

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICO-QUÍMICA

OTIMIZAÇÃO DA ESTABILIDADE ESPACIAL DO RAIOS GERADO  
PELO LASER DE HÉLIO-NEÔNIO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

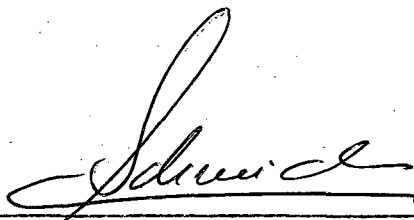
HANS GERHARD PETERS

FLORIANÓPOLIS - SC

JUNHO - 1.986

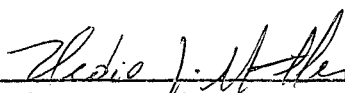
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM CIÊNCIAS"

ESPECIALIDADE EM FÍSICO-QUÍMICA, OPÇÃO FÍSICA DO LASER E APROVADA  
EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.



---

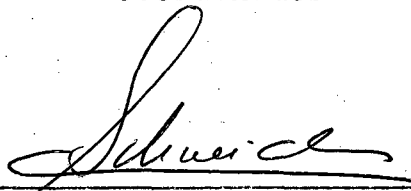
Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing.  
Orientador



---

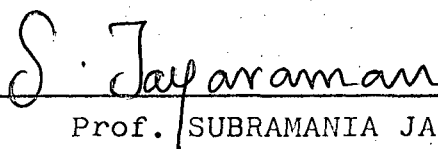
Prof. HÉDIO JOSÉ MULLER, Dr.  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



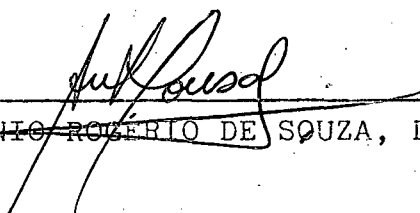
---

Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing.



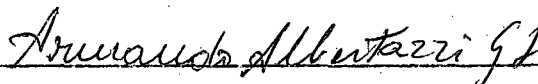
---

Prof. SUBRAMANIA JAYARAMAN, Dr.



---

Prof. ANTÔNIO ROBERTO DE SOUZA, Dr.



---

ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JR., M. Sc.

## A G R A D E C I M E N T O S

---

A DEUS, pela saúde e proteção concedidas;

Ao CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ, pelo apoio financeiro;

À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA;

Ao professor CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, pela orientação deste trabalho;

Ao professor LUIS T. S. SIEDLER;

Ao professor SUBRAMANIA JAYRAMAN;

Ao professor ANTÔNIO ROGÉRIO DE SOUZA;

Aos colegas ARMANDO A. GONÇALVES JR., LUIZ D. VALENTINA e UDO WONDRAECK, pela amizade e colaboração direta deste trabalho;

Aos demais funcionários, estagiários e bolsistas do LABMETRO, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho;

Aos colegas do CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICO-QUÍMICA;

À  
Mirian, minha esposa  
e  
nossas filhas Helene e Heidi,  
com muito amor.

"A origem do mundo material deve atribuir-se à inteligência e sabedoria dum poderosíssimo Ser, sempre existente e presente em toda a parte, que domina, consoante a sua vontade, todas as parcelas do universo, muito mais eficazmente do que a nossa alma domina pela sua vontade os movimentos do corpo unido a ela".

(Sir Isaac Newton)

# S U M Á R I O

---

RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
ZUSAMMENFASSUNG .....	xi
 CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	 01
1.1 O Laser na Metrologia .....	01
1.2 O Laser de Alinhamento .....	03
1.2.1 Princípios e Operação .....	03
1.2.2 Aplicações do Laser de Alinhamento .....	05
1.3 Importância da Estabilidade da Reta Padrão .....	08
1.4 Proposta de Trabalho .....	09
 CAPÍTULO II - INSTABILIDADE GEOMÉTRICO-ESPACIAL DA RETA PADRÃO.....	  11
2.1 Princípio de Funcionamento do Gerador da Reta Padrão ....	11
2.1.1 O Laser de He-Ne .....	12
2.1.2 Vantagens do Laser de He-Ne .....	17
2.2 Fontes de Instabilidade .....	18
2.2.1 Causas de Natureza Mecânica .....	18
2.2.2 Causas de Natureza Térmica .....	19
2.2.3 Causas de Natureza Física .....	19
2.2.4 Causas de Natureza Elétrica .....	21
2.2.5 Análise Relativa das Causas .....	22
2.3 Comportamento Temporal .....	22
2.4 Características da Instabilidade .....	25
 CAPÍTULO III - ANÁLISE DO RESSOADOR ÓPTICO .....	 29
3.1 Definição de Ressonador .....	29
3.2 Tipos de Ressonadores .....	35
3.3 Perdas no Ressonador Óptico .....	38
3.4 Caminho Óptico do Feixe .....	42

CAPÍTULO IV - DETERMINAÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO DO FEIXE	
LASER .....	44
4.1 Caracterização do Perfil Energético .....	44
4.2 Otimização do Perfil Energético .....	46
4.3 Medição do Perfil Energético .....	48
4.4 Resultados dos Trabalhos Experimentais .....	53
CAPÍTULO V - INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA INSTABILIDADE	
ESPACIAL DO FEIXE .....	57
5.1 Método para Medição da Instabilidade .....	57
5.2 O Banco de Ensaio .....	59
5.2.1 O Banco Óptico .....	59
5.2.2 Componentes Mecânicos .....	61
5.2.3 Componentes Ópticos .....	63
5.2.4 Equipamentos Eletrônicos .....	66
5.2.5 Processo Automatizado de Medição .....	68
5.3 Fotodetetores .....	70
5.3.1 Fotodiodos .....	71
5.3.2 Fotodiodos de Posição .....	77
5.3.3 Ajuste e Calibração .....	80
5.4 Procedimento de Ensaio .....	85
5.5 Recomendações para a Determinação da Instabilidade .....	86
5.6 Técnica de Otimização da Estabilidade .....	88
CAPÍTULO VI - ESTUDO EXPERIMENTAL DA INSTABILIDADE DE LASERS.	89
6.1 Os Lasers Analisados .....	89
6.2 Tempo de Estabilização .....	91
6.3 Influências Externas na Instabilidade .....	98
6.3.1 Comportamento do Suporte Mecânico .....	98
6.3.2 Fluxos de Ar .....	98
6.3.3 Tensão de Rede .....	100
6.4 Análise Comparativa .....	100
CAPÍTULO VII - OTIMIZAÇÃO DA ESTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE	
EMITIDO POR UM LASER .....	107
7.1 Quanto à Estrutura do Ressonador .....	107
7.2 Quanto à Ventilação .....	108
7.3 Quanto ao Telescópio .....	108

7.4 Quanto aos Ruídos Elétricos .....	109
7.5 Quanto à Potência do Laser .....	109
7.6 Quanto ao Tempo de Estabilização .....	109
7.7 Quanto ao Ambiente .....	110
CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES .....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	114



## R E S U M O

-----

Para a realização da medição dos erros geométricos de componentes ou trajetórias em máquinas-ferramenta, requer-se instrumentos de alta precisão e confiabilidade, objetivando a obtenção de resultados que espelhem da melhor forma possível, o real comportamento da máquina.

Um desses instrumentos, de grande versatilidade, é o laser de alinhamento, composto de um laser de gás hélio-neônio e um sistema optoeletrônico para medição de deslocamentos transversais, relativamente ao feixe laser, que é tomado como reta padrão nos ensaios de retilidade.

