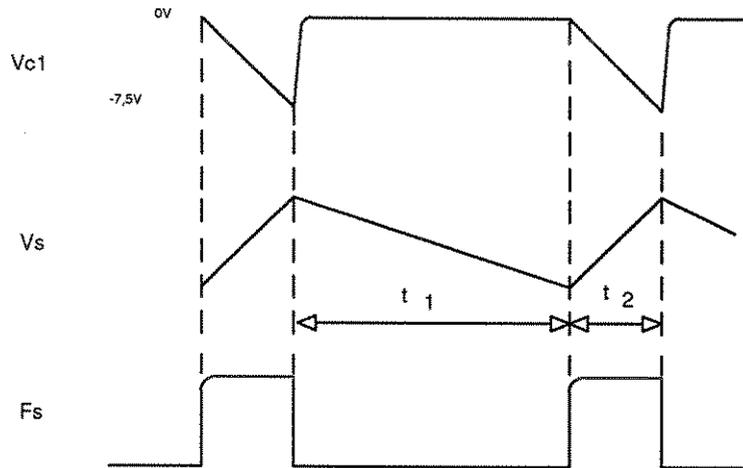
• FIGURA - IV.7 - DIAGRAMA DE CONEXÃO DO VFC62 PARA CONVERSÃO V/F

I_b que é uma fonte de corrente constante de 1 mA, começa a carregar C_1 até que sua tensão atinja $V_{c1} = -7,5$ V. Neste instante o comparador B *reseta* o flip-flop fazendo com que a rampa comece a descer novamente antes de saturar a entrada do amplificador. Os comparadores e o flip-flop formam um circuito que dispara um pulso cujo período é determinado pela referência de corrente interna de 1mA e pelo capacitor externo C_1 . Quando o flip-flop *reseta*, a tensão em F_s volta para o nível lógico 0 reiniciando um novo ciclo.

A figura IV.8 nos mostra as formas de onda envolvidas neste processo e através dela podemos obter a função de transferência para o VFC62 como sendo:

$$F_s = 1 / t_1 + t_2 \quad (IV.1)$$

no tempo $t_1 + t_2$ o capacitor de integração C_2 se carrega e descarrega sendo que a variação total de tensão neste nó é zero, então:



• FIGURA - IV.8 - FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR V/F

$$\Delta Q = 0 = I_e \cdot t_1 + (I_e - I_a) \cdot t_2 \quad (\text{IV.2})$$

$$I_e \cdot (t_1 + t_2) = I_a \cdot t_2 \quad (\text{IV.3})$$

como,

$$I_e = V_e / R_1 \quad (\text{IV.4})$$

de (IV.3) e (IV.4) vem,

$$t_1 + t_2 = t_2 \cdot I_a \cdot R_1 / V_e \quad (\text{IV.5})$$

substituindo (IV.5) em (IV.1) temos,

$$F_s = V_e / I_a \cdot R_1 \cdot t_2 \quad (\text{IV.6})$$

Sabemos ainda que durante o tempo t_2 , I_b carrega o capacitor C_1 até que sua tensão seja -7,5 V, então temos que:

$$t_2 = C_1 \cdot 7,5 / I_b \quad (\text{IV.7})$$

substituindo (IV.7) em (IV.6) temos:

$$F_s = (V_e / 7,5 R_1 \cdot C_1) \times (I_b / I_a) \quad (IV.8)$$

como $I_b = I_a$ vem,

$$F_s = V_e / 7,5 \cdot R_1 \cdot C_1 \quad (IV.9)$$

Uma vez que o capacitor de integração C_2 afeta tanto a subida como a descida da rampa de tensão, sua tolerância e seu coeficiente de temperatura não afetam a frequência de saída. Ele deve, no entanto, ter uma fuga de corrente muito pequena comparada com I_e , desde que este parâmetro será somado diretamente ao erro no ganho do conversor (V/F). C_1 que controla o período do pulso, deve ser muito preciso, uma vez que sua tolerância e seu coeficiente de temperatura introduzem erros diretamente na função de transferência.

No diagrama esquemático da placa analógica (figura A-1) podemos ver a configuração que foi adotada para o conversor (V/F). Os resistores de entrada R_8 e R_9 devem ser calculados para se obter uma corrente de entrada desejada à uma determinada tensão de fundo de escala. Normalmente se utiliza 0,25 mA a fim de se obter um *duty-cycle* de 25% na frequência de fundo de escala. R_9 é calculado em função da tolerância de C_8 . Tanto R_8 como R_9 devem possuir coeficientes de temperatura baixos uma vez que as variações de seus valores nominais são somadas diretamente à função de transferência. O capacitor C_9 é o responsável pela largura do pulso, durante o qual uma corrente de precisão será subtraída da corrente de entrada do conversor (V/F), retirando uma quantidade de carga precisa e conhecida, que será utilizada para determinar a dose implantada. Este capacitor deve possuir uma estabilidade com temperatura alta e uma fuga de corrente baixa. Recomenda-se a utilização de um capacitor cerâmico NPO e um cuidado especial com o projeto da placa, a fim de se eliminar as capacitâncias parasitas associadas a C_9 . O capacitor C_8 não aparece na função de transferência,

o que implica que sua variação em função da temperatura não é importante, porém devemos dispensar uma atenção especial às possíveis fugas de corrente associadas a ele.

Quanto aos componentes de ajuste temos: R12 que anula o *off-set* de tensão do amplificador de entrada e deve estar em uma faixa entre 10 K Ω e 100K Ω , além do que seu coeficiente de temperatura deve ser menor do que 100ppm/ $^{\circ}$ C. R14 pode ser um resistor de carbono com uma tolerância de 10% e com um valor de 10 M Ω . R9 é utilizado para anular os erros no ganho e compensar as tolerâncias de R8 e C8 e sua variação com temperatura não deve ser maior do que cinco vezes a de R8.

IV.3 Placa do Circuito de Interface (PI)

A figura A-2 do apêndice A apresenta o diagrama esquemático do circuito da placa de interface. O CI1 (LM3900) é um amplificador de corrente e juntamente com o sensor óptico configura o módulo receptor. Existem dois módulos receptores na placa (CI1 e CI2), sendo que um deles é utilizado para transmitir os dados para o controle dos circuitos da placa analógica. Estes dados formam uma palavra de 13 bits, onde os oito primeiros contém a informação da instrução a ser executada e os cinco últimos a informação do destino para a instrução. Os dados são enviados para os circuitos CI3 (74LS164) e CI4 (74LS96) que são dois *shift register* com entrada série e saída paralela. O CI3 armazena os oito primeiros bits e o CI4 os cinco restantes. O segundo módulo receptor é utilizado para enviar um sinal de relógio necessário para sincronizar a transmissão dos dados. Os dados referentes à instrução são comuns aos circuitos CI5, CI6 (74116) e CI7 (NE5018) que serão selecionados de acordo com o conteúdo dos últimos 5 bits. CI8, CI9, CI10 são utilizados para o carregamento das instruções no circuito selecionado assim que o micro termine de enviar os 13 bits. CI5 é um *latch* que controla a seleção das fontes de corrente de precisão, a seleção entre as saídas de

dados vinda do módulo (V/F) e do monitor de corrente e as saídas dos comparadores, durante a rotina de auto-zero. CI6 também é um *latch* e é responsável pelo controle dos resistores de realimentação de CA1, pelo ganho de CA2 e CA1 durante a rotina de auto-zero e pelo selecionamento das entradas de medida principal e de referência. CI7 é um conversor D/A que seria um circuito típico para estar junto ao microprocessador, no entanto ele foi colocado na placa de interface exatamente para se evitar a transmissão de um sinal analógico via fibra óptica. O conversor D/A é controlado pelo microprocessador, que utiliza as saídas do comparador CA3 para determinar se ele deve aumentar ou diminuir o nível de tensão D.C. enviado para a entrada não inversora de CA1, a fim de minimizar a tensão de *off-set* na saída do mesmo.

Apesar da preocupação em se transmitir somente sinais digitais através das fibras ópticas, um dos sinais é analógico. Ele é enviado para o monitor de feixe no painel do dosímetro, não sendo no entanto utilizado para medir a corrente de feixe e sim para um simples acompanhamento da corrente média durante uma implantação. Por isto foi implementado um circuito simples que possui uma linearidade aceitável para esta finalidade.

IV.4 Placa do Circuito Digital (PD)

A figura A-3 do apêndice A apresenta o diagrama esquemático do circuito da placa digital. O CD1 (8279) é um microprocessador de 8 bits auto-suficiente, que contém uma ROM de 2K x 8, uma RAM de 128 x 8, 27 linhas de entrada e saída, 2 níveis de interrupção, um contador/temporizador de 8 bits, um oscilador e um circuito de relógio. As 27 linhas E/S estão agrupadas em três portas de 8 bits que podem ser usadas como portas de entrada/saída ou bidirecionais. Os três bits restantes são utilizados como entrada e podem alterar a sequência do programa quando testados por instruções de salto condicional. Duas das portas são utilizadas para comunicação com os circuitos de expansão de

memória. O CD2 (8355) é uma memória ROM de 2k x 8 com duas portas de entrada e saída de 8bits. Essa expansão de memória foi implementada para possibilitar um programa monitor mais complexo incluindo o controle de uniformidade de dopagem. CD5 é um *shift-register* de 8 bits com entradas paralelas e saída série. Ele é utilizado para serializar os dados que serão enviados para a placa analógica. A comunicação entre CD5 e CD1 é feita através de uma das portas de E/S de CD2. CD3 (8156) é uma memória RAM de 256 x 8 e possui três portas de entrada e saída para uso geral, além de um contador/temporizador programável de 14 bits. CD4 (8279) é uma interface programável para o mostrador/teclado. A parte de interface com o teclado pode efetuar uma varredura em uma matriz de chaves de até 64 contatos, além de poder interfacear um conjunto de sensores, como por exemplo, sensores de efeito hall ou de ferrite. O teclado possui um circuito de *debounce* e uma FIFO que pode armazenar até 8 caracteres. A parte do mostrador possui uma memória RAM de 16 x 8 e pode ser utilizada para acionar tanto *displays* numéricos como alfanuméricos.

IV.5 Placa do Circuito Mostrador e Teclado (PMT)

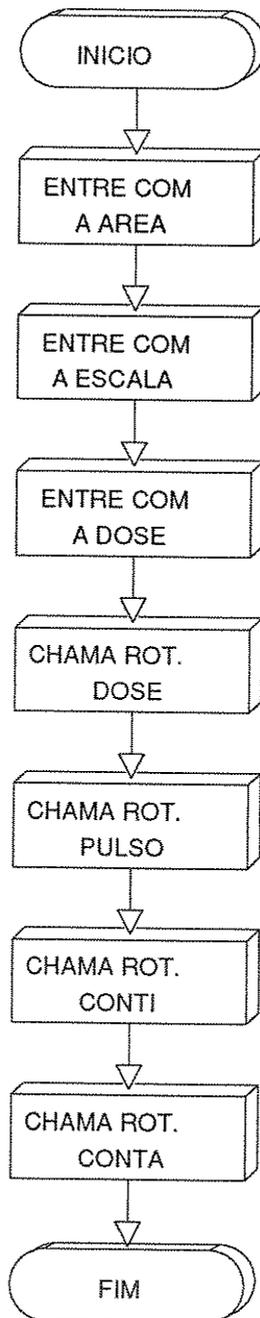
A figura A-4 do apêndice A apresenta o diagrama esquemático do circuito do mostrador e teclado. A placa do mostrador e teclado atua como uma interface de entrada e saída entre o operador e o microprocessador. Todas as chaves e *displays* do painel frontal estão montados sobre esta placa. Existem 10 *displays* do tipo indicador numérico de LED que são divididos em três partes: CM1 a CM4 formam a primeira parte que irá representar a mantissa da dose que está sendo implantada; CM5 e CM6 formam a segunda parte e representam o expoente dessa dose; a terceira parte é formada por CM7 a CM10 que especificam a dose desejada pelo operador, ficando implícito que o expoente é o mesmo representado por CM5 e CM6. CM11 (74LS42) é um decodificador de BCD para decimal, que é utilizado para efetuar a varredura sobre o conjunto de *displays* e sobre o teclado, que por

sua vez é utilizado para programar os vários modos de operação do dosímetro e as doses desejadas para uma determinada implantação. CM12 (74LS377) é um *latch* de 8bits utilizado para armazenar a informação da seleção da década do limite de corrente. As saídas de CM12 estão ligadas a dois decodificadores de BCD para decimal CM13 e CM14 (7445), com saídas em coletor aberto. As saídas dos decodificadores estão ligadas a um conjunto de sete *led's* bicolores. Seis deles são utilizados para indicar o limite da dose que está sendo medida em cada uma das escalas do amperímetro localizado no painel frontal do dosímetro. A escala verde possui uma marcação absoluta que vai de 0 a 3 e a escala vermelha uma marcação que vai de 0 a 10. Esta medida de corrente é utilizada pelo operador para um acompanhamento da corrente média durante uma implantação. O último *led* é utilizado para indicar quando o mostrador está exibindo a dose implantada (vermelho) ou o tempo de implantação (verde).

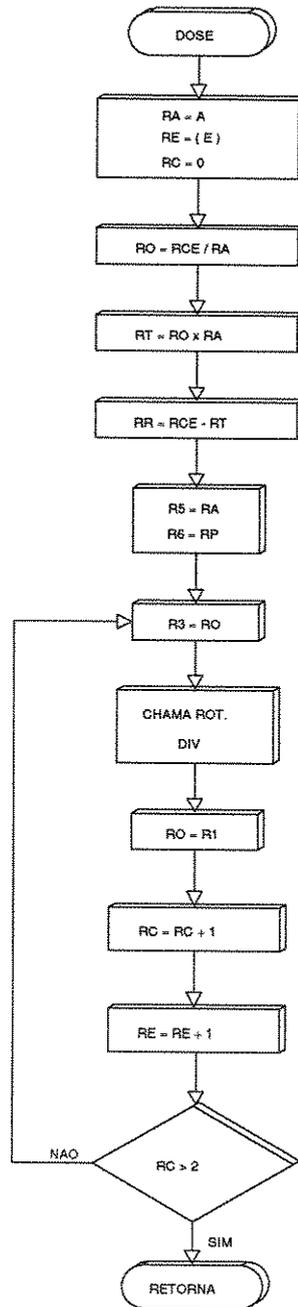
CAPÍTULO V

V.1 - Implementação do Programa Monitor

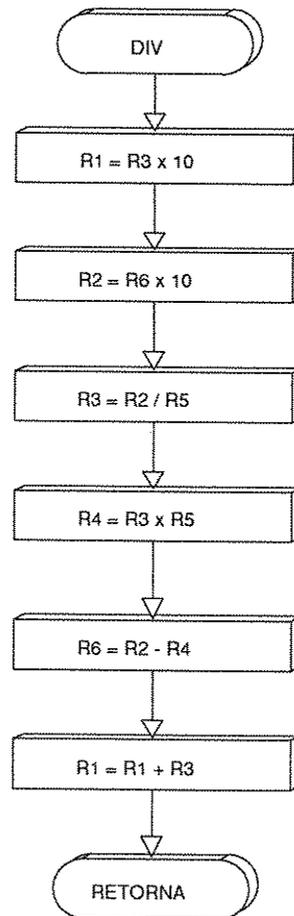
O sistema monitor é utilizado para o controle e diagnósticos do dosímetro. Ele deverá ser armazenado tanto na EPROM do microprocessador como na EPROM 8355. Quando o dosímetro é ligado um sinal de *reset* é enviado para o microprocessador, o que faz com que a posição zero da memória seja acessada. Nesta posição está o endereço da rotina que faz com que o equipamento fique operacional. O programa monitor assume então o controle das operações chamando a rotina que monitoriza o teclado e o mostrador. Através do teclado podemos programar o dosímetro para a operação desejada. Dentre as funções possíveis, existem algumas de auto-teste que verificam o funcionamento do teclado, *displays* e de partes do circuito através de uma interação com o operador. A expansão de memória EPROM 8355 foi prevista para que se pudesse implementar funções adicionais para o equipamento. No ítem subsequente descreveremos as funções existentes no teclado para o modo de operação normal do equipamento. O fluxograma abaixo representa a sequência de operações para uma implantação.



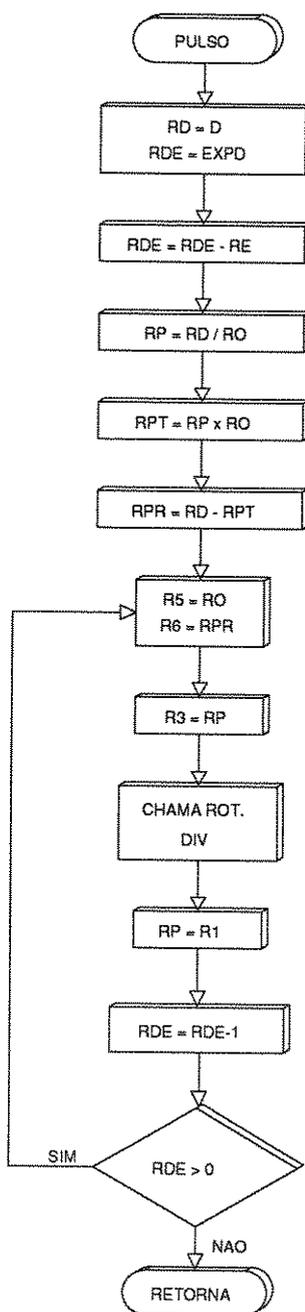
• FIGURA V.1 - FLUXOGRAMA DAS OPERAÇÕES DE UMA IMPLANTAÇÃO



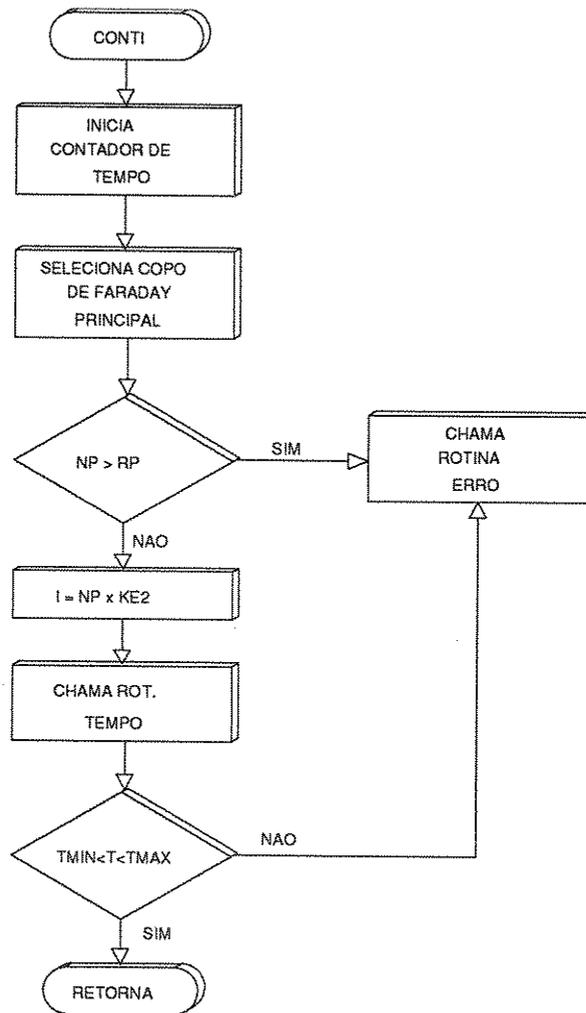
• FIGURA V.2 - FLUXOGRAMA DA ROTINA DOSE



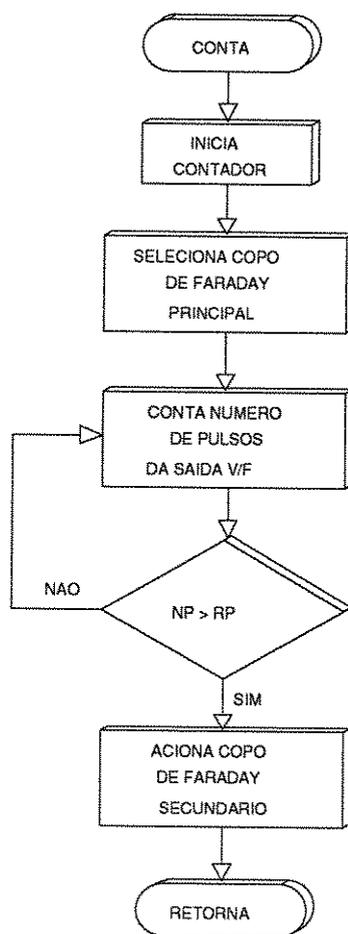
• FIGURA V.3 - FLUXOGRAMA DA ROTINA DIV



• FIGURA V.4 - FLUXOGRAMA DA ROTINA PULSO



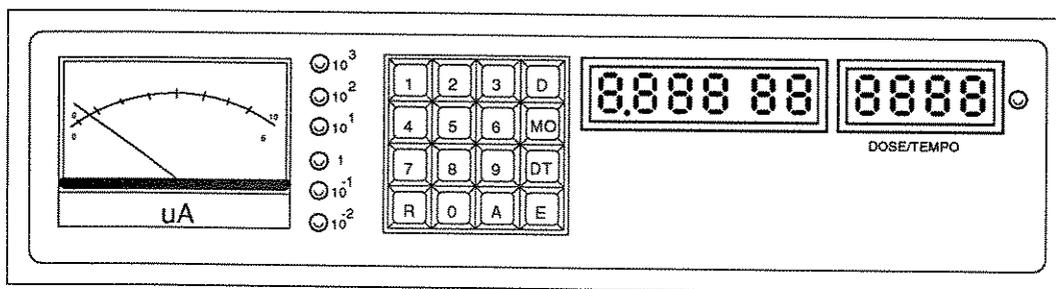
• FIGURA V.5 - FLUXOGRAMA DA ROTINA CONTI



• FIGURA V.6 - FLUXOGRAMA DA ROTINA CONTA

V.2 - Painel de Controle do Dosímetro

A figura V.7 nos mostra um diagrama do painel de controle projetado para o dosímetro.



- FIGURA V.7 - PAINEL DE CONTROLE DO DOSÍMETRO
- (1) Medidor de corrente de feixe
 - # Este medidor indica a corrente de feixe média para a entrada do copo de Faraday selecionada. Existem duas escalas (0 - 5 e 0 - 10) indicadas em verde e vermelho respectivamente.
- (2) Indicação do limite de corrente
 - # A escala selecionada é indicada por um conjunto de seis *led's*. O limite de corrente para cada escala está indicado ao lado de cada um dos *led's*, sendo que eles valem respectivamente do menor para o maior: $10^{-2} \mu A$, $10^{-1} \mu A$, $1 \mu A$, $10^1 \mu A$, $10^2 \mu A$, $10^3 \mu A$. A cor do *led* indica qual das escalas do microamperímetro deve

ser lida; verde para a escala inferior (0 - 5) e vermelho para a escala superior (0 - 10).

- (3) Mostrador de dose pré-ajustada
 - # Este mostrador indica a quantidade de íons/cm² que será implantada na lâmina. Os quatro dígitos à esquerda do mostrador contêm a mantissa da dose pré-ajustada que deverá ser um número entre 1,000 e 9,999. Os dois dígitos à direita indicam o expoente correspondente, com limites entre 10 e 17.
- (4) Mostrador de dose implantada/tempo
 - # Este mostrador indica a dose total implantada em qualquer instante durante ou após uma implantação. Ao valor mostrado deve ser atribuído o mesmo valor do expoente do mostrador de dose pré-ajustada. Ao final de uma implantação o valor indicado por este mostrador deve ser igual ao da mantissa do mostrador de dose pré-ajustada. Através do teclado (tecla D/T) podemos selecionar o modo tempo de implantação. Durante este modo a indicação mostrada fornece o tempo total decorrido durante a implantação, e o tempo total de implantação quando esta tiver terminado. O *led* ao lado do mostrador indica em qual dos modos ele está operando. Quando o *led* estiver vermelho significa que o mostrador estará indicando a dose implantada, quando estiver verde o tempo de implantação.
- (5) Teclado
 - # Através do teclado podemos fornecer todos os dados necessários para uma implantação, bem como selecionar os vários modos de operação do equipamento.

- TECLA R
 - # O acionamento desta tecla inicia a operação do equipamento tornando o microprocessador apto para receber comandos. Durante uma implantação ela pode ser utilizada para interromper o processo. Para que isto aconteça é necessário que se aperte a tecla R ao mesmo tempo que a tecla D. Neste instante o microprocessador interrompe a implantação enviando um comando para bloquear a incidência de feixe sobre a amostra.

- TECLA A
 - # Esta tecla é utilizada para a seleção da área efetivamente varrida pelo feixe determinada pela máscara que esta sendo utilizada (item III.3.1). A unidade utilizada é o cm^2 e a precisão no ajuste da área é de 0.1 cm^2 . Quando esta tecla for acionada um ponto decimal irá acender entre o valor da mantissa e o do expoente do mostrador de dose pré-ajustada, que passa a indicar o valor da área desejada. Devem ser introduzidos quatro dígitos para o valor inteiro da área e cinco dígitos para o valor total. Assim se desejarmos uma área de 11.4 cm^2 , devemos teclar 0,0,1,1,4. Os valores possíveis de áreas a serem selecionados estão entre 1 e 128 cm^2 .

- TECLA D
 - # Esta tecla é utilizada para pré-ajustar o valor da dose desejada em íons/cm^2 . Quando ela for acionada aparecerá um " m " no campo da mantissa, indicando que o valor desta deve ser introduzido. Após a introdução do quarto dígito aparecerá um " E " no campo do expoente indicando que os dois números para o expoente devem ser teclados. No caso de se digitar um valor errado para a dose desejada a operação deve ser repetida.

- # O selecionamento correto dos valores da dose que será implantada minimizam os erros que resultam do cálculo final da dose. Quando possível deve-se selecionar a mantissa da dose com um número com valores entre 1,000 e 9,999, isto é, o ajuste $0,100 \times 10^{14}$ resulta em um erro de finalização maior do que $1,000 \times 10^{13}$, para a mesma dose efetivamente implantada.
- TECLA MO
 - # A tecla MO é utilizada para colocar o equipamento no modo de operação 0, que é o modo normal de operação.
- TECLA D/T
 - # Esta tecla é utilizada para selecionar o modo dose ou tempo para o mostrador dose implantada/tempo.
- TECLA E
 - # Esta tecla é utilizada para selecionar o limite de corrente de fundo de escala desejado. Após ela ter sido acionada o microprocessador irá aguardar que seja digitado um número entre 1 e 6. Estes números correspondem respectivamente às escalas 10^{-2} , 10^{-1} , 1, 10^1 , 10^2 , 10^3 . Caso uma tecla diferente da esperada seja apertada o microprocessador sai da rotina de seleção de escala.

V.3 - Procedimento para uma Implantação

As informações que o dosímetro necessita para efetuar o cálculo da dose implantada são: a área da amostra, a escala de corrente que será utilizada e o valor da dose desejada. Com estas informações e com as expressões abaixo o microprocessador pode determinar a dose implantada na amostra.

$$F = I \cdot 5000 / I_{FE} \text{ (item VI.1)} \quad (V.1)$$

$$D = I \cdot t \cdot K / A \text{ (item II.2)} \quad (V.2)$$

O procedimento para se iniciar uma implantação deve ser o seguinte:

- (1) Iniciar as operações TECLA R
 - # Quando a tecla R é acionada o microprocessador envia uma ordem para que o copo de Faraday secundário seja acionado e em seguida entra em uma rotina que aceita comandos para a programação de uma implantação.
- (2) Selecionar a área da amostra a ser implantada TECLA A
- (3) Selecionar a escala de corrente de implantação TECLA E
- (4) Selecionar a dose de implantação desejada TECLA D

Uma vez introduzidos estes dados, o microprocessador entra na rotina de operação e calcula:

- 1 - A quantidade de cargas associadas a um pulso na saída do conversor V/F
- 2 - O número de pulsos que ele deve contar para atingir a dose especificada
- 3 - A corrente de implantação que está atingindo o copo de Faraday secundário
- 4 - O tempo necessário para atingir a dose especificada com a corrente calculada

Feitos estes cálculos o microprocessador verifica se:

- * 1 - A corrente medida é compatível com a dose especificada
- * 2 - O tempo de implantação está dentro dos limites permitidos

Se uma das condições acima não for respeitada, uma mensagem de erro aparecerá no mostrador de dose implantada (ítem V.3). Caso contrário o equipamento está pronto para iniciar a implantação e a mensagem " OPEr " aparecerá no mostrador de dose/tempo. Quando o operador estiver pronto para iniciar a implantação ele deve acionar as teclas MO e 0 simultaneamente. O microprocessador envia uma ordem para desativar o copo de Faraday secundário e a implantação inicia. A dose/tempo acumulada pode ser lida a qualquer instante durante a implantação. Quando a dose estipulada for atingida, o copo de Faraday secundário é acionado e o mostrador de dose/tempo ficará piscando com o valor da dose medida.

V.3 - Mensagens de Erro

Quando a letra " E ", seguida por um número, aparecer no mostrador dose/tempo, significa que o microprocessador encontrou uma situação considerada inaceitável. Descreveremos a seguir as possíveis mensagens de erro indicadas durante a operação do equipamento.

- E0 e E1

Estas duas mensagens correspondem à uma indicação grosseira de "muito pequena" ou "muito grande" para a corrente de feixe em relação à escala e a área selecionadas. Note que a dose selecionada e não a corrente de feixe é que determina se existe ou não uma condição de erro. Se uma mensagem E0 aparece significa que um limite de corrente muito alto deve ter sido selecionado. Neste caso, a corrente de feixe não precisa ser reajustada. Contudo, visto que a precisão do instrumento aumenta no fundo de escala, pode ser desejável incrementar a corrente de feixe. Se

E1 aparecer, um limite de corrente pequeno pode ter sido selecionado e a corrente de feixe deve ser reajustada para um nível abaixo ou no fundo de escala. Estas mensagens de erro aparecem imediatamente antes do início da implantação. O microprocessador não irá aceitar o comando que o coloca no modo de operação zero.

- E2

Esta mensagem significa que a implantação excedeu 9999 seg. (2h 46min 39seg). Se for necessário monitorizar um tempo de implantação superior a este, um relógio externo deve ser utilizado. Apesar da mensagem de erro a implantação pode ser iniciada sem problemas.

- E3

Esta mensagem significa que o *off-set* analógico excedeu os limites do circuito de auto-zero, ou seja, o microprocessador não consegue estabelecer um valor para o *off-set* dentro dos limites especificados. O operador deve verificar se os circuitos correspondentes estão funcionando adequadamente.

- E4

Esta mensagem de erro aparece se o operador selecionar um expoente para a dose desejada fora dos limites permitidos (10 e 17).

CAPÍTULO VI

VI.1 - Caracterização do Dosímetro.

Dentre os circuitos que constituem o medidor de dose implantada, sem dúvida o principal é o circuito analógico por ter uma influência direta na precisão com que as medidas de dose são efetuadas. Por esta razão todo o trabalho de caracterização do equipamento foi desenvolvido a partir de dados obtidos deste circuito. A função básica desta placa é converter corrente em frequência de acordo com a fórmula

$$\text{Frequência de saída} = \frac{\text{corrente de entrada} \times 5000 \text{ Hz}}{\text{corrente de fundo de escala}}$$

Com esta relação estabelecida, o problema da integração da corrente de implantação fica reduzido a uma simples contagem de pulsos.

Ao contrario do circuito analógico, os circuitos que compõem as placas digital, de interface e teclado/mostrador não requerem maiores cuidados no projeto, uma vez que são puramente digitais e compostos por poucos integrados projetados para serem interligados entre si, além do fato de que serão utilizados muito aquém de suas capacidades. Dispensamos no entanto, todas as precauções necessárias para com o projeto da placa de circuito impresso e para com as fontes de alimentação destes circuitos.

Nos itens subsequentes passaremos a descrever as medidas e os resultados obtidos na caracterização desta placa.

VI.2 - Caracterização da Placa Analógica

Da análise do circuito da placa analógica (figura 1 - apêndice A) podemos identificar três blocos principais: o estágio de conversão corrente-tensão (I/V), o estágio de ganho e filtro (G/F) e o estágio de conversão tensão-frequência (V/F). Cada um destes blocos deve ser caracterizado isoladamente, por ser uma possível fonte de introdução de erros durante as medidas.