No entanto, o feixe gerado pelo laser apresenta uma instabilidade espacial, causada por diversos fatores que prejudicam a qualidade dos resultados. Objetivando criar meios de avaliar quantitativamente tal instabilidade, e a partir disto estudar soluções de otimização, fez-se um estudo teórico-experimental das diferentes causas, desenvolvendo-se uma metodologia de medição e um banco de ensaio adequado para medição dessas instabilidades.

A medição, automatizada, da variação de posição do feixe no espaço, é realizada por meio de fotodetetores, acoplados a um sistema automático de aquisição de sinais. Esse sistema é controlado por um microcomputador, que além dessa função, realiza o devido processamento dos sinais, fornecendo os resultados em forma de gráficos ou tabelas.

Foram então analisados experimentalmente quatro modelos diferentes de lasers de He-Ne, considerando sua forma construtiva e influências de perturbações externas, na estabilidade espacial do feixe, propondo-se a partir dos resultados obtidos, uma metodologia e/ou dispositivos convenientes para otimização desse parâmetro.

A B S T R A C T  
-----

To measure the geometric errors of components or trajectories of machine tools, instruments of high precision and reliability are required. Specific objective results reflect the real performance of the machine.

One of this instruments, which is highly versatile, is the alignment laser beam. It is composed of a helium - neon laser and an optoelectronic system to measure the transversal movement, when compared to the laser beam, which is the standard line for straightness measuring.

Therefore, the beam produced by the laser is spatially unstable, as a result of various factors which hinder the quality of the results. To create objective means to quantitatively evaluate the extent of the instability and from this, to project solutions, a theoretical experimental study was made of the various causes, developing a method of measuring and a standard of measurement of the instability.

The automated measurement of the variation of position of the beam in space, is done by photodetectors, coupled with an automatic signal system. The system is controlled by a microcomputer, which has the additional function of processing the signals. The results are recorded on graphs or tables.

Four different models of helium - neon lasers were experimentally analyzed, for their formation an sensitivity to external disturbances and for the spatial stability of their beams. From the results obtained, a method and appropriate equipment to best utilize the laser beam were proposed.

## Z U S A M M E N F A S S U N G

-----

Zur Durchführung der Messung von geometrischen Fehlern von Maschinenteilen oder Längsrichtungen in Werkzeugmaschinen sind Instrumente von hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit benötigt, mit dem Ziel der Erreichung von Ergebnissen, die auf der besten Art und Weise das wahre Verhalten der Maschine widerspiegeln.

Eines dieser Instrumente von großer Anwendungsmöglichkeit ist das Laser-Geradheits-Meßsystem, bestehend aus einem Helium-Neon-Laser und einem optoelektronischen System zur Messung von transversalen Ortsveränderungen, in bezug auf den Laserstrahl der in den Geradheitsprüfungen als Referenzgerade genommen wird.

Der vom Laser hergestellte Strahl erweist aber eine räumliche Lageinstabilität, verursacht durch verschiedene Faktoren, die die Qualität der Ergebnisse schaden. Mit der Absicht der Herstellung von Mitteln zur qualitativen Abschätzung dieser Instabilität und von da die best möglichen Lösungen studieren, wurde eine theoretische und praktische Forschung der verschiedenen Ursachen durchgeführt, und es wurde eine Messungsmethodologie und geeignete Übungsgeräte zur Messung dieser Instabilitäten entwickelt.

Die automatisierte Messung der Variationsstelle des Strahles im Raum wird durch Strahllagedetektoren durchgeführt, angeschlossen an einem automatischen System von Signalenerwerb. Dieses System wird von einem Microcomputer kontrolliert, der außer dieser Funktion auch die notwendigen Signale verarbeitet. Die Ergebnisse werden graphisch oder in Tabellen wiedergegeben.

Es wurden experimentellerweise vier verschiedene Modelle von He-Ne-Laser untersucht, unter Berücksichtigung ihrer Bauform und der Einflüsse von äußeren Störungen in der räumlichen Stabilität des Strahles. Auf Grund der erlangten Ergebnisse wird eine passende Methodologie und/oder passende Maßnahmen zur Besserung dieses Parameter vorgeschlagen.

## 1. INTRODUÇÃO

-----

### 1.1 O LASER NA METROLOGIA

A evolução tecno-científica, requer gradativamente equipamentos de teste e ensaio mais sofisticados, para a obtenção de informações cada vez mais confiáveis sobre os sistemas e processos, às quais revertem-se em benefício da humanidade, desde que devidamente aplicados.

O laser tem sido um desses instrumentos, que vem sendo aperfeiçoado continuamente e aumentado largamente sua gama de aplicações, nas diferentes áreas da Ciência e Tecnologia, devido às suas peculiares características de:

- a) Direcionalidade: somente a luz gerada na direção do eixo óptico pode deixar o laser. O feixe emerge inerentemente bem colimado e altamente direcionado. É esta propriedade que o faz

tão requerido em aplicações onde a direção de propagação se torna essencial, como as tratadas neste trabalho.

- b) Monocromaticidade ou cor pura: significa luz de um só comprimento de onda e somente pode ser obtida de uma onda eletromagnética com frequência bem definida, amplificada numa cavidade ressonante. Para aplicações como holografia, esta propriedade é fundamental.
- c) Coerência temporal e espacial, são peculiaridades da luz do laser e que a fazem tão importante para muitas aplicações, incluindo novamente a holografia, a medição de deslocamentos por meio da interferometria, etc. Diz-se que a luz apresenta coerência temporal quando a frequência se mantém constante, ou seja, quando a diferença de fase dos campos elétricos de uma onda eletro-magnética entre os instantes  $t$  e  $t + \mathcal{T}$  permanecer a mesma em qualquer tempo, para o intervalo  $\mathcal{T}$ . Se a frente de onda apresentar uma forma constante, ou seja, quando os campos elétricos de dois pontos distintos sobre a mesma frente de onda apresentarem diferença de fase nula, em qualquer tempo, diz-se que ocorre uma coerência espacial.
- d) Luminância energética: define-se a luminância energética de uma fonte de ondas eletro-magnéticas, como sendo a potência emitida por unidade de área, por unidade de ângulo sólido. É a característica proporcionada pela amplitude da onda amplificada, por causa da monocromaticidade e ainda devido à direcionalidade. Aplicações na medicina e na metalurgia, usam basicamente essa propriedade. /1, 2/

A Metrologia, também acompanhando essa evolução, está se valendo do laser na medição de grandezas físicas e principalmente geométricas, visando resultados de elevada confiabilidade e abrangência, bem como, equipar-se com instrumentos de alta versatilidade e racionalidade.

Dentre as muitas aplicações do laser na Metrologia, podem ser enumeradas algumas, consideradas as mais exploradas:

- verificação de alinhamento na construção de prédios, pontes,

- túneis, tubulações, levantamentos topográficos, etc. /3/
- medição de grandes distâncias /3/
  - medição de deslocamentos e conseqüentemente de velocidades e acelerações, utilizando o Laser Interferométrico /4/
  - medição da velocidade de fluidos /5/
  - medição do diâmetro de pequenas partículas e fios, bem como de pequenos orifícios e fendas, através da difração /6/
  - avaliação qualitativa de irregularidades de superfícies /7/
  - avaliação qualitativa da esfericidade de uma superfície /7/
  - análise experimental de tensões, por meio da Holografia Interferométrica /8/
  - ensaios geométricos de movimentos de Máquinas Ferramenta e de componentes mecânicos, com Laser de Alinhamento /9/.

As características do laser utilizado nessa última aplicação, serão estudadas neste trabalho.