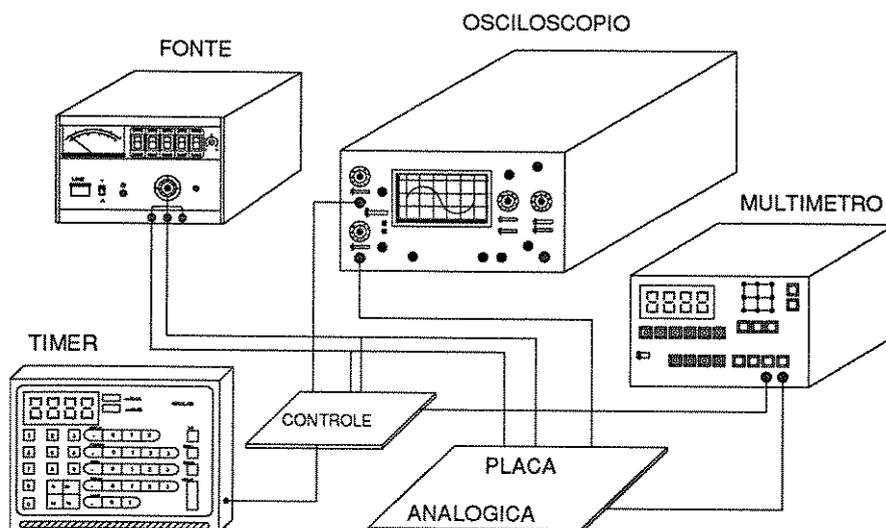
VI.2.1 - Montagem para a Caracterização da Placa Analógica.

O amplificador operacional do estágio de entrada (CA1) possui uma impedância típica de $1,5 \text{ T } \Omega$, necessitando de uma corrente de polarização (I_i) de 10 pA quando alimentado com $\pm 15 \text{ V}$. A tensão máxima de polarização (V_{i0}) é de 2 mV . Devido a estas características e por facilidade de implementação, usamos uma fonte de tensão de precisão ao invés de uma fonte de corrente para gerar o sinal de entrada do bloco (I/V). A figura VI.1 apresenta um diagrama da montagem que foi utilizada para a caracterização da placa analógica. Foi montada ainda uma fonte de corrente que será descrita em um item subsequente e que também foi utilizada nesta caracterização.

Os equipamentos utilizados nesta montagem foram:

- Precision power supply - 6114A - HP
- Signature multimeter - 5005B - HP
- Digital storage oscilloscope - 468 - TEKTRONIX

- Function generator - PM5134 - PHILIPS
- pA meter/DC voltage source 4140B - HP
- Digital voltmeter 3456A - HP
- Programable electronic timer - 900 - GRALAB



• FIGURA VI.1 - MONTAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO DA PLACA ANALÓGICA

VI.2.2 - Bloco Corrente-Tensão (I/V)

Este bloco converte a corrente de implantação em uma tensão que serve de entrada para o estágio de ganho e filtro, sendo o responsável pela interface entre o implantador de íons e o medidor de dose. Ele é constituído pelo amplificador operacional (CA₁) e um conjunto de resistores de realimentação responsáveis pelas várias escalas de medida do equipamento. Os limites de corrente estão divididos em seis décadas conforme mostra a tabela VI.1.

RESISTOR DE REALIMENT.	GANHO	ESCALA	CORRENTE DE FUNDO DE ESCALA
R1	10^{-1}	10^3	10 mA
R2	10^0	10^2	1 mA
R3	10^1	10^1	100 μ A
R4	10^2	1	10 μ A
R5	10^3	10^{-1}	1 μ A
R6	10^4	10^{-2}	100 nA

• TABELA VI.1 - LIMITES DE CORRENTE DO DOÍMETRO

A função de transferência do estágio (I/V), para cada uma das escalas, foi obtida respectivamente a partir das tabelas VI.2 a VI.7. O método utilizado foi o de regressão linear, sendo que os coeficientes da equação $y = Ax + B$ que melhor se adapta aos pontos de cada uma das tabelas, foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados, com a inclinação (A) e a intersecção com o eixo y (B) obtidas respectivamente por:

$$A = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$B = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Ve (mV)	Viv (mV)								
100	10	2100	209	4100	409	6100	611	8100	811
200	19	2200	219	4200	429	6200	621	8200	821
300	30	2300	229	4300	430	6300	631	8300	831
400	40	2400	239	4400	439	6400	642	8400	841
500	50	2500	250	4500	449	6500	651	8500	851
600	59	2600	260	4600	460	6600	662	8600	862
700	69	2700	269	4700	470	6700	672	9700	872
800	79	2800	279	4800	480	6800	682	8800	882
900	90	2900	289	4900	490	6900	690	8900	892
1000	100	3000	300	5000	500	7000	700	9000	900
1100	110	3100	310	5100	510	7100	711	9100	910
1200	120	3200	319	5200	520	7200	722	9200	920
1300	130	3300	330	5300	530	7300	732	9300	930
1400	140	3400	340	5400	541	7400	741	9400	940
1500	150	3500	349	5500	551	7500	750	9500	950
1600	160	3600	359	5600	561	7600	761	9600	960
1700	170	3700	370	5700	571	7700	771	9700	971
1800	180	3800	380	5800	581	7800	782	9800	981
1900	190	3900	390	5900	591	7900	792	9900	991
2000	200	4000	400	6000	601	8000	802	10K	1001

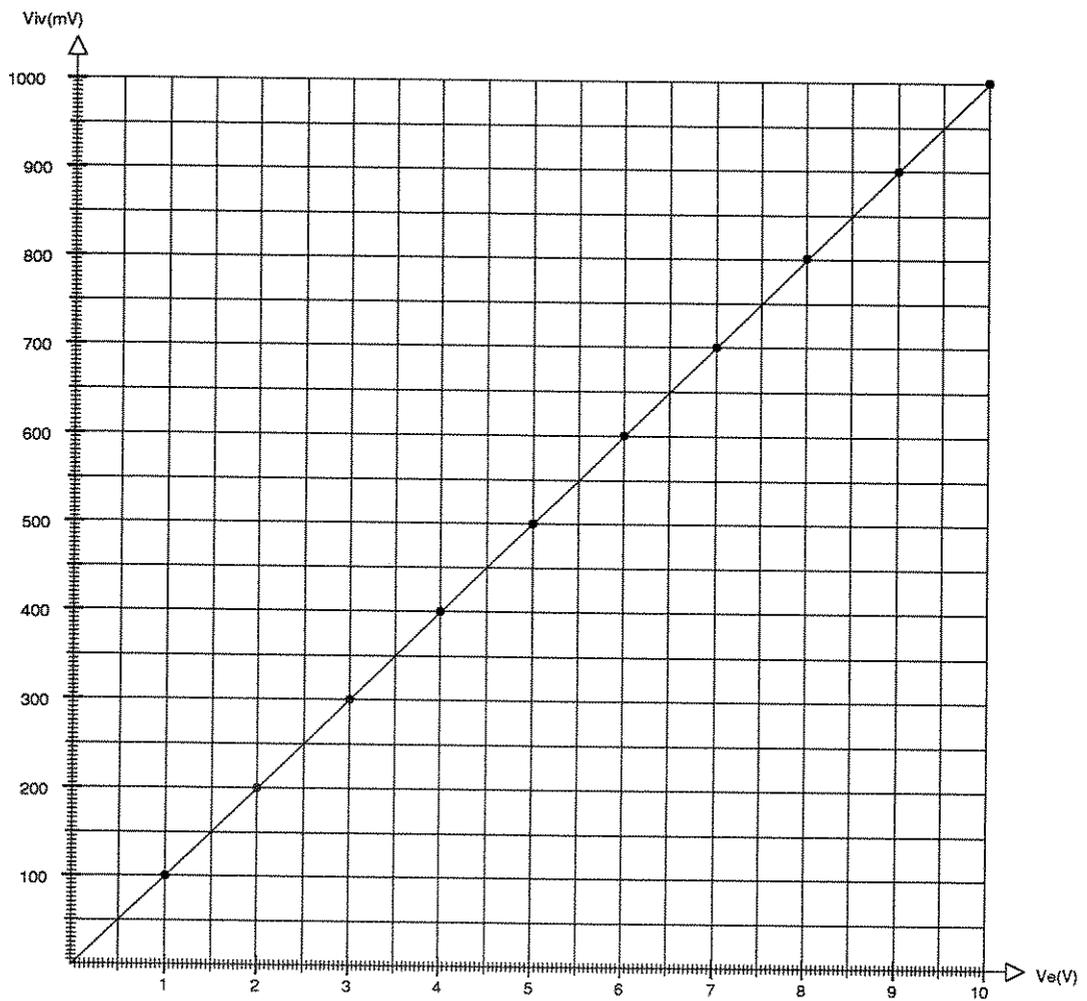
- TABELA VI.2 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 10^3

A figura VI.2 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é a seguinte:

$$V_{iv} = 0,10019 V_e - 0,53636$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

- * $E_{fe} = 0,136\%$
- * $E_{10\%fe} = 0,346\%$



• FIGURA VI.2 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO I/V - ESCALA 10^3

Ve (mV)	Viv (mV)								
10	10	210	209	410	410	610	611	810	811
20	21	220	219	420	420	620	621	820	821
30	31	230	230	430	430	630	630	830	830
40	41	240	239	440	440	640	641	840	841
50	50	250	249	450	450	650	650	850	851
60	59	260	259	460	460	660	660	860	861
70	69	270	270	470	470	670	670	870	871
80	79	280	280	480	480	680	681	880	881
90	90	290	289	490	490	690	691	890	891
100	100	300	299	500	500	700	701	900	901
110	110	310	310	510	511	710	710	910	911
120	120	320	320	520	520	720	721	920	921
130	130	330	330	530	530	730	730	930	930
140	139	340	339	540	540	740	740	940	940
150	150	350	350	550	550	750	750	950	950
160	160	360	360	560	560	760	761	960	961
170	169	370	369	570	570	770	771	970	971
180	179	380	380	580	580	780	781	980	981
190	190	390	390	590	590	790	790	990	991
200	200	400	400	600	601	800	801	1000	1001

- TABELA VI.3 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 10^2

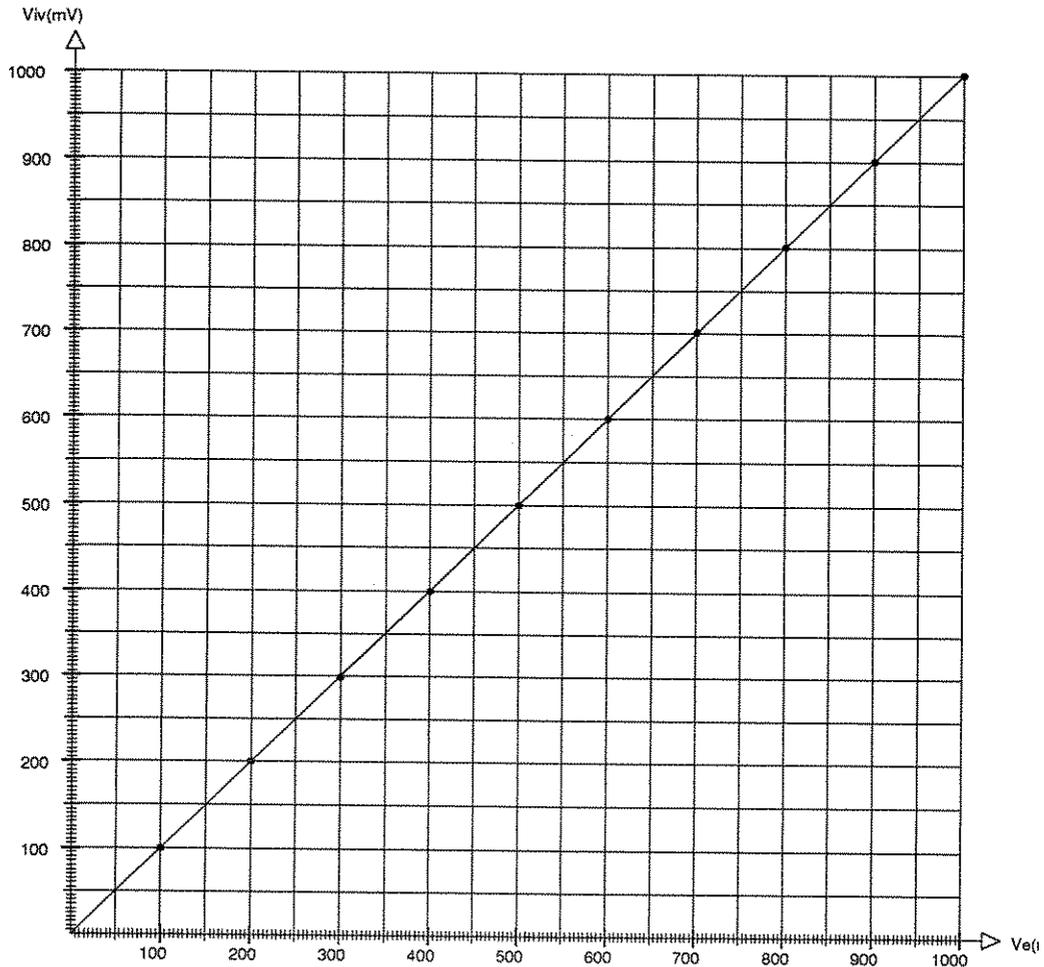
A figura VI.3 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é:

$$V_{iv} = 1,0013 V_e - 0,517$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

$$* E_{fe} = 0,0783\%$$

$$* E_{10\%fe} = 0,387\%$$



• FIGURA VI.3 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO I/V - ESCALA 10^2

Ve (mV)	Viv (mV)								
1	8	21	210	41	409	61	609	81	810
2	18	22	220	42	419	62	620	82	820
3	28	23	230	43	430	63	630	83	828
4	38	24	240	44	440	64	638	84	838
5	48	25	248	45	448	65	649	85	848
6	58	26	258	46	458	66	659	86	858
7	68	27	268	47	468	67	669	87	869
8	79	28	278	48	478	68	680	88	879
9	89	29	290	49	490	69	690	89	890
10	99	30	299	50	498	70	700	90	899
11	110	31	310	51	509	71	710	91	910
12	119	32	319	52	519	72	720	92	920
13	129	33	329	53	530	73	730	93	929
14	139	34	338	54	538	74	740	94	939
15	150	35	350	55	548	75	743	95	943
16	160	36	359	56	558	76	757	96	960
17	169	37	369	57	568	77	768	97	968
18	179	38	380	58	579	78	778	98	978
19	190	39	390	59	599	79	799	99	988
20	200	40	398	60	600	80	800	100	998

• TABELA VI.4 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 10^1

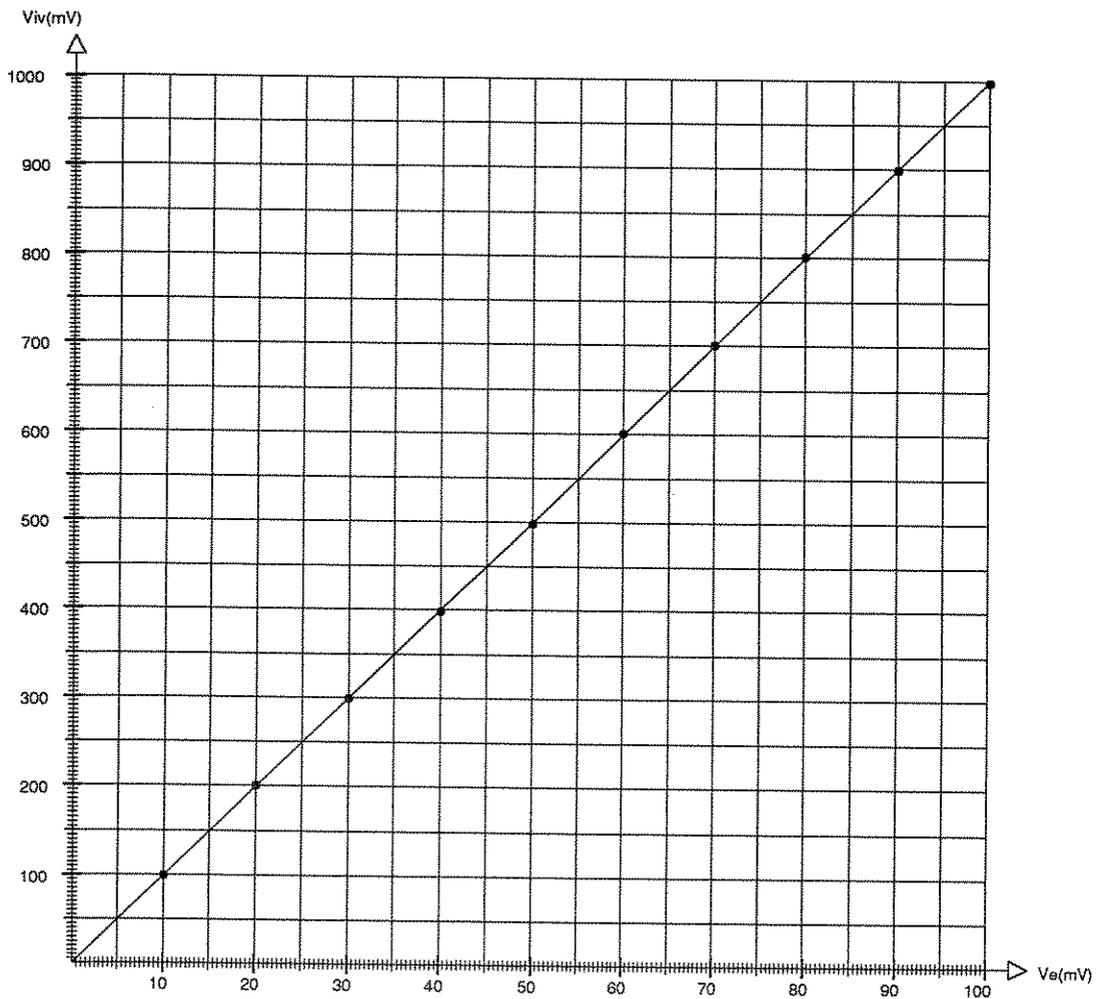
A figura VI.4 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é:

$$V_{IV} = 10 V_e - 0,93$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

* $E_{fe} = 0,1\%$

* $E_{10\%fe} = 1\%$



• FIGURA VI.4 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO IV - ESCALA 10^1