## 1.2 O LASER DE ALINHAMENTO

### 1.2.1 Princípios e operação

Para os ensaios geométricos, um dos vários sistemas de medição atualmente utilizados, é o laser de alinhamento (LA) (fig. 1.1) /10/ e que é composto das seguintes partes:

a) unidade geradora da reta padrão (UGRP). É a unidade que gera o feixe de laser, que constitui para os ensaios geométricos uma reta padrão (RP) /9/ e pode ser utilizado como tal para distâncias de até 30 m /10/. Esta unidade por sua vez, é composta de:

- laser de gás hélio-neônio que emite um feixe visível ( $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$  - vermelho) de diâmetro em torno de 1 mm.
- fonte de alimentação de corrente contínua, que fornece a descarga elétrica no tubo de gás.
- telescópio, para ampliar o diâmetro do feixe.

## LASER DE ALINHAMENTO

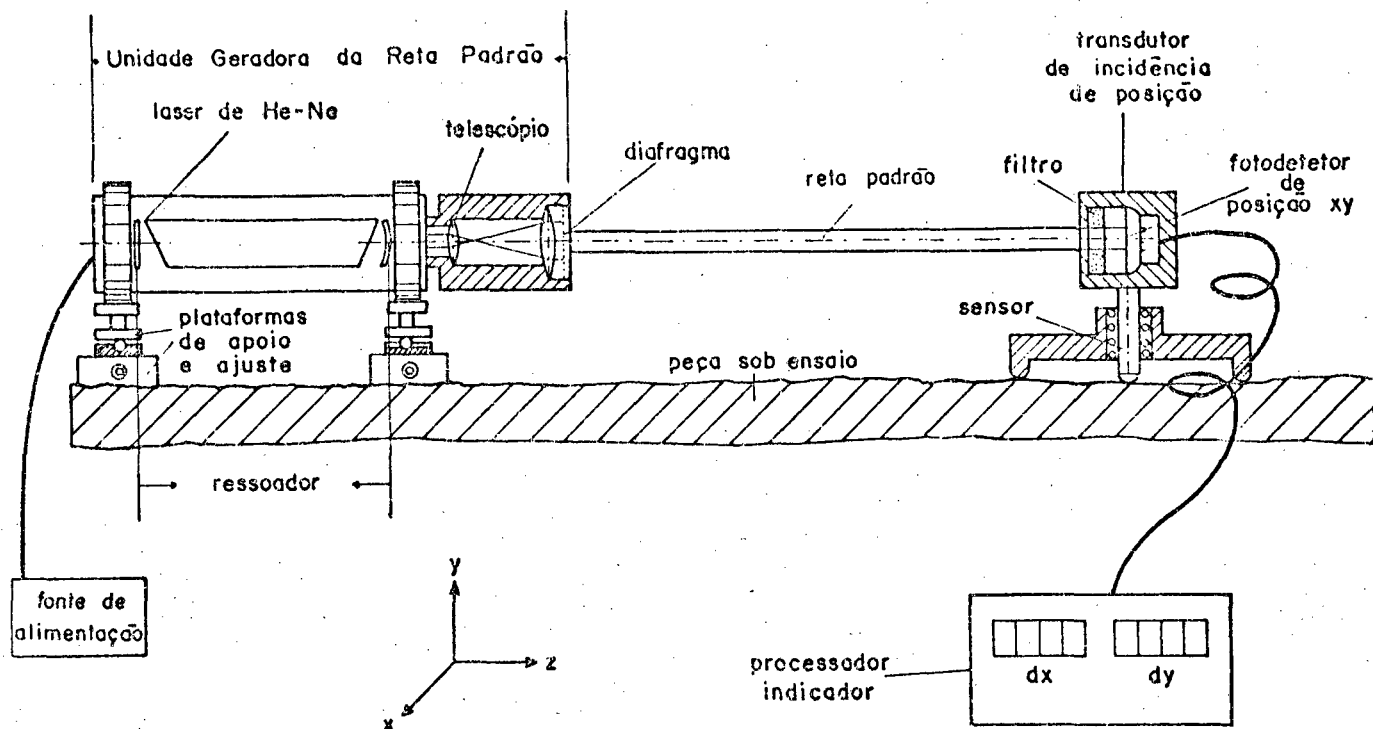


FIG. 1.1 - Os componentes básicos que compõem o Laser de Alinhamento /10/.

- diafragma, na saída do telescópio, para reduzir o diâmetro do feixe, quando necessário.
- b) transdutor de posição de incidência do feixe, que é a unidade através da qual é possível medir a posição de um ponto da peça sob ensaio, relativamente à reta padrão. É composto de:
- sensor, que está em contato com a peça sob ensaio e que localiza o ponto de medição da mesma.
  - filtro de interferência, para permitir somente a incidência da luz do laser, sobre o fotodetector.
  - fotodetector de posição, sobre o qual incide a reta padrão (ou feixe de laser), gerando os sinais elétricos que, devidamente processados, fornecem a medida realizada.
- c) unidade processadora/indicadora dos sinais elétricos, constituída de:

- sistema de aquisição dos sinais (SAS), composto de chave seletora, conversor analógico/digital de alta precisão.
- microcomputador, que por meio de programação adequada, controla o sistema de aquisição de sinais, executa os cálculos necessários e proporciona a saída dos resultados.
- plotadora e impressora, também controladas pelo microcomputador, para fornecerem relatórios das medidas efetuadas.

Com base na figura 1.2 /10/ pode-se observar o processo para medição da posição de um ponto da peça sob ensaio, utilizando o LA. A reta padrão é projetada sobre o fotodetector gerando neste uma fotocorrente, assim denominada por causa dos fótons da luz incidente que dão origem à corrente elétrica. Essa fotocorrente, passa pela região de alta resistividade, dirigindo-se aos 4 eletrodos, sendo em cada caso inversamente proporcional à distância do ponto de incidência aos eletrodos, posicionados nos 4 extremos da região de alta resistividade. Os sinais elétricos assim gerados, dois numa direção x e dois numa direção y, são após uma pré-amplificação, somados e subtraídos respectivamente, para cada direção. Para uma normalização, divide-se a diferença pela soma, obtendo-se então um sinal para cada direção que é proporcional à posição do feixe incidente, relativamente ao centro do fotodetector. Os módulos de medição, processamento e apresentação dos resultados, serão melhor expostos no capítulo 5.

### 1.2.2 Aplicações do Laser de Alinhamento

O LA é o instrumento mais versátil para a realização de ensaios geométricos em máquinas-ferramenta /9/, mais especificamente para verificação geométrica de superfícies, linhas, eixos ou trajetórias /11/, com base na medição do erro de retilidade.



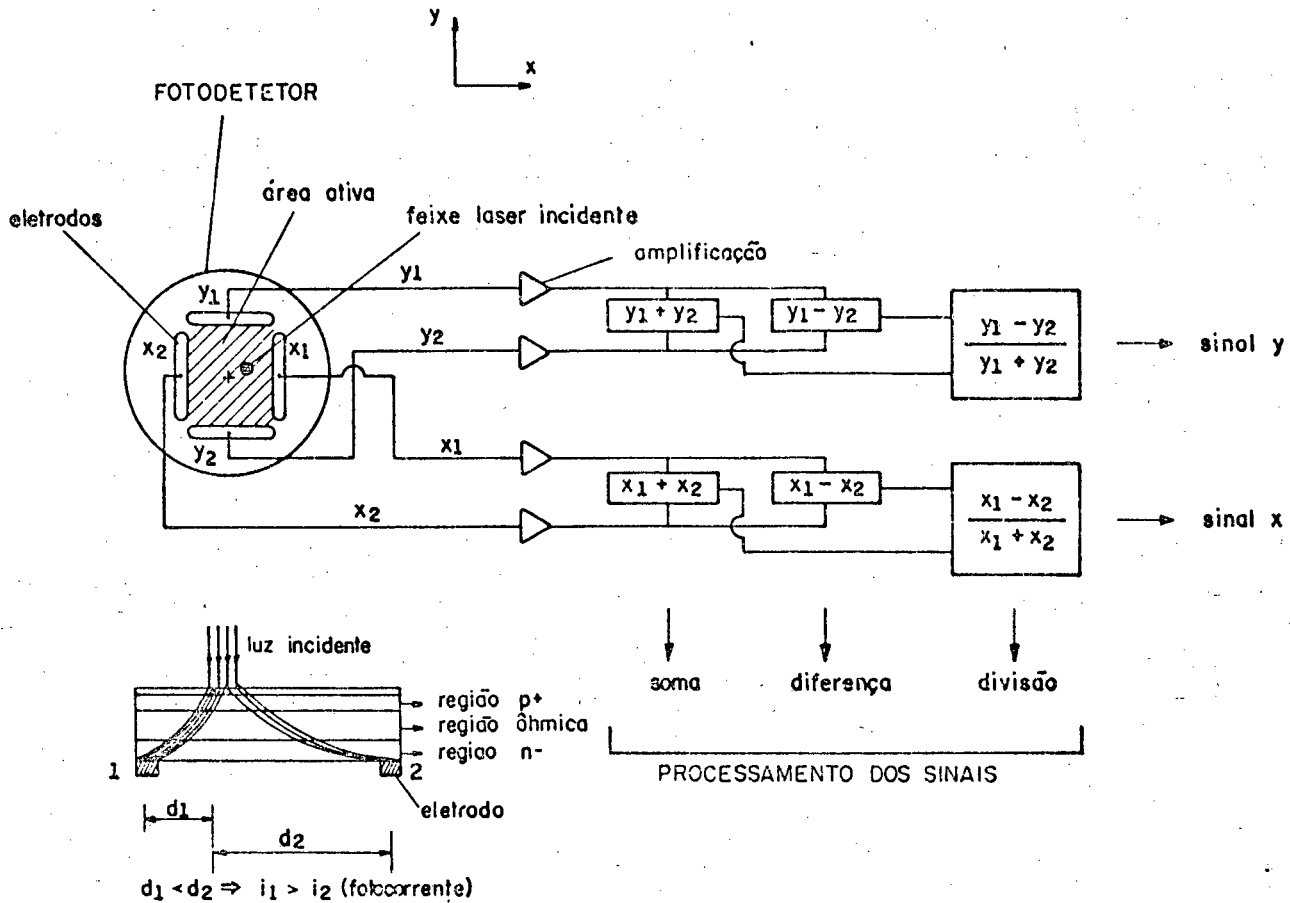
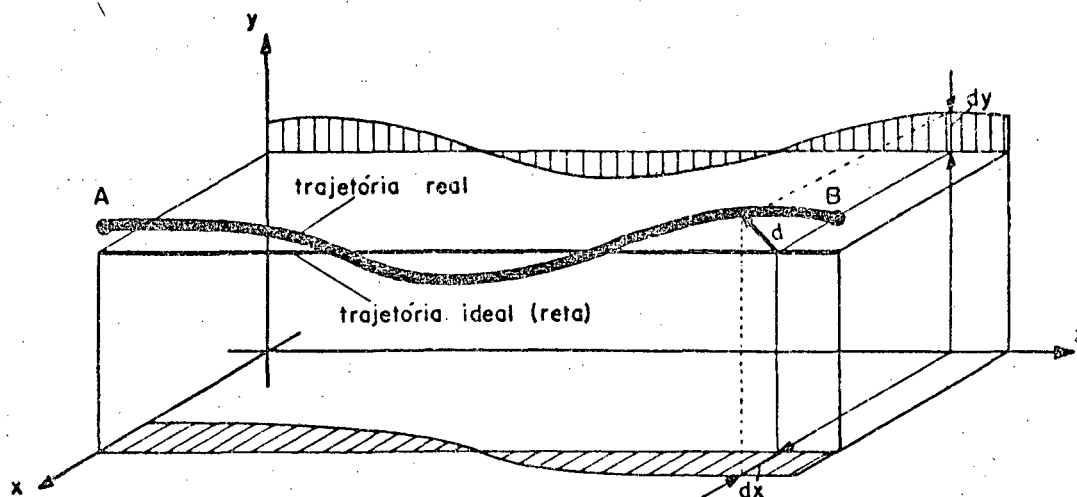


FIG. 1.2 - Tratamento dos sinais gerados pelo feixe laser ao incidir no fotodetector, e obtenção das coordenadas do ponto.

Subentende-se por erro de retilinearidade, a distância de cada ponto de um elemento à sua correspondente posição ideal, caracterizada por uma reta (exemplo: trajetória AB - fig. 1.3). Os erros para melhor interpretação, são normalmente apresentados nas suas componentes segundo dois planos ortogonais associados ao objeto sob teste.

A figura 1.4 mostra a montagem do LA para um ensaio de retilinearidade de uma guia, bem como os módulos de aquisição de sinais, processamento e apresentação dos resultados. Os sinais obtidos também podem ser armazenados em fita ou disco, para posterior processamento e saída dos relatórios. Um filtro passa baixas é utilizado por causa dos ruídos de alta frequência provocados pelo fotodetector de posição.



$dx$  - erro de retilidade na direção  $x$   
 $dy$  - erro de retilidade na direção  $y$

FIG. 1.3 - Erro de retilidade de uma trajetória (direção  $z$ ), erro espacial ( $d$ ) e suas componentes ortogonais ( $dx, dy$ ) /9/.