Ve (mV)	Viv (mV)								
1.0	97	3.0	298	5.0	498	7.0	700	9.0	900
1.1	107	3.1	308	5.1	508	7.1	710	9.1	910
1.2	117	3.2	318	5.2	519	7.2	720	9.2	921
1.3	127	3.3	328	5.3	529	7.3	730	9.3	932
1.4	137	3.4	339	5.4	539	7.4	740	9.4	942
1.5	148	3.5	350	5.5	549	7.5	751	9.5	953
1.6	158	3.6	358	5.6	558	7.6	761	9.6	962
1.7	168	3.7	369	5.7	570	7.7	771	9.7	973
1.8	178	3.8	378	5.8	580	7.8	781	9.8	983
1.9	188	3.9	387	5.9	590	7.9	791	9.9	994
2.0	198	4.0	396	6.0	600	8.0	802	10.0	1004
2.1	208	4.1	406	6.1	610	8.1	812		
2.2	218	4.2	416	6.2	620	8.2	822		
2.3	228	4.3	427	6.3	630	8.3	832		
2.4	239	4.4	436	6.4	640	8.4	842		
2.5	248	4.5	447	6.5	650	8.5	852		
2.6	258	4.6	458	6.6	660	8.6	862		
2.7	267	4.7	467	6.7	670	8.7	872		
2.8	278	4.8	478	6.8	680	8.8	882		
2.9	287	4.9	489	6.9	690	8.9	892		

• TABELA VI.5 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 1

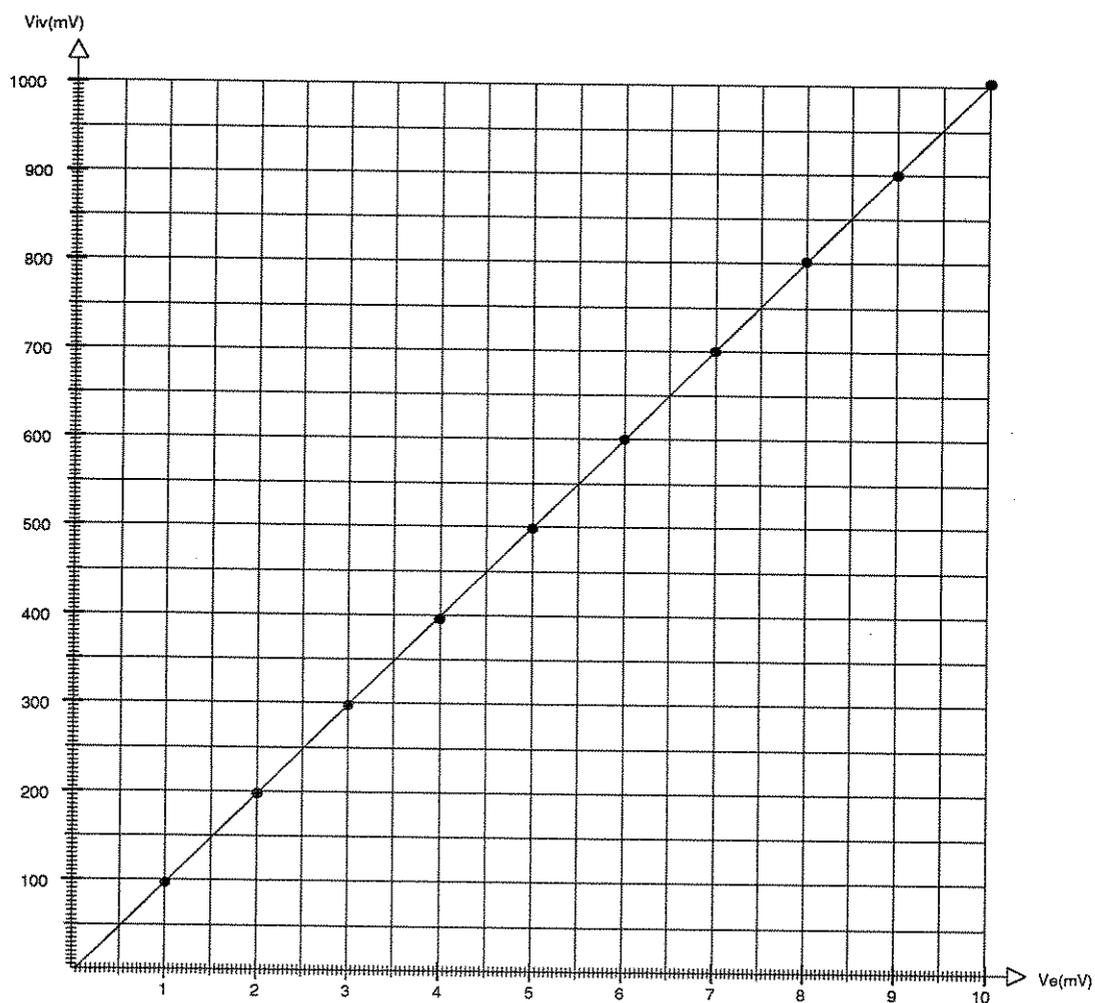
A figura VI.5 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é:

$$V_{iv} = 100,65 V_e - 4,16$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

* $E_{fe} = 0,1\%$

* $E_{10\%fe} = 1\%$



• FIGURA VI.5 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO I/V - ESCALA 1

Ve (mV)	Viv (mV)	Ve (mV)	Viv (mV)
100	102	600	598
125	124	625	624
150	148	650	651
175	176	675	676
200	198	700	699
225	227	725	725
250	251	750	750
275	276	775	773
300	298	800	795
325	324	825	820
350	349	850	848
375	373	875	874
400	398	900	900
425	425	925	927
450	451	950	953
475	473	975	977
500	498	1000	1006
525	525		
550	532		
575	577		

- TABELA VI.6 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 10¹

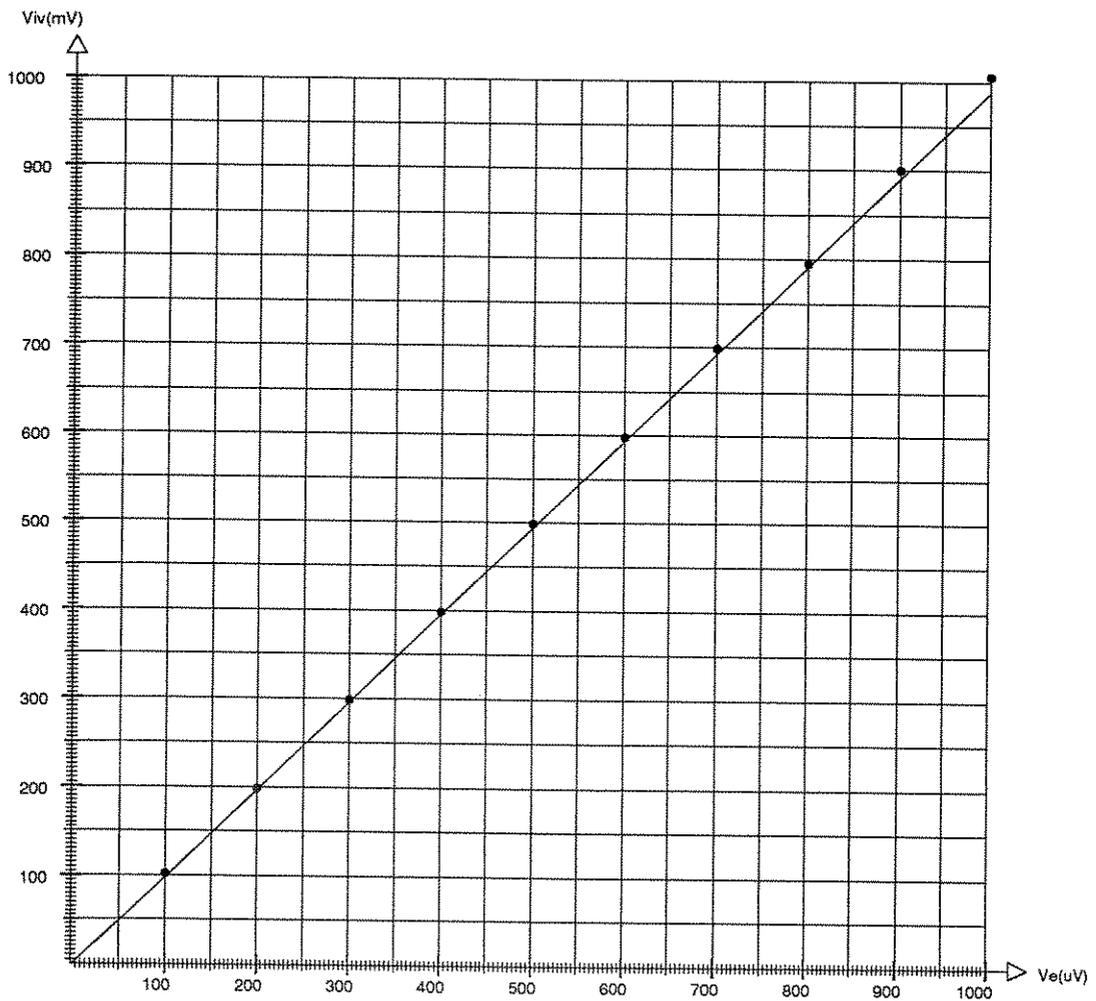
A figura VI.6 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é:

$$V_{iv} = 1 V_e - 1,33$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

* $E_{fe} = 0,1\%$

* $E_{10\%fe} = 1\%$



• FIGURA VI.6 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO I/V - ESCALA 10^{-1}

V_e (mV)	V_{iv} (mV)
10	98
15	148
20	198
25	249
30	299
35	349
40	400
45	450
50	501
55	552
60	602
65	653
70	703
75	754
80	804
85	855
90	905
95	955
100	1009

- TABELA VI.7 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (I/V) - ESCALA 10^{-2}

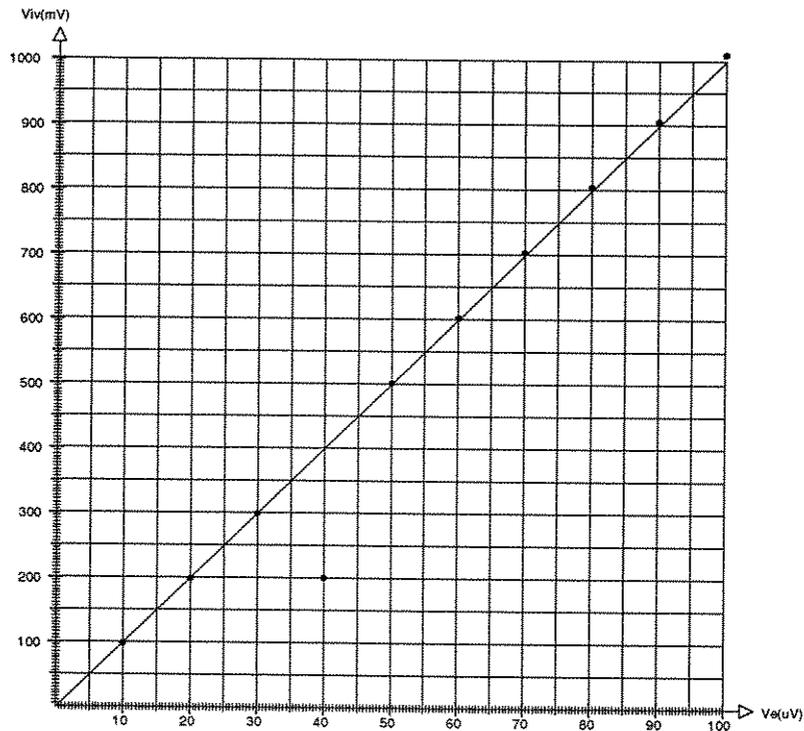
A figura VI.7 nos mostra a representação gráfica da tabela cuja função de transferência é:

$$V_{iv} = 10 V_e - 0,4$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

$$* E_{fe} = 0,04\%$$

$$* E_{10\%fe} = 0,4\%$$



• FIGURA VI.7 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO I/V - ESCALA 10^{-2}

VI.2.3 - Bloco Ganho e Filtro (G/F)

No bloco ganho e filtro o amplificador operacional (CA2) atua como um filtro passa-baixa com um ganho de 5 vezes. Como a tensão de saída do estágio (I/V) varia entre 0 e 1 V, a tensão na saída deste bloco deverá variar entre 0 e 5 V.

Utilizamos o mesmo método do item anterior para calcular a função de transferência para este estágio a partir dos dados obtidos na tabela VI.8.

-Viv (mV)	Vgf (mV)								
10	43	209	1047	410	2050	611	3051	811	4055
21	93	219	1098	420	2100	621	3101	821	4106
31	143	230	1145	430	2150	630	3149	830	4157
41	194	239	1195	440	2200	641	3200	841	4207
50	244	249	1245	450	2250	650	3250	851	4256
59	291	259	1243	460	2300	660	3300	861	4307
69	341	270	1347	470	2350	670	3351	871	4358
79	391	280	1397	480	2400	681	3401	881	4408
90	449	289	1447	490	2450	691	3452	891	4458
100	495	299	1499	500	2500	701	3502	901	4508
110	546	310	1549	511	2550	710	3552	911	4559
120	594	320	1599	520	2600	721	3602	921	4607
130	645	330	1649	530	2650	730	3653	930	4656
139	695	339	1700	540	2696	740	3704	940	4707
150	744	350	1750	550	2746	750	3754	950	4756
160	794	360	1800	560	2797	761	3805	961	4809
169	845	369	1850	570	2848	771	3855	971	4859
179	896	380	1900	580	2898	781	3905	981	4910
190	946	390	1950	590	2952	790	3955	990	4960
200	996	400	2000	601	3001	801	4005	1001	5010

• TABELA VI.8 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (G/F)

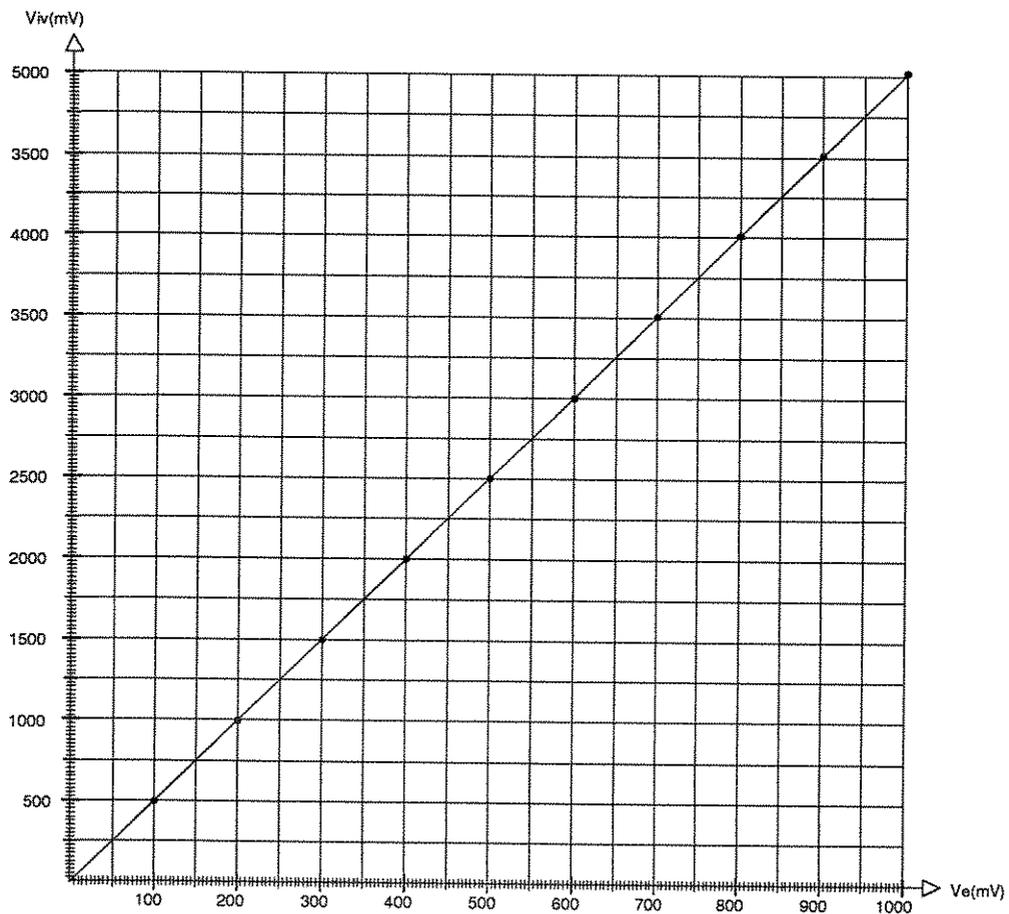
A função de transferência para este estágio é dada por:

$$V_{gf} = 5,019 V_{iv} - 4,753$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

- * $E_{fe} = 0,292\%$
- * $E_{10\%fe} = 0,563\%$.