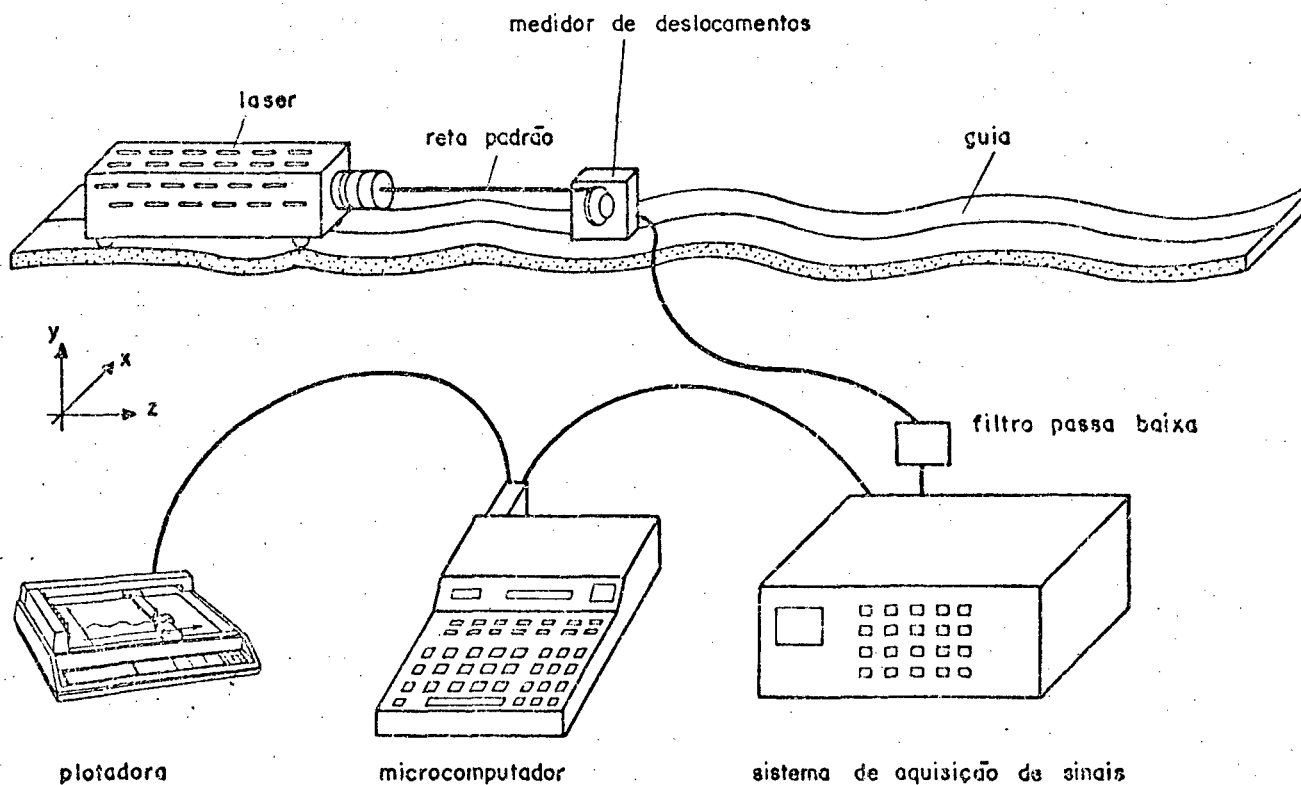


FIG. 1.4 - LA aplicado ao ensaio de retilidade de uma guia. Aquisição, processamento e documentação automatizado.

Como derivados dos ensaios de retilineidade, podem ser citados os ensaios de ortogonalidade, planicidade, paralelismo, alinhamento e equidistância /11/.

Ao se realizar um ensaio de retilineidade de uma guia de uma máquina de medir de precisão, por exemplo, com o LA, define-se inicialmente pontos estratégicos, nos quais serão medidos os erros de retilineidade do objeto sob teste. A unidade geradora da reta padrão requer um posicionamento rígido em relação ao objeto, no caso à guia, de modo a não sofrer as influências de movimentos e vibrações externas. Efetua-se então um ciclo de medidas, ou seja, uma medida do erro em cada um dos pontos pré-definidos. Para um segundo ciclo de medidas, constata-se uma pequena variação dos erros em relação ao primeiro e, para ciclos subsequentes, ocorrerão variações diferentes em relação aos anteriores. Realiza-se então um número otimizado de ciclos de medidas, obtendo-se então o valor médio das medidas, (erros de retilineidade) e a dispersão das medidas.

Na figura 1.5 estão sendo apresentados os resultados de um ensaio conforme exposto, com a UGRP a 200 mm do primeiro ponto de medição; foram realizados 4 ciclos de medidas nesse ensaio e os resultados e gráfico, obtidos com auxílio do microcomputador e plotadora /9/.

### 1.3 IMPORTÂNCIA DA ESTABILIDADE DA RETA PADRÃO

A dispersão das medidas, conforme apresentado na figura 1.5, é causada basicamente pela instabilidade do LA, uma vez que a guia da máquina apresenta uma rigidez e estabilidade excepcional. A instabilidade do LA, tem como causa principal, a instabilidade espacial do feixe, fato que pode ser observado pelo aumento da dispersão das medidas com a posição, numa razão de  $\pm 3 \mu\text{m/m}$ , o que caracteriza uma variação angular da RP relativamente à guia.

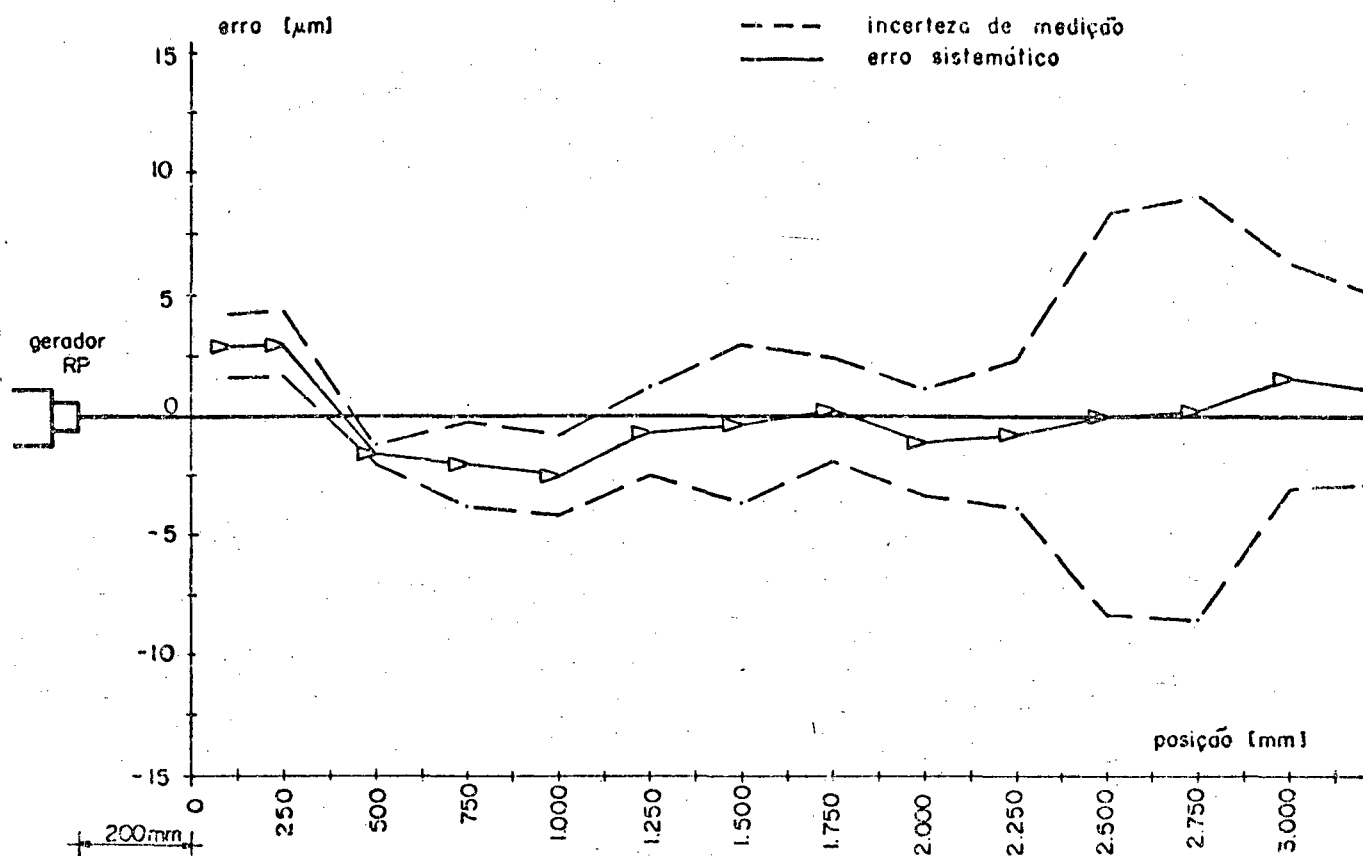


FIG. 1.5 - Representação gráfica dos resultados de um ensaio de retilidade /9/.

Para atender os requisitos da moderna instrumentação, que propõe elementos a ensaiar mais e mais precisos e exige resultados de mínima indeterminação, o ideal seria uma reta padrão perfeitamente estável. Como tal condição é praticamente impossível, uma constante otimização do LA se faz necessário.

#### 1.4 PROPOSTA DE TRABALHO

Caracterizada a importância da estabilidade da reta padrão no LA, terá por objetivo este trabalho, analisar teórico-experimentalmente, as mais diversas causas da instabilidade espacial do feixe laser, e propor soluções no sentido de reduzi-las ou eliminá-las da melhor maneira, a fim de contribuir ao desenvolvimento de lasers de alinhamento, que possibilitem a realização de ensaios geométricos, com uma dispersão das medidas ainda inferior à usualmente alcançada.

Para a parte experimental deste trabalho, serão utilizados alguns lasers disponíveis no LABMETRO (Laboratório de Metrologia e Automatização do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC), equipamentos eletrônicos para a aquisição de sinais, microcomputador, banco óptico, fotodetetores e diversos componentes mecânicos para a montagem dos experimentos.

Dentre os tipos de lasers disponíveis, analisar-se-á, em especial, um protótipo de LA denominado "LAB-1", com suporte do tubo modificado, com vistas a uma melhor estabilidade.

## 2. INSTABILIDADE GEOMÉTRICO-ESPACIAL

---

### 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR DA RETA PADRÃO

A UGRP (unidade geradora da reta padrão), já comentada da no capítulo 1, é a unidade responsável pela formação da RP e é composta basicamente pelos componentes mostrados na figura 2.1 e que serão analisados a seguir:

- tubo de gás hélio-neônio, ou tubo de laser.

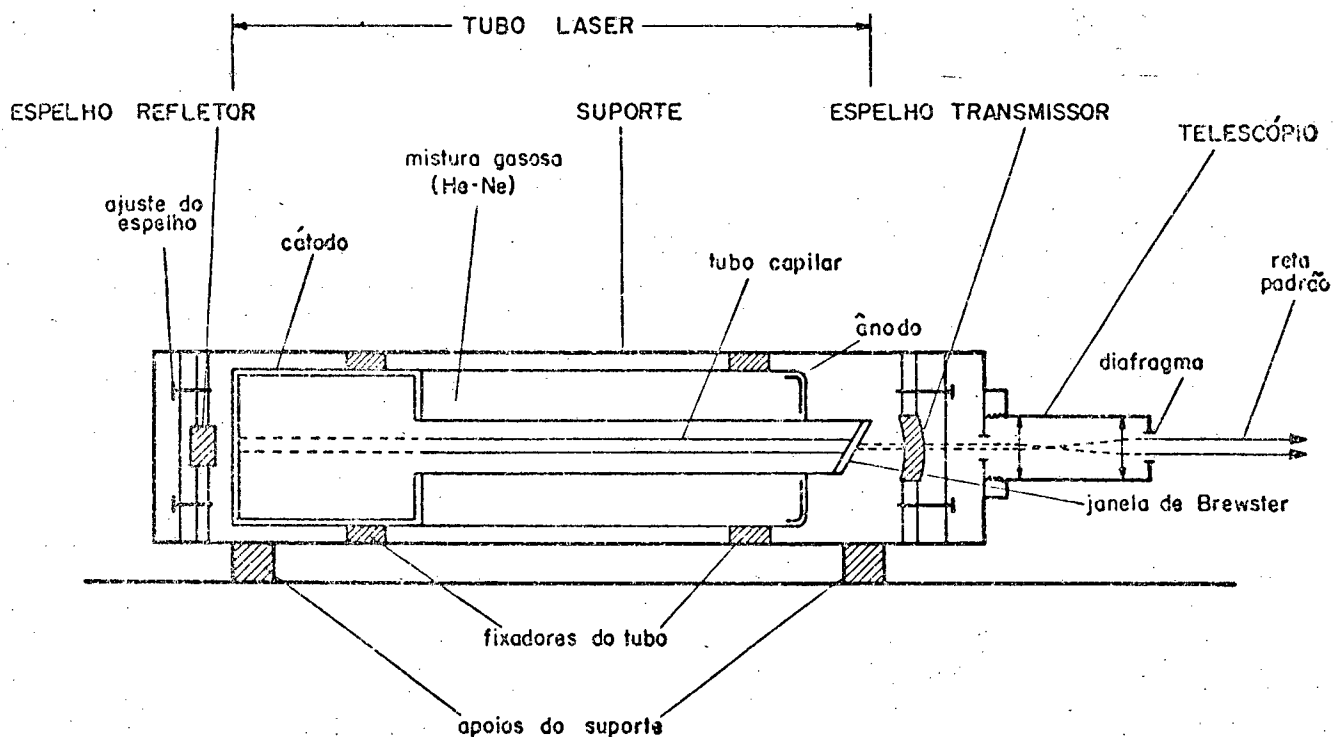


FIG. 2.1 - Componentes básicos da UGRP

- espelhos que constituem a cavidade ressonante, sendo um denominado refletor e o outro de transmissor; deste emerge o feixe de laser. Esses espelhos podem ser fixos diretamente ao suporte, conforme mostra a figura, ou colados diretamente nas extremidades do tubo. No capítulo 3, o ressoador será estudado com mais detalhes.
- suporte mecânico, no qual é montado o tubo de laser e no caso, os espelhos.
- componentes mecânicos de fixação do tubo, dos espelhos no suporte e apoios do suporte sobre uma base.
- janela de Brewster, formando o ângulo de mesmo nome, no caso da luz de laser ser polarizada.
- telescópio, que tem como finalidades ampliar o diâmetro do feixe, obtendo uma redução da variação angular do mesmo e colimar o feixe, compensando a sua divergência natural. Essas características serão analisadas oportunamente.

### 2.1.1 O Laser de He-Ne

Um dos componentes fundamentais do laser de He-Ne, é um tubo de vidro de comprimento em torno de 300 mm, no qual está inserida a mistura gasosa de hélio-neônio, a uma pressão total em torno de 130 Pa e numa razão de 5,5 entre as pressões (He/Ne). Em suas extremidades, encontram-se os eletrodos (cátodo e ânodo) através dos quais ocorre uma descarga elétrica no gás, com uma diferença de potencial que, dependendo da potência do laser, varia entre 1,5 a 5 kV, tensão esta fornecida por uma fonte de alimentação de corrente contínua estabilizada, e que pode atingir o valor de 10 kV para uma ionização inicial no instante em que é ligado o laser; a corrente elétrica gerada no gás, assume valores entre 2 a 15 mA. Devido à descarga no gás, o tubo é também denominado de tubo de plasma.

A descarga elétrica, também denominada processo de bombeamento, serve para excitar os átomos de gás, que assim terão

aumentados os níveis energéticos e posteriormente, devido ao caimento desses níveis, ocorre a emissão de fótons.

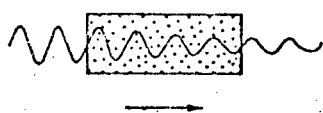
Esta interação entre luz e matéria (átomos) foi inicialmente explicada por Einstein (1917), quando descobriu que a luz é quantizada, ou seja, formada por fótons que possuem valores discretos de energia. Essa energia do fóton, também denominada de quantum de energia, é dada por:

$$hf = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

onde  $E_1$  e  $E_2$  são dois níveis energéticos genéricos, com  $E_2 > E_1$ ;  $h$  é a constante de Planck e  $f$  a frequência do fóton.