A figura VI.8 nos mostra a representação gráfica da tabela VI.9



• FIGURA VI.8 - $V_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO DE GANHO E FILTRO

VI.2.4 - Bloco Conversor Tensão-Frequência (V/F)

O bloco de conversão tensão-frequência serve de interface entre o estágio de ganho e filtro e o microprocessador, passando pela placa de interface. A tensão de entrada deste bloco varia entre 0 e 5 Volts fazendo com que a frequência na saída do mesmo varie entre 0 e 5KHz. A tabela VI.9 foi utilizada para se obter a função de transferência deste estágio.

V _{evf} (mV)	F _{vf} (Khz)								
50	.050	1050	1.050	2050	2.049	3050	3.048	4050	4.048
100	.10	1100	1.100	2100	2.099	3100	3.098	4100	4.098
150	.15	1150	1.150	2150	2.148	3150	3.148	4150	4.148
200	.20	1200	1.200	2200	2.198	3200	3.198	4200	4.198
250	.25	1250	1.250	2250	2.248	3250	3.248	4250	4.247
300	.30	1300	1.300	2300	2.298	3300	3.298	4300	4.297
350	.35	1350	1.350	2350	2.348	3350	3.348	4350	4.347
400	.40	1400	1.400	2400	2.398	3400	3.398	4400	4.397
450	.45	1450	1.449	2450	2.448	3450	3.447	4450	4.448
500	.50	1500	1.499	2500	2.498	3500	3.497	4500	4.498
550	.55	1550	1.549	2550	2.548	3550	3.547	4550	4.550
600	.60	1600	1.599	2600	2.598	3600	3.597	4600	4.600
650	.65	1650	1.649	2650	2.648	3650	3.647	4650	4.650
700	.70	1700	1.699	2700	2.698	3700	3.697	4700	4.700
750	.75	1750	1.749	2750	2.748	3750	3.747	4750	4.750
800	.80	1800	1.799	2800	2.798	3800	3.798	4800	4.800
850	.85	1850	1.849	2850	2.848	3850	3.848	4850	4.850
900	.90	1900	1.899	2900	2.898	3900	3.898	4900	4.900
950	.95	1950	1.948	2950	2.948	3950	3.948	4950	4.950
1000	1.0	2000	1.999	3000	2.998	4000	3.998	5000	5.001

• TABELA VI.9 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTÁGIO (V/F)

A função de transferência para o estágio de conversão tensão-frequência obtida a partir desta tabela é :

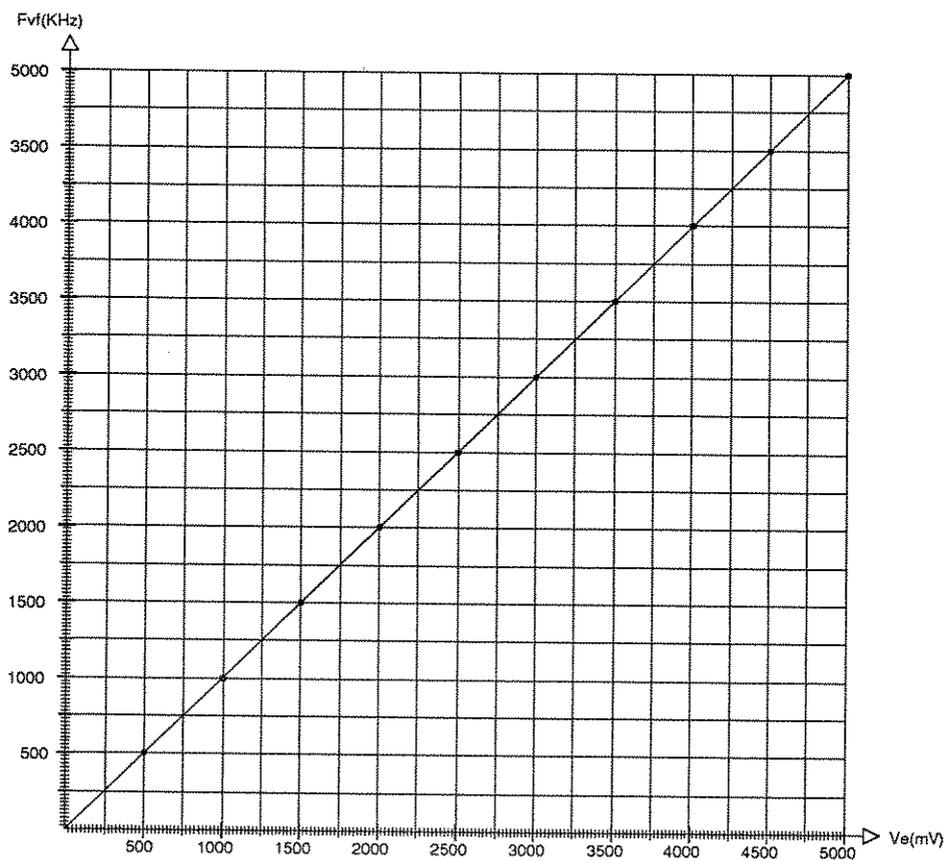
$$F_s \text{ (KHz)} = V_{evf} \text{ (v)} - 2,65 \times 10^{-4}$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

$$* E_{fe} = 0,027\%$$

$$* E_{10\%fe} = 0,053\%$$

A figura VI.9 nos mostra a representação gráfica para a função de transferência acima.



• FIGURA VI.9 - $F_s \times V_e$ PARA O ESTÁGIO (V/F)

VI.2.5 - Caracterização dos três Estágios em Cascata

Os erros de cada um dos estágios são cumulativos. Portanto, se considerarmos os três estágios em cascata teremos, por exemplo, para a escala 10^2 os seguintes erros:

- PIOR CASO

$$V_{eiv} = 100 \text{ mV} \xrightarrow{e = 0,387\%} V_{siv} = 1,004 \text{ V}$$

$$V_{egf} = 1,004 \text{ V} \xrightarrow{e = 0,563\%} V_{sgf} = 5,048 \text{ V}$$

$$V_{evf} = 5,048 \text{ V} \xrightarrow{e = 0,053\%} F_s = 5,050 \text{ KHz}$$

Como para 100 mV na entrada do circuito deveríamos ter uma frequência de 5 KHz na saída do conversor (V/F), o erro acumulado é $E_a = 1,006\%$

- MELHOR CASO

$$V_{eiv} = 100 \text{ mV} \xrightarrow{e = 0,0783\%} V_{siv} = 1,001 \text{ V}$$

$$V_{egf} = 1,001 \text{ V} \xrightarrow{e = 0,292\%} V_{sgf} = 5,019 \text{ V}$$

$$V_{evf} = 5,019 \text{ V} \xrightarrow{e = 0,027\%} F_s = 5,020 \text{ KHz}$$

O erro acumulado é $E_a = 0,398\%$

Para comprovarmos estes cálculos efetuamos as medidas apresentadas na tabela VI.10 para a escala 10^1 .

V _{evf} (mV)	F _{vf} (Khz)								
10	.036	210	1.039	410	2.045	610	3.054	810	4.059
20	.087	220	1.090	420	2.096	620	3.104	820	4.109
30	.137	230	1.139	430	2.147	630	3.153	830	4.160
40	.188	240	1.189	440	2.196	640	3.203	840	4.210
50	.238	250	1.239	450	2.246	650	3.253	850	4.260
60	.284	260	1.290	460	2.297	660	3.303	860	4.311
70	.334	270	1.340	470	2.347	670	3.354	870	4.361
80	.385	280	1.390	480	2.398	680	3.405	880	4.411
90	.442	290	1.441	490	2.448	690	3.455	890	4.462
100	.489	300	1.491	500	2.498	700	3.505	900	4.512
110	.539	310	1.541	510	2.549	710	3.556	910	4.562
120	.587	320	1.592	520	2.599	720	3.606	920	4.613
130	.638	330	1.642	530	2.650	730	3.656	930	4.661
140	.688	340	1.693	540	2.700	740	3.707	940	4.713
150	.737	350	1.743	550	2.750	750	3.757	950	4.763
160	.787	360	1.794	560	2.800	760	3.807	960	4.814
170	.838	370	1.843	570	2.851	770	3.858	970	4.865
180	.888	380	1.894	580	2.901	780	3.908	980	4.917
190	.939	390	1.945	590	2.954	790	3.958	990	4.967
200	.989	400	1.996	600	3.004	800	4.009	1000	5.019

• TABELA VI.10 - CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS EM CASCATA

A função de transferência obtida da tabela VI.10 é:

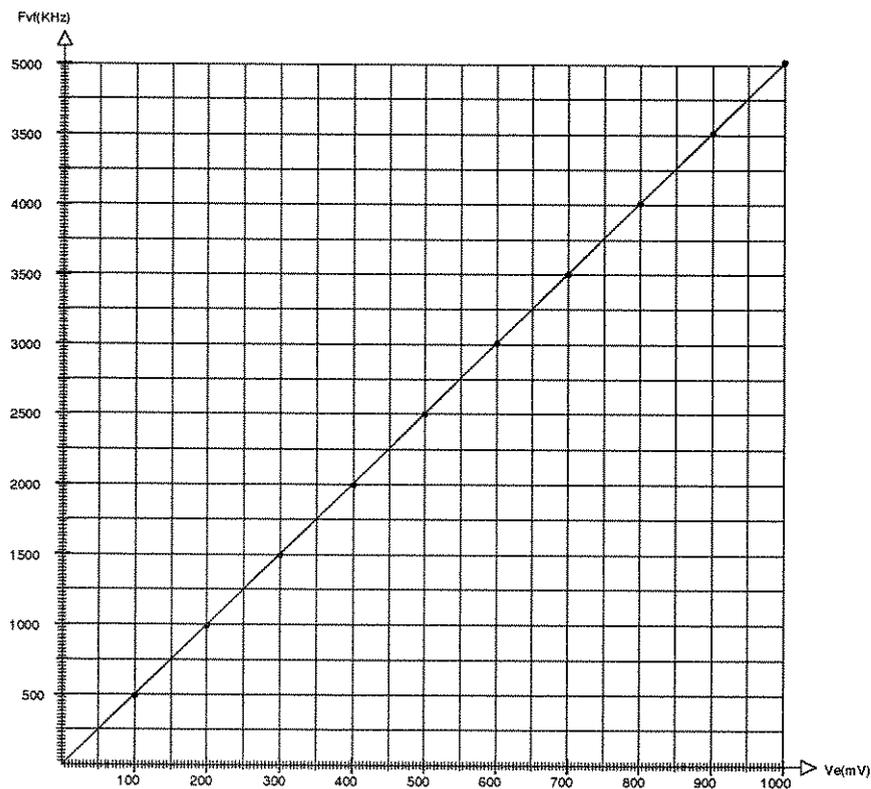
$$F_s = 0,00503 V_e - 0,01695$$

Os erros obtidos para a tensão de fundo de escala e 10% da tensão de fundo de escala são respectivamente:

- * $E_{fe} = 0,310\%$
- * $E_{10\%fe} = 0,486\%$.

Verificamos desta forma que os erros encontrados estão dentro da faixa calculada anteriormente.

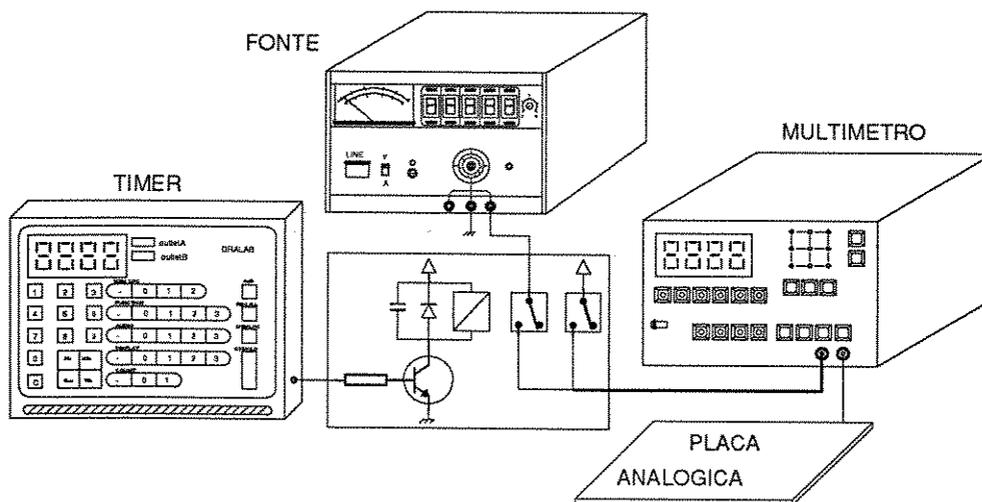
A figura VI.10 nos mostra a representação gráfica da tabela VI.10



• FIGURA VI.10 - $F_s \times V_e$ - BLOCOS EM CASCATA

VI.2.6 - Caracterização em Função da Contagem dos Pulsos de Saída

Nesta etapa da caracterização fizemos dois tipos de experimentos. Em primeiro lugar medimos o número de pulsos na saída do conversor V/F para diversos intervalos de tempo, tendo como parâmetro a tensão na entrada do conversor I/V. Foi utilizada a montagem da figura VI.1 e o controle do tempo de medida feito através do circuito que pode ser visto na figura VI.11.



• FIGURA VI.11 - MONTAGEM PARA CARACTERIZAÇÃO ATRAVÉS DA CONTAGEM DOS PULSOS DE SAÍDA

O *timer* controla um micro rele que tem duas funções. A primeira é a de aplicar a tensão na entrada do circuito e a segunda é a de fornecer a referência de início e fim de contagem. O período de saída do conversor V/F (item IV.2.1) é dado por $t = t_1 + t_2$ onde t_1 é fixo e vale $132 \mu s$ e t_2 é variável e depende da tensão de entrada. Portanto o número de pulsos com largura t_1 para um determinado intervalo de tempo, é função da tensão de entrada. A contagem dos pulsos de saída

do conversor (NP) para intervalos de tempo pré determinados (PER), é uma outra forma de se caracterizar a precisão da medida da placa analógica.

Foram efetuadas dez medidas para cada ponto calculando-se a média e o desvio padrão. As tabelas VI.11 a VI.15 apresentam os dados destas medidas tendo como parâmetro a tensão de entrada $V_e = 20, 40, 60, 80$ e 100 mV respectivamente.

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
90005	88956	2	90.0	88951	10508	10387	0	10.5	10380
80005	79078	2	80.0	79073	10008	9891	0	10.0	9883
70005	69197	2	70.0	69192	9508.3	9396	1	9.5	9388
60005	59311	3	60.0	59306	9008.4	89901	0	9.0	8893
50005	49418	0	50.0	49413	8508.4	8405	1	8.5	8397
40005	39530	2	40.0	39525	8008.6	7912	1	8.0	7984
30005	29653	3	30.0	29648	7508.6	7417	1	7.5	7409
20006	19773	0	20.0	19767	7008.7	6923	1	7.0	6914
19006	18787	1	19.0	18781	6509.7	6429	0	6.5	6420
18506	18294	0	18.5	18288	6009.7	5934	0	6.0	5925
18006	17801	1	18.0	17795	5509.5	5440	0	5.5	5431
17506	17306	1	17.5	17300	5009.3	4945	0	5.0	4936
17006	16813	0	17.0	16807	4510.8	4451	0	4.5	4442
16506	16319	1	16.5	16313	4009.6	3956	1	4.0	3947
16006	15824	1	16.0	15818	3510.7	3461	1	3.5	3452
15506	15329	1	15.5	15323	3009.9	2968	1	3.0	2959
15007	14834	1	15.0	14827	2511.0	2473	0	2.5	2464
14507	14339	0	14.5	14332	2010.2	1978	1	2.0	1968
14007	13844	1	14.0	13837	1511.1	1484	0	1.5	1474
13507	13352	1	13.5	13345	1010.4	990	0	1.0	980
13007	12858	2	13.0	12851	511.35	495	0	.50	495
12507	12363	1	12.5	12356	411.37	396	0	.40	396
12007	11869	1	12.0	11862	311.34	297	0	.30	297
11507	11375	1	11.5	11368	211.36	199	0	.20	199
11007	10880	1	11.0	10873	111.36	100	0	.10	100

• TABELA VI.11 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $V_e = 20$ mV

A função de transferência obtida da tabela VI.11 é:

$$NP = PNOR + 0,04$$

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
50005	99727	2	90.0	99717	10508	20947	1	10.5	20933
45005	89759	2	80.0	89749	10008	19950	0	10.0	19934
40005	79787	1	70.0	79777	9508.3	18953	0	9.5	18937
30005	59847	1	60.0	59837	9008.4	17955	1	9.0	17939
25005	49874	0	50.0	49864	8508.4	16958	0	8.5	16942
20505	40894	5	40.0	40884	8008.6	15961	0	8.0	15943
20006	39900	1	30.0	39888	7508.6	14963	0	7.5	14945
19506	38902	0	20.0	38890	7008.7	13965	0	7.0	13947
19006	37905	1	19.0	37893	6509.7	12967	1	6.5	12949
18506	36908	2	18.5	36896	6009.7	11970	0	6.0	11952
18006	35909	1	18.0	35897	5509.5	10973	0	5.5	10955
17506	34914	1	17.5	34902	5009.3	9976	0	5.0	9958
17006	33914	1	17.0	33902	4510.8	8979	0	4.5	8961
16506	32916	1	16.5	32904	4009.6	7982	0	4.0	7964
16006	31918	0	16.0	31906	3510.7	6985	0	3.5	6967
15506	30920	1	15.5	30908	3009.9	5987	0	3.0	5969
15007	29923	1	15.0	29909	2511.0	4990	1	2.5	4968
14507	28927	1	14.5	28913	2010.2	3992	0	2.0	3972
14007	27929	1	14.0	27915	1511.1	2995	0	1.5	2973
13507	26931	1	13.5	26917	1010.4	1998	0	1.0	1978
13007	25933	0	13.0	25919	511.35	1000	0	.50	978
12507	24936	0	12.5	24922	411.37	801	0	.40	781
12007	23938	1	12.0	23924	311.34	601	0	.30	579
11507	22941	0	11.5	22927	211.36	402	0	.20	380
11007	21943	0	11.0	21929	111.36	203	1	.10	184

- TABELA VI.12 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $V_e = 40 \text{ mV}$

A função de transferência obtida da tabela VI.12 é:

$$NP = 2 PNOR - 15$$

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
30005	90041	2	30.0	90026	10508	31521	0	10.5	31500
25505	76534	2	25.5	76519	10008	30018	1	10.0	29994
25005	75035	1	25.0	75020	9508.3	28518	1	9.5	28494
24005	72032	1	24.0	72017	9008.4	27017	0	9.0	26993
23005	69028	0	23.0	69013	8508.4	25516	1	8.5	25492
20505	61528	5	20.5	61513	8008.6	24015	0	8.0	23988
20006	60029	1	20.0	60011	7508.6	22515	1	7.5	22488
19506	58529	0	19.5	58511	7008.7	21014	0	7.0	20987
19006	57027	1	19.0	57009	6509.7	19514	1	6.5	19487
18506	55525	2	18.5	55507	6009.7	18013	0	6.0	17986
18006	54027	1	18.0	54009	5509.5	16511	1	5.5	16484
17506	52525	1	17.5	52507	5009.3	15011	1	5.0	14984
17006	51024	1	17.0	51006	4510.8	13510	0	4.5	13483
16506	49525	1	16.5	49507	4009.6	12010	0	4.0	11983
16006	48025	0	16.0	48007	3510.7	10509	0	3.5	10482
15506	46526	1	15.5	46508	3009.9	9009	0	3.0	8982
15007	45023	1	15.0	45002	2511.0	7508	0	2.5	7481
14507	43523	1	14.5	43502	2010.2	6007	0	2.0	5980
14007	42023	1	14.0	42002	1511.1	4507	0	1.5	4480
13507	40522	1	13.5	40501	1010.4	3006	0	1.0	2976
13007	39023	0	13.0	39002	511.35	1505	0	.50	1475
12507	37522	0	12.5	37501	411.37	1205	1	.40	1176
12007	36021	1	12.0	36000	311.34	906	1	.30	877
11507	34521	0	11.5	34500	211.36	605	1	.20	576
11007	33000	0	11.0	33000	111.36	305	0	.10	277

- TABELA VI.13 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $V_e = 60$ mV

A função de transferência obtida da tabela VI.13 é:

$$NP = 3 PNOR - 69$$

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
22005	88183	2	22.0	88163	9008.4	38081	1	9.5	38049
21005	84176	1	21.0	84156	8508.4	36077	0	9.0	36045
20505	82168	1	20.5	82148	8008.6	34073	1	8.5	34041
20006	80168	0	20.0	80144	7508.6	32069	0	8.0	32033
19006	76158	1	19.0	76134	7008.7	30065	0	7.5	30029
18506	74153	1	18.5	74129	6509.7	28062	0	7.0	28026
18006	72149	1	18.0	72125	6009.7	26059	0	6.5	26023
17506	70147	1	17.5	70123	5509.5	24054	1	6.0	24018
17006	68143	1	17.0	68119	5009.3	22051	0	5.5	22015
16506	66139	0	16.5	66115	4510.8	20048	0	5.0	20012
16006	64132	1	16.0	64108	4009.6	18043	0	4.5	18007
15506	62130	0	15.5	62106	3510.7	16039	1	4.0	16003
15007	60128	0	15.0	60100	3009.9	14035	0	3.5	13999
14507	58124	1	14.5	58096	2511.0	12031	0	3.0	11995
14007	56121	1	14.0	56093	2010.2	10027	0	2.5	9991
13507	54118	1	13.5	54090	1511.1	8023	0	2.0	7987
13007	52111	2	13.0	52083	1010.4	6019	0	1.5	5983
12507	50103	0	12.5	50075	511.35	4015	0	1.0	3975
12007	48099	2	12.5	48071	411.37	2011	0	.50	1972
11507	46096	1	11.5	46068	311.34	1610	0	.40	1571
11007	44092	1	11.0	44064	211.36	1210	1	.30	1171
10508	42087	1	10.5	42059	111.36	809	0	.20	770
10008	40085	1	10.0	40053	211.36	408	0	.10	371

- TABELA VI.14 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $V_e = 80 \text{ mV}$

A função de transferência obtida da tabela VI.14 é:

$$NP = 4,009 \text{ PNOR} - 32,9$$

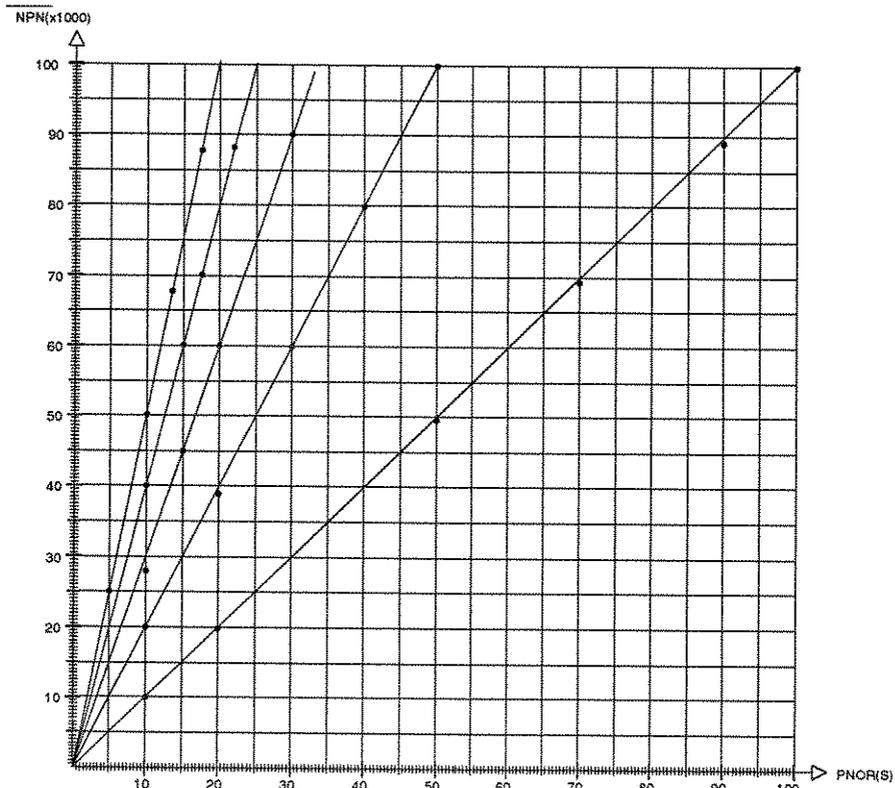
PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
17506	87849	0	17.5	87819	7008.7	37656	0	7.5	37611
17006	85340	1	17.0	85310	6509.7	35144	0	7.0	35099
16506	82831	1	16.5	82801	6009.7	32635	0	6.5	32590
16006	80323	1	16.0	80293	5509.5	30125	1	6.0	30080
15007	75303	0	15.0	75268	5009.3	27617	0	5.5	27572
14507	72789	1	14.5	72754	4510.8	25106	0	5.0	25061
14007	70284	1	14.0	70249	4009.6	22599	0	4.5	22554
13507	67768	1	13.5	67733	3510.7	20086	1	4.0	20041
13007	65262	2	13.0	65227	3009.9	17579	0	3.5	17534
12507	62746	0	12.5	62711	2511.0	15068	0	3.0	15023
12007	60239	2	12.5	60204	2010.2	12560	0	2.5	12515
11507	57727	1	11.5	57692	1511.1	10049	0	2.0	10004
11007	55219	1	11.0	55184	1010.4	7540	0	1.5	7495
10508	52710	1	10.5	52675	511.35	5029	0	1.0	4979
10008	50199	1	10.0	50159	411.37	2519	0	.50	2470
9008	47694	1	9.5	47654	311.34	2017	0	.40	1968
8508	45184	0	9.0	45144	211.36	1516	1	.30	1467
8008	42674	1	8.5	42634	111.36	1014	0	.20	966
7508	40165	0	8.0	40120	211.36	512	0	.10	465

- TABELA VI.15 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $V_e = 100 \text{ mV}$

A função de transferência obtida da tabela VI.15 é:

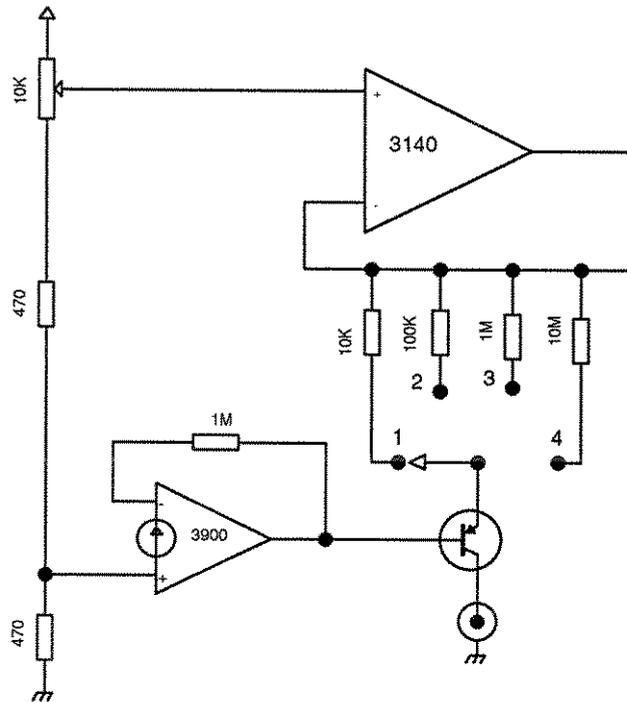
$$NP = 5,02 PNOR - 39,67$$

Na figura VI.12 podemos ver a representação gráfica das tabelas VI.11 a VI.15.



• FIGURA VI.12 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA DO V/F (NP) X PERÍODO (PER)

A segunda etapa do experimento, consistiu na aplicação de uma corrente à entrada do conversor I/V, obtida através do circuito da figura VI.11 que foi implementado na placa de controle.



• FIGURA VI.13 - FONTE DE CORRENTE

Este circuito foi calibrado com um picoamperímetro e as correntes obtidas são:

- * (1) $I = 100,6 \mu\text{A}$
- * (2) $I = 10,08 \mu\text{A}$
- * (3) $I = 1,003 \mu\text{A}$
- * (4) $I = 100,7 \text{ nA}$

Foram feitas medidas em várias escalas de tal forma que a corrente de entrada estimulasse o circuito para uma frequência de saída no início e no fim da escala. Desta forma pudemos estabelecer uma comparação entre a precisão da medida feita no fim de uma determinada escala e no início da escala superior. As tabelas VI.16 a VI.23 apresentam os dados referentes a estas medidas.

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
90005	44892	9	90.0	44890	20006	9931	1	20.0	9928
80005	39792	9	80.0	39790	15006	7475	1	15.0	7472
70005	34819	9	70.0	34817	10008	4987	0	10.0	4983
60005	29814	9	60.0	29812	5009.5	2479	0	5.0	2474
55005	27409	6	55.0	27407	2511.0	1239	0	2.5	1234
50005	24876	4	50.0	24874	1010.4	501	0	1.0	496
45005	22415	3	45.0	22413	511.35	248	1	.5	242
40005	19861	2	40.0	19859	411.37	198	0	.4	193
35005	17403	4	35.0	17401	311.34	148	0	.3	143
30005	14848	0	30.0	14846	211.36	98	0	.2	93
25005	12490	2	25.0	12488	111.36	49	0	.1	44

- TABELA VI.16 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 100 \mu A$ - ESCALA 10^2

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
18006	91143	12	18.0	91113	8008.6	40496	3	8.0	40453
17507	88587	7	17.0	88552	7509.6	37969	3	7.5	37920
15007	75942	5	15.0	75907	7008.7	35446	4	7.0	35402
14007	70855	3	14.0	70820	6510.2	32906	1	6.5	32854
13007	65803	6	13.0	65768	5009.3	25313	1	5.0	25266
12507	63272	5	12.5	63237	2511.0	12658	1	2.5	12603
11007	55683	3	11.0	55648	1010.4	5069	1	1.0	5017
1050.8	53154	1	10.5	53114	511.35	2538	1	.5	2482
1000.8	50613	2	10.0	50573	411.37	2031	1	.4	1975
9508.3	48098	4	9.5	48056	311.34	1524	0	.3	1468
9008.4	45562	5	9.0	45520	211.36	1018	0	.2	963
8509.3	43026	1	8.5	42979	111.36	511	1	.1	459

- TABELA VI.17 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 100 \mu A$ - ESCALA 10^1

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
120005	59176	20	120	59174	20006	9769	4	20.0	9766
90005	44316	13	90.0	44314	15007	7384	7	15.0	7381
80005	39378	4	80.0	39376	10008	4929	1	10.0	4925
70005	34448	4	70.0	34446	6510.2	3237	1	6.5	6232
60005	29537	8	60.0	29535	5009.3	2464	1	5.0	2459
55005	27057	2	55.0	27055	2511.0	1232	0	2.5	1227
50005	24597	2	50.0	24595	1010.4	493	1	1.0	488
45005	22138	2	45.0	22136	511.35	246	0	.5	241
40005	19689	1	40.0	19687	411.37	197	1	.4	192
35005	17228	10	35.0	17226	311.34	148	0	.3	143
30005	14777	4	30.0	14775	211.36	98	0	.2	93
25005	12267	40	25.0	12265	111.36	49	0	.1	44

• TABELA VI.18 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_e = 10 \mu A$ - ESCALA 10^1

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
17006	85978	9	17.0	85948	6009.0	30346	1	6.0	30301
16006	80911	2	16.0	80911	5009.3	25289	1	5.0	25242
15007	75854	3	15.0	75819	4009.6	20232	1	4.0	20184
14007	70792	4	14.0	70757	3009.9	15175	1	3.0	15125
13007	65739	2	13.0	65704	2010.2	10120	0	2.0	10069
12007	60685	2	12.0	60650	1010.4	5064	1	1.0	5012
11007	55624	2	11.0	55589	511.35	2535	0	.5	2479
10008	50572	2	10.0	50532	411.37	2029	0	.4	1973
9008.4	45513	3	9.0	45471	311.34	1524	0	.3	1468
8008.6	40455	1	8.0	40412	211.36	1018	0	.2	963
7008.7	35404	1	7.0	35360	111.36	513	0	.1	461