A interação entre luz e matéria, pode ser entendida de uma maneira simplificada, pelas seguintes propriedades, e esquematizadas na figura 2.2:

(a) ABSORÇÃO



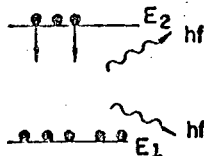
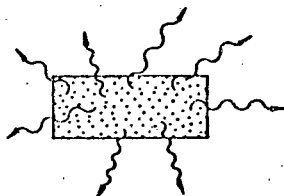
$E_1, E_2$  - níveis de energia

$h$  - cte de Planck

$f$  - frequência

$$hf = E_2 - E_1$$

(b) EMISSÃO ESPONTÂNEA



(c) EMISSÃO ESTIMULADA

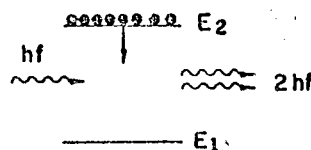
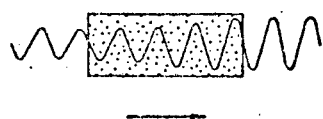


FIG. 2.2 - Interação luz e matéria (átomos) /12/



- a) Absorção. Uma onda luminosa incidente excita a nuvem eletrônica dos átomos, que passa a oscilar, perdendo a referida onda luminosa, um quantum de energia que foi absorvida por um átomo que por sua vez passa de um nível energético fundamental (E1) para outro excitado (E2).
- b) Emissão espontânea. Ocorre quando átomos excitados emitem fótons em qualquer direção, devido a um caimento dos níveis de energia de E2 para E1.
- c) Emissão estimulada. Um átomo excitado retorna para o nível fundamental emitindo um fóton, por influência de outro fóton incidente, possuindo então ambos a mesma frequência e direção /12/. Quando os dois fótons de uma emissão estimulada incidem sobre outros dois átomos excitados, formam-se 4 de mesma frequência e direção, e assim sucessivamente cresce o número de fótons. Ao incidirem num dos espelhos, ocorre a reflexão destes fótons, fazendo com que durante o percurso em sentido contrário, outras emissões ocorram. Após um número grande de reflexões, forma-se uma onda estacionária de grande amplitude e conseqüentemente, o feixe luminoso externamente ao laser, emerge do espelho transmissor, com uma potência correspondente a aproximadamente 2% do valor interno à cavidade.

Entretanto para que ocorra uma emissão estimulada, é imprescindível que o número de átomos no nível energético E2 seja maior que no nível E1. Pois baseado na estatística de Boltzmann /1, 13/,

$$N_2/N_1 = \exp(-(E_2 - E_1)/kT) \quad (2.2)$$

onde N é o número de átomos por unidade de volume, denominado de população daquele nível; k a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta. Observa-se assim que no caso do equilíbrio térmico,  $N_2 < N_1$ , tem-se  $E_2 > E_1$ . Para  $N_2 > N_1$ , diz-se que existe uma inversão de população e o material pode então agir como

amplificador. Esta inversão é causada pelo processo de bombeamento, que pode ser por descargas elétricas (no caso do laser de He-Ne), óptico (laser de Rubi), por reação química ou por meio de outro laser.

Para que ocorra a amplificação da luz no laser de He-Ne, a inversão de população dos átomos se procede da seguinte maneira: o gás hélio é excitado por meio de descargas elétricas, tendo seus níveis de energia elevados do nível fundamental para os níveis  $2^1s$  e  $2^3s$  (fig. 2.3). Por meio de colisões elásticas de 2ª ordem, dos átomos de hélio com os átomos de neônio, estes têm os seus níveis elevados para  $2s$  e  $3s$ , que são níveis bem próximos aos  $2^1s$  e  $2^3s$  do hélio. Por meio de transições entre os níveis  $2s$  e  $3s$  com outros mais baixos, o neônio emite os fótons que compõem a luz, existindo assim mais de 10 comprimentos de ondas nas

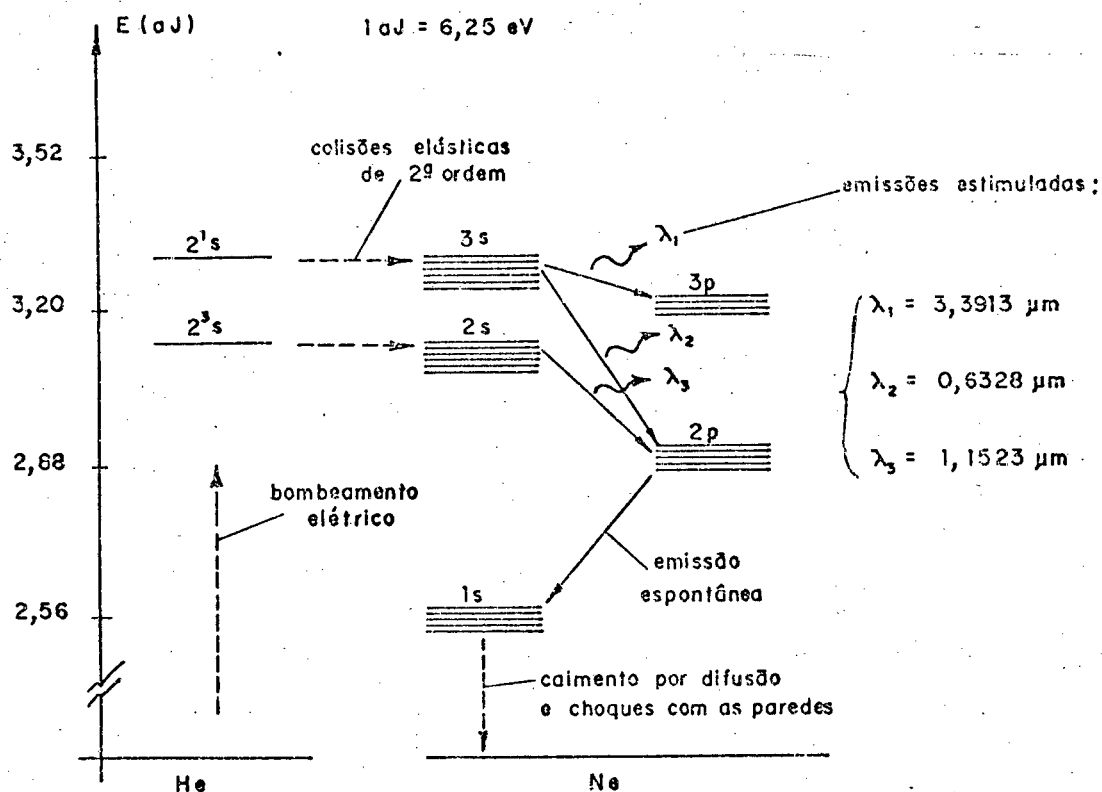


FIG. 2.3 - Níveis de energia dos gases hélio e neônio, e transição entre os níveis, para efeito laser.

faixas do vermelho e infravermelho, sendo os mais comuns representados na figura 2.3. Dentre eles,  $\lambda_2 = 0.6328 \mu\text{m}$  é o que tem maior aplicação e corresponde a uma transição entre os níveis  $3s^2$  e  $2p^4$ . Já existe inclusive um laser de He-Ne que emite luz verde ( $\lambda = 0.5435 \mu\text{m}$ ) /14/. Ressalva-se que o gás hélio age apenas como meio para ativar o neônio, a partir do qual se forma a onda luminosa.

Quanto à potência do feixe emitido, os lasers de He-Ne são relativamente baixos, sendo de 100 mW os de maior valor. Na Metrologia, são utilizados lasers com potências que variam normalmente entre 0,5 a 5 mW /10/.

Quando os espelhos, que compõem a cavidade ressonante estão bem alinhados segundo um eixo óptico, diz-se que o laser está operando no modo fundamental TEM<sub>00</sub> (os modos de operação serão apresentados no capítulo 3), e o feixe apresenta uma distribuição da densidade de potência, ou irradiância (I), gaussiana, que corresponde a uma região iluminada circular e bem definida.