• TABELA VI.19 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_e = 10 \mu A$ - ESCALA 1

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
120005	58567	28	120	58565	20006	9777	2	20.0	9774
90005	43953	19	90.0	43951	15007	7334	0	15.0	7331
80005	39056	1	80.0	39054	10008	4891	1	10.0	4887
70005	34198	3	70.0	34196	6510.2	3241	1	6.5	3236
60005	29352	16	60.0	29350	5009.3	2446	0	5.0	2441
55005	26870	18	55.0	26868	2511.0	1223	0	2.5	1218
50005	24421	5	50.0	24419	1010.4	489	0	1.0	484
45005	21979	3	45.0	21977	511.35	244	0	.5	239
40005	19537	1	40.0	19535	411.37	196	1	.4	191
35005	17104	1	35.0	17102	311.34	147	0	.3	142
30005	14670	1	30.0	14668	211.36	98	0	.2	93
25005	12223	1	25.0	12221	111.36	49	0	.1	44

- TABELA VI.20 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 1 \mu A$ - ESCALA 1

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
17006	85517	7	17.0	85487	6009.0	30183	1	6.0	30183
16006	80474	4	16.0	80444	5009.3	25154	1	5.0	25154
15007	75444	1	15.0	75409	4009.6	20125	1	4.0	20125
14007	70422	9	14.0	70387	3009.9	15096	1	3.0	15096
13007	65392	6	13.0	65357	2010.2	10068	1	2.0	10068
12007	60357	1	12.0	60322	1010.4	5038	0	1.0	5038
11007	55329	1	11.0	55294	511.35	2524	0	.5	2524
10008	50298	2	10.0	50258	411.37	2021	0	.4	2021
9008.4	45269	1	9.0	45227	311.34	1518	0	.3	1463
8008.6	40242	1	8.0	40199	211.36	1015	0	.2	960
7008.7	35212	1	7.0	35168	111.36	512	0	.1	459

- TABELA VI.21 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 1 \mu A$ - ESCALA 10^{-1}

PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
120005	58882	14	120	58880	20006	9823	1	20.0	9820
90005	44167	10	90.0	44165	15007	7370	1	15.0	7367
80005	39248	0	80.0	39246	10008	4913	1	10.0	4909
70005	34339	1	70.0	34337	6510.2	3236	1	6.5	3231
60005	29449	1	60.0	29447	5009.3	2457	1	5.0	2452
55005	27008	2	55.0	27006	2511.0	1229	0	2.5	1222
50005	24542	2	50.0	24540	1010.4	492	1	1.0	487
45005	22088	4	45.0	22086	511.35	246	0	.5	241
40005	19644	3	40.0	19642	411.37	197	0	.4	192
35005	17194	5	35.0	17192	311.34	148	0	.3	143
30005	14734	1	30.0	14732	211.36	98	0	.2	93
25005	12279	0	25.0	12277	111.36	49	1	.1	44

• TABELA VI.22 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 100 \text{ nA}$ - ESCALA 10^{-1}

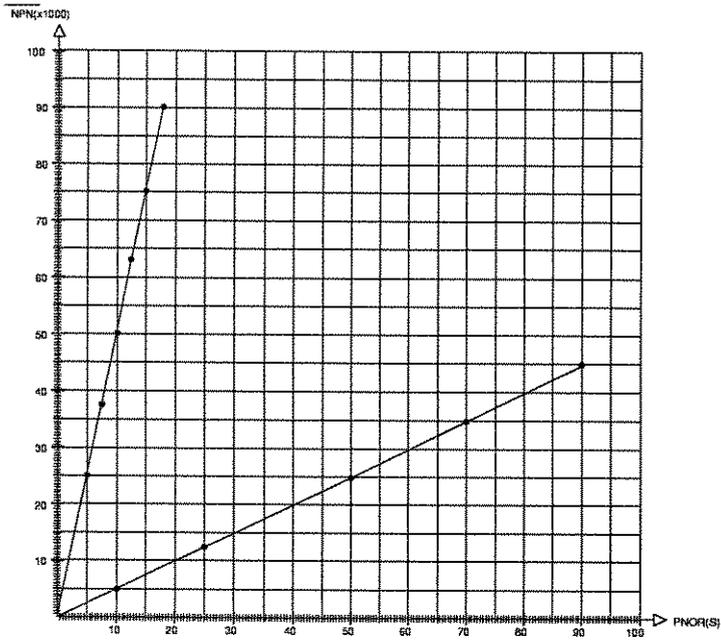
PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN	PER (ms)	NP	S	PNOR (S)	NPN
17006	84660	2	17.0	84630	6009.0	30190	1	6.0	30145
16006	79706	2	16.0	79676	5009.3	25082	2	5.0	25035
15007	74793	4	15.0	74758	4009.6	19977	1	4.0	19929
14007	69910	2	14.0	69875	3009.9	14972	0	3.0	14923
13007	65015	1	13.0	64980	2010.2	10067	1	2.0	10016
12007	59111	2	12.0	59077	1010.4	4962	1	1.0	4911
11007	54209	1	11.0	54175	511.35	2509	1	.5	2453
10008	49306	2	10.0	49267	411.37	2119	0	.4	2060
9008.4	44401	4	9.0	44360	311.34	1529	1	.3	1473
8008.6	39498	2	8.0	39456	211.36	938	1	.2	888
7008.7	35593	2	7.0	35549	111.36	545	1	.1	462

• TABELA VI.23 - NÚMERO DE PULSOS NA SAÍDA (V/F) PARA $I_c = 100 \text{ nA}$ - ESCALA 10^{-2}

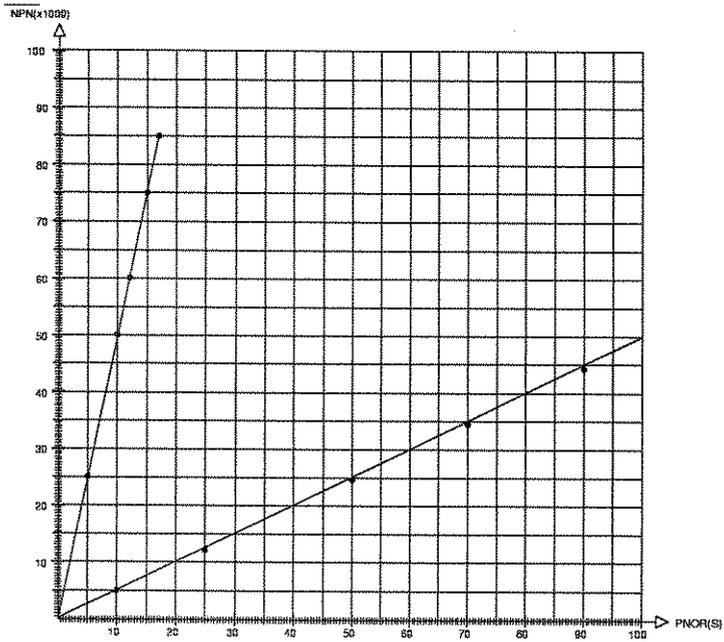
As funções de transferência para cada uma das tabelas acima, bem como os erros encontrados são apresentados a seguir:

- $NPN = 497,9 PNOR - 12,56$ $e = 0,4\%$
- $NPN = 4999 PNOR + 284$ $e = 0,065\%$
- $NPN = 489,7 PNOR + 202,6$ $e = 1,3\%$
- $NPN = 5004 PNOR - 25$ $e = 0,06\%$
- $NPN = 488,2 PNOR + 7,9$ $e = 2,3\%$
- $NPN = 5028 PNOR - 10,15$ $e = 0,56\%$
- $NPN = 491 PNOR + 4,239$ $e = 1,78\%$
- $NPN = 4972 PNOR - 4,5$ $e = 0,56\%$

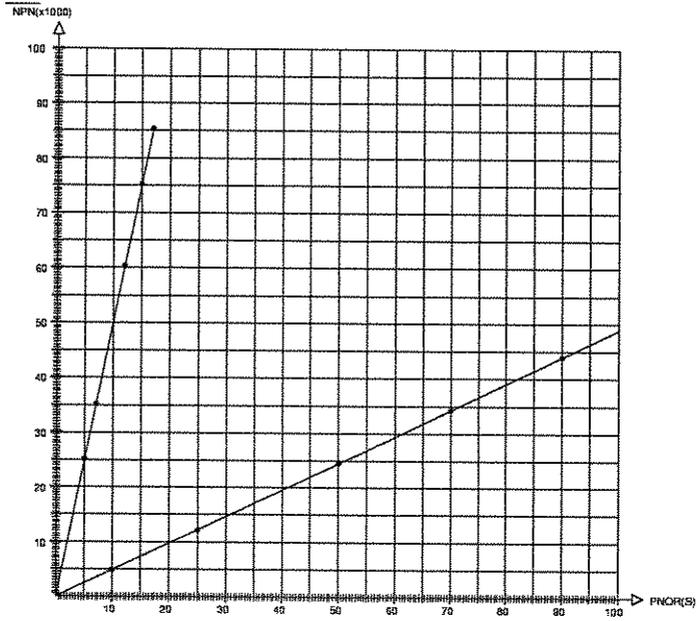
Podemos observar que a precisão das medidas é muito maior para as correntes próximas do fundo de escala, o que já era esperado, uma vez que o conversor tensão frequência apresenta um desempenho melhor nesta região. As figuras VI.14 a VI.17 nos mostram a representação gráfica para os dados das tabelas acima.



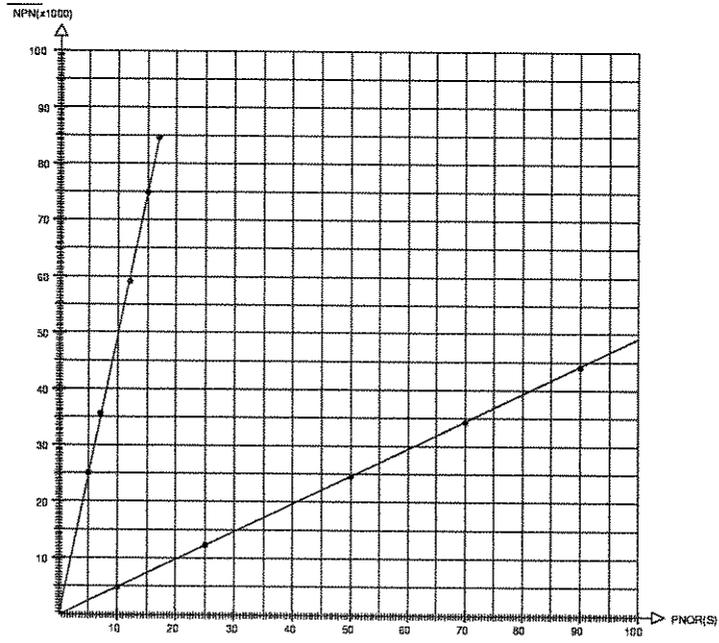
• FIGURAVI.14 - NPN x PNOR - $I_e = 100 \mu A$ - ESCALAS 10^2 e 10^1



• FIGURAVI.15 - NPN x PNOR - $I_e = 10 \mu A$ - ESCALAS 10^1 e 1



• FIGURAVI.16 - NPN x PNOR - $I_e = 1 \mu A$ - ESCALAS $1 e 10^{-1}$



• FIGURAVI.17 - NPN x PNOR - $I_e = 100 nA$ - ESCALAS $10^{-1} e 10^{-2}$

CAPÍTULO VII

VII -Conclusão

As medidas efetuadas em bancada, como pode ser comprovado no capítulo anterior, demonstram a viabilidade do circuito proposto para o medidor de dose implantada. Procuramos manter a diretriz de projetar um equipamento *robusto* que não necessitasse de um procedimento recursivo de calibração, eliminando-se assim os ajustes periódicos e facilitando a operação do equipamento. Dessa forma existem somente: o controle do ganho do conversor (V/F) que deve ser ajustado uma vez durante a calibração da placa; os ajustes das fontes de corrente utilizadas para teste do equipamento, as quais uma vez calibradas não necessitam de ajustes posteriores; o ajuste inicial do *off-set* do conversor I/V. Os erros introduzidos pela tensão de *off-set* nos estágios de conversão tensão-frequência e ganho-filtro são muito pequenos comparados com os possíveis erros introduzidos pelo estágio de entrada (I/V). Devido a isto, a tensão de *off-set* deste estágio é controlada pelo microprocessador através de dois comparadores e um conversor D/A que compensa automaticamente o *off-set* deste estágio antes de cada implantação.

A precisão desejada nas medidas da dose implantada foi alcançada e para correntes próximas do fundo de escala é melhor do que 1%. Podemos melhorar ainda mais a precisão no início da escala introduzindo algumas modificações na placa de circuito impresso e utilizando resistores de realimentação com 0,1% de variação entorno do valor nominal.

O fato de se utilizar um microprocessador para o controle das variáveis que estão sendo medidas, implica em se ter um equipamento flexível, no qual podemos alterar ou implementar novas características através da mudança do *software*.

VII.1 - Sugestões para a Continuação do Trabalho.

Como mencionamos o microprocessador nos fornece algumas facilidades para a implementação de novas características no equipamento. Sugerimos a seguir algumas delas que julgamos interessantes para um melhor aproveitamento do potencial que o dosímetro nos apresenta.

A primeira seria a introdução de um receptor transmissor síncrono/assíncrono universal (USART) para estabelecer a comunicação entre o microprocessador e uma impressora, para que os dados referentes à uma implantação, tais como: dose implantada, tempo de implantação, tipo de dopante, corrente de implantação, número da lâmina implantada, etc, pudessem ser automaticamente registrados.

Um outro desenvolvimento importante seria o de um equipamento para a medida da corrente dos pequenos copos de Faraday localizados na parte anterior do copo de Faraday principal (item III.3.1). Este equipamento deve conter basicamente quatro módulos similares à placa analógica e um circuito de interface que possibilite a comunicação com o microprocessador do dosímetro, que prevê esta possibilidade e pode processar os dados enviados a fim de atuar sobre a fonte de tensão que controla a deflexão eletrostática do sistema de varredura do implantador para manter a homogeneidade da implantação.

APÊNDICE - A

Diagramas dos circuitos elétricos do medidor de dose de íons implantados (DOSÍMETRO).

FIGURA A-1

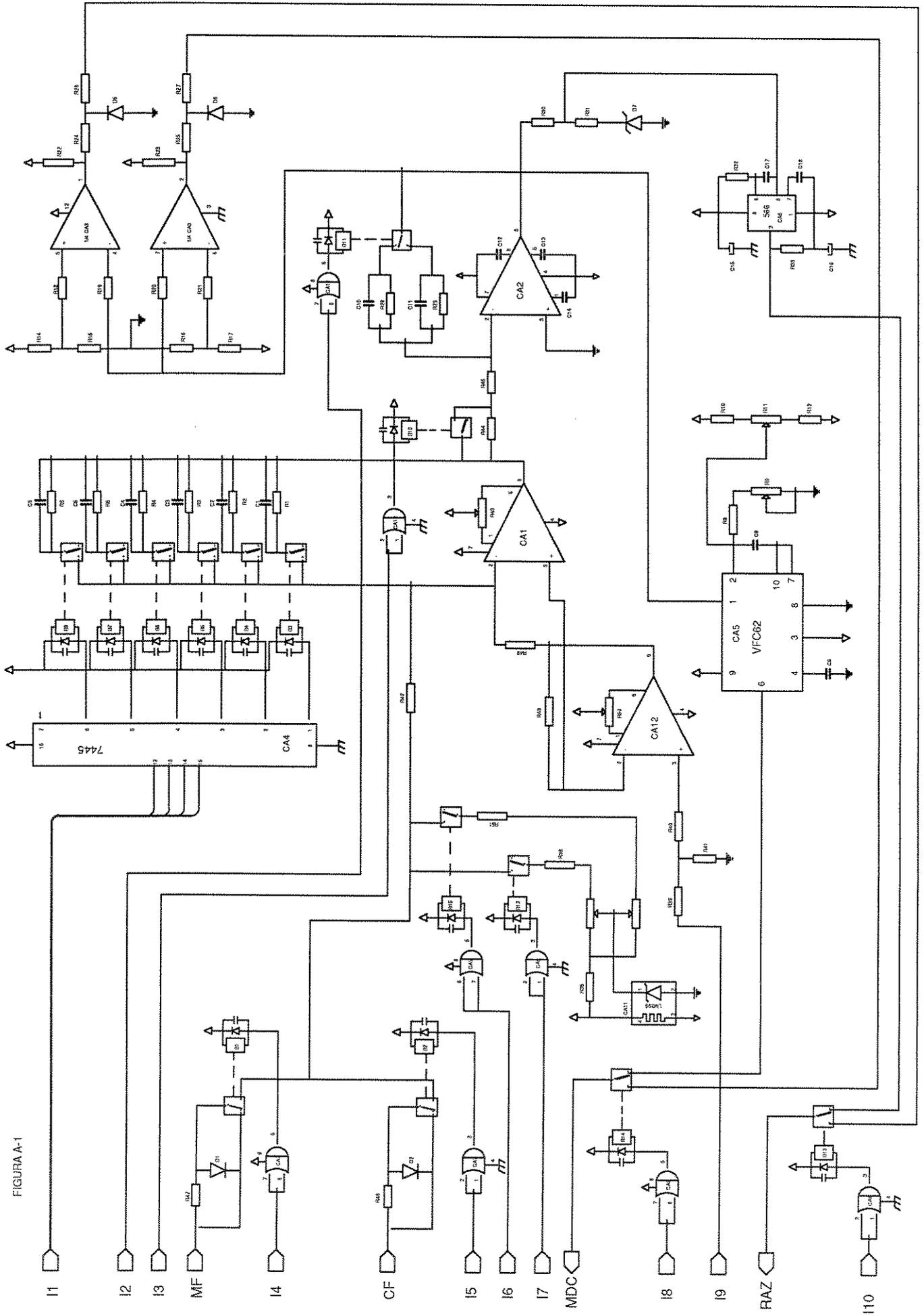


FIGURA A-2

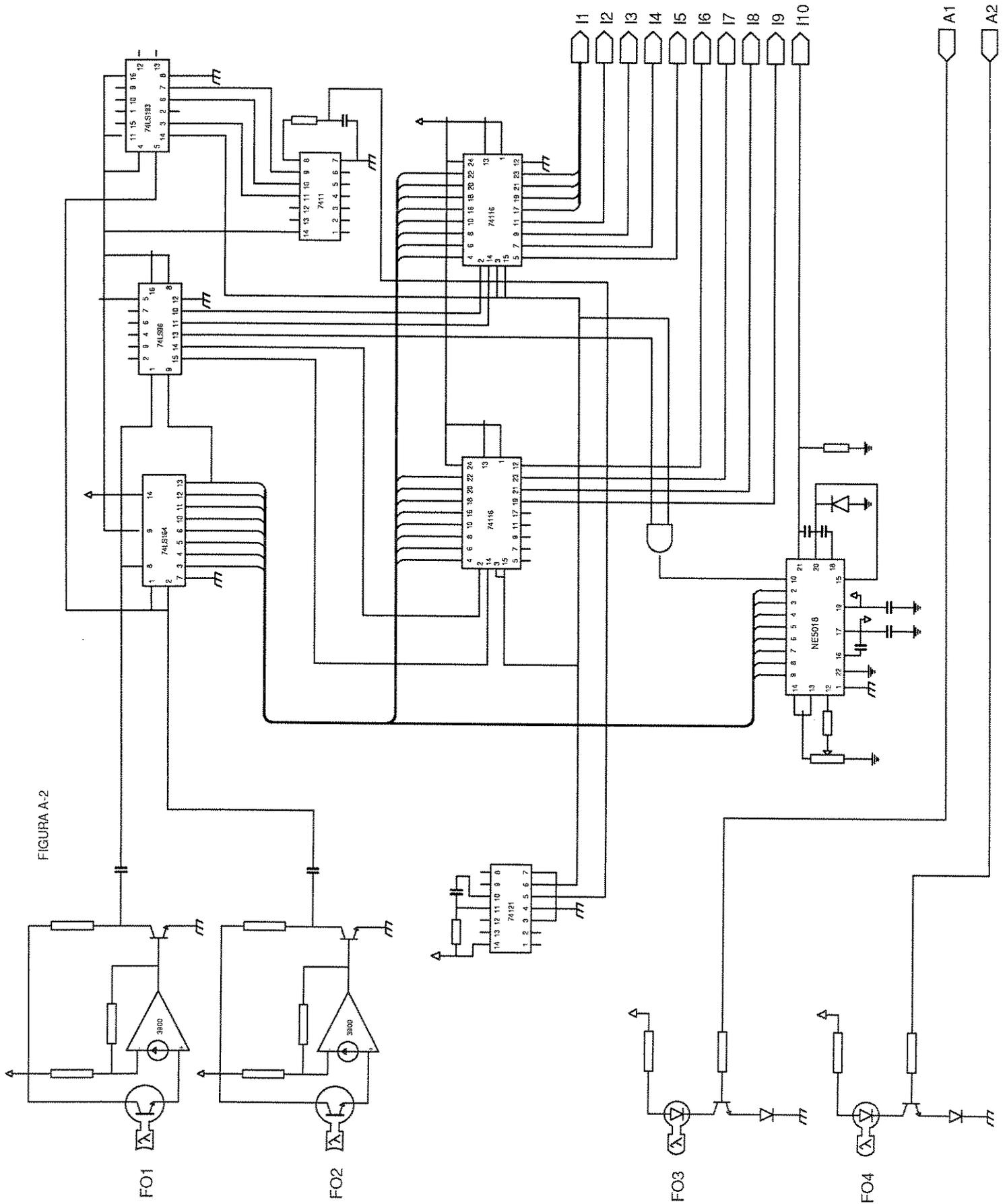
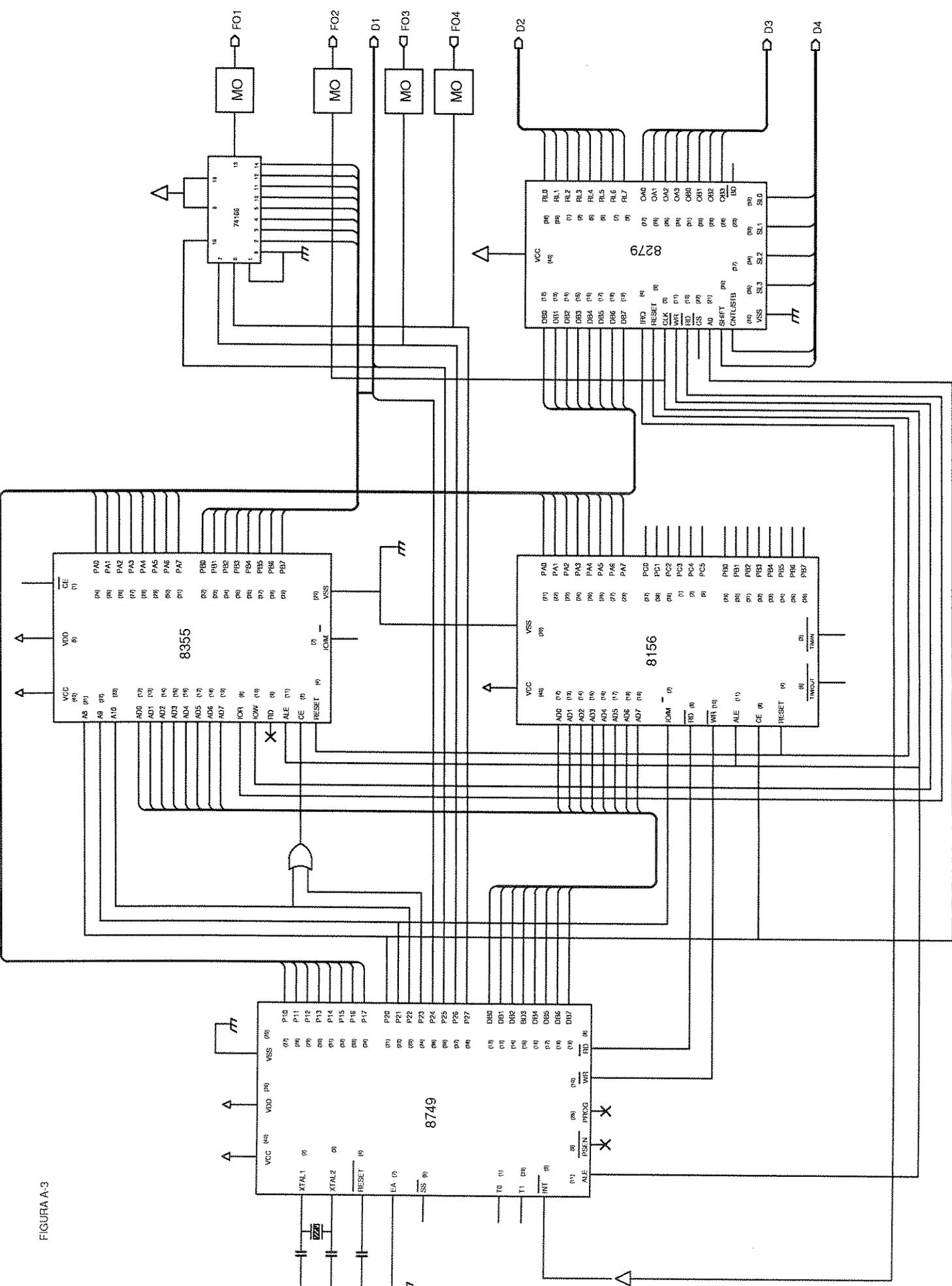


FIGURA A-3



REFERÊNCIAS

- [1] Ziegler, J.F. - Ion Implantation - New York, 1984
- [2] Shockely, W. - Forming Semiconductive devices by ionic bombardment - US Patent - 1954
- [3] Balzer - Technical Paper - 1970
- [4] Eaton Corporation - Technical Paper IB203 - 1983
- [5] Freeman, J. H. - Ion Implantation in Semiconductors, p. 555 . Plenum, New York - 1975
- [6] Balzer - Intermediate current implanter SCANIBAL 1978
- [7] Damiani, Furio - Projeto de um implantador de íons para 40 Kev - Tese de Mestrado - Unicamp, 1976
- [8] Chernow, F. - Ion Implantation in semiconductors - New York 1976
- [9] Hirvonen, J.K. - Treatise on Materials Science and Technology - v.18 - Ion Implantation - Academic Press 1980
- [10] Gibbons, J.F. - Proceedings of the IEEE, 56 (3) 295-319, 1968
- [11] Course - 1984 - Philips International Institute Studies
- [12] Function Circuits Design and Application - Burr Brown - 1985
- [13] Integrated Circuits Analog Device - Data Book - 1984
- [14] Operational Amplifiers - Barna A. 1972

[15] Teledayne Data aquisition Design Handbook 1984

[16] Jung. A. - IC OP-AMP Cookbook - 1978

[17] Microsystem Components Handbook Vol I-II 1984

[18] MCS-48 - Single Chip Microcomputers User's Maneual - Vol II 1984

LISTA DAS FIGURAS

FIGURA I.1 - Configurações para implantadores.	I-6
FIGURA I.2 - Corrente de feixe sobre a lâmina x anos	I-8
FIGURA I.3 - Desenvolvimento da energia de implatação	I-9
FIGURA I.4 - Aumento da temperatura durante a implatação	I-12
FIGURA I.5 - Aumento da temperatura em função da irradiância ...	I-12
FIGURA I.6 - Frequência de varredura	I-14
FIGURA II.1 - Implantador iônico LED/FEC/UNICAMP	II-2
FIGURA II.2 - Composição das formas de onda de deflexão	II-4
FIGURA II.3 - Diagrama esquemático da câmara de alvos	II-7
FIGURA III.1 - Aplicações da Implantação Iônica	III-3
FIGURA III.2 - Diagrama esquemático do sistema de medida da câmara de alvos	III-7
FIGURA III.3 - Circuito de medida da quantidade de carga	III-9
FIGURA III.4 - Circuito de medida de carga utilizado no dosímetro ..	III-10
FIGURA III.5 - Forma de onda do circuito de medida de dose	III-11
FIGURA IV.1 - Diagrama de blocos do dosímetro	IV-2

FIGURA IV.2 - Diagrama de blocos da placa digital	IV-4
FIGURA IV.3 - Fluxograma - auto zero	IV-6
FIGURA IV.4 - Erro típico de linearidade x frequência de operação ..	IV-8
FIGURA IV.5 - Erro típico de linearidade x frequência de fundo de escala	IV-8
FIGURA IV.6 - Variação do fundo de escala x frequência de fundo de escala	IV-9
FIGURA IV.7 - Diagrama de conexão do VFC62 para conversão V/F ..	IV-10
FIGURA IV.8 - Formas de onda do conversor V/F	IV-11
FIGURA V.1 - Fluxograma das operações de uma implantação	V-2
FIGURA V.2 - Fluxograma da rotina DOSE.	V-3
FIGURA V.3 - Fluxograma da rotina DIV	V-4
FIGURA V.4 - Fluxograma da rotina PULSO	V-5
FIGURA V.5 - Fluxograma da rotina CONTI	V-6
FIGURA V.6 - Fluxograma da rotina CONTA	V-7
FIGURA V.7 - Painel de controle do dosímetro	V-8
FIGURA VI.1 - Montagem para caracterização da placa analógica ...	VI-3
FIGURA VI.2 - Caracterização do estágio I/V - Escala 10^3	VI-6

FIGURA VI.3 - Caracterização do estágio I/V - Escala 10^2	VI-8
FIGURA VI.4 - Caracterização do estágio I/V - Escala 10^1	VI-10
FIGURA VI.5 - Caracterização do estágio I/V - Escala 1	VI-12
FIGURA VI.6 - Caracterização do estágio I/V - Escala 10^{-1}	VI-14
FIGURA VI.7 - Caracterização do estágio I/V - Escala 10^{-2}	VI-16
FIGURA VI.8 - Caracterização do estágio G/F	VI-18
FIGURA VI.9 - Caracterização do estágio V/F	VI-20
FIGURA VI.10 - Caracterização dos blocos em cascata	VI-23
FIGURA VI.11 - Montagem para a caracterização através da contagem dos pulsos de saída	VI-24
FIGURA VI.12 - Número de pulsos na saída (NP) x (PER)	VI-30
FIGURA VI.13 - Fonte de corrente	VI-31
FIGURA VI.14 - NPN x PNOR - $I_e = 100 \mu A$ - Escalas 10^2 e 10^1	VI-37
FIGURA VI.15 - NPN x PNOR - $I_e = 10 \mu A$ - Escalas 10^2 e 1	VI-37
FIGURA VI.16 - NPN x PNOR - $I_e = 1 \mu A$ - Escalas 1 e 10^{-1}	VI-38
FIGURA VI.17 - NPN x PNOR - $I_e = 100 n A$ - Escalas 10^{-1} e 10^{-2}	VI-38

Lista das Tabelas

Tabela VI.1 - Limites de corrente do dosímetro	VI-4
Tabela VI.2 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 10^3	VI-5
Tabela VI.3 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 10^2	VI-7
Tabela VI.4 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 10^1	VI-9
Tabela VI.5 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 1	VI-11
Tabela VI.6 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 10^{-1}	VI-13
Tabela VI.7 - Caracterização do estágio (I/V) - Escala 10^{-2}	VI-15
Tabela VI.8 - Caracterização do estágio G/F	VI-17
Tabela VI.9 - Caracterização do estágio V/F	VI-19
Tabela VI.10 - Caracterização dos blocos em cascata	VI-22
Tabela VI.11 - Número de pulsos na saída V/F para $V_e = 20$ mV	VI-25
Tabela VI.12 - Número de pulsos na saída V/F para $V_e = 40$ mV	VI-26
Tabela VI.13 - Número de pulsos na saída V/F para $V_e = 60$ mV	VI-27
Tabela VI.14 - Número de pulsos na saída V/F para $V_e = 80$ mV	VI-28
Tabela VI.15 - Número de pulsos na saída V/F para $V_e = 100$ mV	VI-29

Tabela VI.16 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 100 \mu A$ - Escala 10^2	VI-32
Tabela VI.17 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 100 \mu A$ - Escala 10^1	VI-32
Tabela VI.18 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 10 \mu A$ - Escala 10^1	VI-33
Tabela VI.19 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 10 \mu A$ - Escala 1	VI-33
Tabela VI.20 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 1 \mu A$ - Escala 1	VI-34
Tabela VI.21 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 1 \mu A$ - Escala 10^{-1}	VI-34
Tabela VI.22 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 100 nA$ - Escala 10^{-1}	VI-35
Tabela VI.23 - Número de pulsos na saída V/F para - $I_e = 100 nA$ - Escala 10^{-2}	VI-35

UNIDADE	30
PROC.	308/91
DOAÇÃO, PREÇO ESTIMATIVO	08/300,00
DATA	08/05/91