O feixe apresenta também uma divergência natural, devido ao seu pequeno diâmetro (1-2 mm). Na figura 2.4 está sendo representado essa divergência, bem como a distribuição da irradiância (I) em 3 planos transversais distintos; o ressoador é

#### DIFRAÇÃO NATURAL DO FEIXE LASER

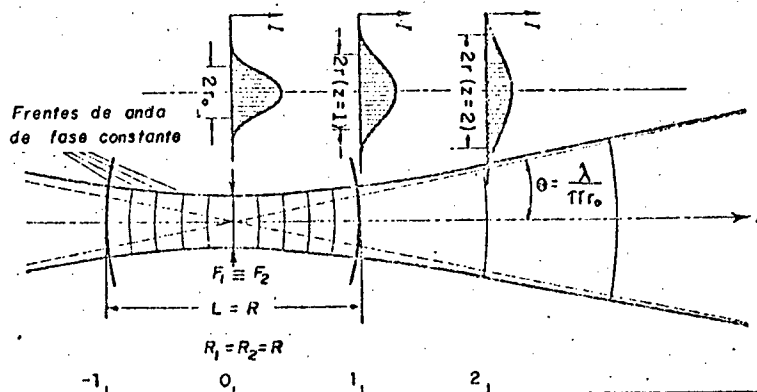


FIG. 2.4 - Difração natural do feixe laser e variação do diâmetro, num ressoador confocal /12/.

do tipo confocal, que consiste em 2 espelhos esféricos de mesmo raio de curvatura, com o foco coincidindo num ponto intermediário entre eles /12/.

A curva de divergência se aproxima de uma assíntota cônica, de ângulo  $\Theta$ , sendo

$$\Theta = \lambda / (\pi \cdot r_0) \quad (2.3)$$

onde  $2r_0$  é o diâmetro mínimo do feixe, no centro do ressoador, onde a frente de onda se apresenta plana, e o raio ( $r_0$ ), calculado por

$$r_0 = (L \lambda / 2\pi)^{1/2} \quad (2.4)$$

sendo L o comprimento do ressoador.

O diâmetro do feixe ( $2r$ ), é medido a  $1/e^2$  do valor de irradiância máxima e pode ser calculado para uma distância qualquer na direção z do feixe, pela equação:

$$r(z) = r_0 \left( 1 + \left( \lambda z / \pi r_0^2 \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Com o aumento do diâmetro, em função de z, a densidade de potência decresce.

### 2.1.2 Vantagens do Laser de He-Ne

A variedade de lasers disponíveis atualmente, é muito grande e sempre vem surgindo novos tipos. Eles são classificados em função do material que compõe o meio ativo e por isso classificados em:

- lasers de estado sólido, utilizando o Rubi ou diferentes tipos de vidro;
- lasers a semi-condutores;
- lasers líquidos ou de corantes;

- lasers químicos, que utilizam a energia liberada de uma reação química das substâncias (gases);
- lasers a gás, que apresentam a maior variedade e podem ser construídos de gás iônico, gás atômico neutro, gás molecular e vapor metálico, e proporcionam o maior número de aplicações.

Dentre os lasers a gás, o de He-Ne (gás atômico neutro) por sua vez, é o mais largamente utilizado, por apresentar entre outras, como vantagens principais, as seguintes:

- baixa potência, não oferecendo grandes perigos;
- fácil manuseio;
- feixe visível, que se destaca nitidamente, devido à cor;
- fácil aquisição no mercado e grande variedade de apresentações;
- relativamente baixo custo;
- grande disponibilidade de acessórios complementares, tais como lentes, divisores de feixe, fotodetetores e outros.

## 2.2 FONTES DE INSTABILIDADE

Vista a importância de se otimizar a estabilidade da reta padrão, tem por objetivo este item, analisar as diversas causas da instabilidade. Estudos bibliográficos e experimentais, mostraram que a instabilidade está associada basicamente às seguintes causas:

### 2.2.1 Causas de Natureza Mecânica

Para uma boa estabilidade espacial do feixe, apesar de uma estabilidade perfeita ser impraticável, é requisito primordial que os espelhos que compõe o ressoador, tenham também plena estabilidade espacial, e isto depende da mecânica de fixação dos mesmos, relativamente ao tubo de laser e em relação à base (elemento sob ensaio). Pequenos deslocamentos angulares ou

lineares em um dos espelhos, causarão imediatamente variações na posição espacial do feixe. Esses deslocamentos podem ser provocados por um ou mais dos fatores:

- folgas nos mecanismos de ajuste, apoio e fixação, dificultando a manutenção do alinhamento, além de provocar/permitir eventuais vibrações do sistema.
- interferências através da base sobre a qual está montado o laser, quando esta não apresentar uma certa estabilidade, fazendo com que o laser sofra esforços mecânicos.
- vibrações ou choques mecânicos que provocam forças inerciais entre os componentes, causando deformações no ressoador.
- forças externas sobre o suporte do laser.

#### 2.2.2 Causas de Natureza Térmica

Devido à energia radiante dispersada na cavidade ressonante e o calor emitido pelos circuitos elétricos, ocorrem variações não uniformes de temperatura, causando assim deformações diferenciadas no suporte do tubo. Dependendo da fixação do suporte, as dilatações causam também tensões mecânicas sobre este, prejudiciais à estabilidade. Além disso, os materiais utilizados na confecção do laser, por serem de naturezas distintas (vidro, alumínio, etc) sofrem igualmente dilatações diferenciadas, implicando necessariamente numa instabilidade do feixe.

Mesmo após várias horas de funcionamento, com todo o sistema em regime a uma temperatura relativamente estabilizada, podem ocorrer instabilidades térmicas no mesmo em função de mudanças na temperatura ambiente, e especialmente pela refrigeração causada por correntes aleatórias de ar.

#### 2.2.3 Causas de Natureza Física

As instabilidades do feixe, estão também relacionadas à

natureza do próprio feixe, ou seja, à configuração gaussiana do perfil energético.

O modo de operação que apresenta maior estabilidade, é o modo TEM<sub>00</sub>. O deslocamento de um dos espelhos prejudica a condição de ganho do laser, modificando a potência, além de provocar outros modos de operação menos estáveis, alterando a distribuição de perfil energético do feixe.

Partículas de pó depositadas sobre as superfícies dos espelhos, causam a difração da luz, alterando a configuração do feixe e, conseqüentemente, os sinais elétricos gerados pelo fotodetector.

Outro fator que altera a potência do feixe, é o ruído microfônico ou acústico, na cavidade ressonante, originado do próprio plasma e que também pode ser causado por fontes externas /14, 15/. Tal ruído muitas vezes não é lembrado, no entanto pode ser causa de instabilidades significativas.

Como fatores externos sobre o perfil energético, podem ser citadas, as absorções e dispersões da luz, por partículas de pó, vapor d'água, dióxido de carbono, etc.

A variação do índice de refração do ar, no trajeto do feixe, causado por variações de temperatura e/ou turbulências, também são fatores que influenciam na estabilidade. Foi constatado que uma variação na temperatura do ar, de 1 K, pode provocar uma variação angular de  $1 \mu\text{m}/\text{m}$  e variação paralela de  $1 \mu\text{m}$  /16/. Turbulências de intensidade considerada média, podem causar variações angulares em torno de  $5 \mu\text{m}/\text{m}$  /17, 18/.

Por fim, entre as causas de natureza física, está a interferência da luz externa sobre o fotodetector, que é constituído para a luz de uma determinada faixa de comprimento de onda, e que se torna sensível a variações do iluminamento do meio ambiente, alterando assim os sinais elétricos gerados no fotodetector.

### 2.2.4 Causas de Natureza Elétrica

Para que ocorra a amplificação da luz no interior do tubo, a diferença de potencial entre o ânodo e cátodo, conseqüentemente a intensidade de corrente elétrica através do gás, deve satisfazer a valores criteriosamente estabelecidos, como mostra a figura 2.5. Para uma pequena variação da intensidade de corrente elétrica, há uma queda de potência do laser e, para variações maiores, o laser deixa de funcionar.

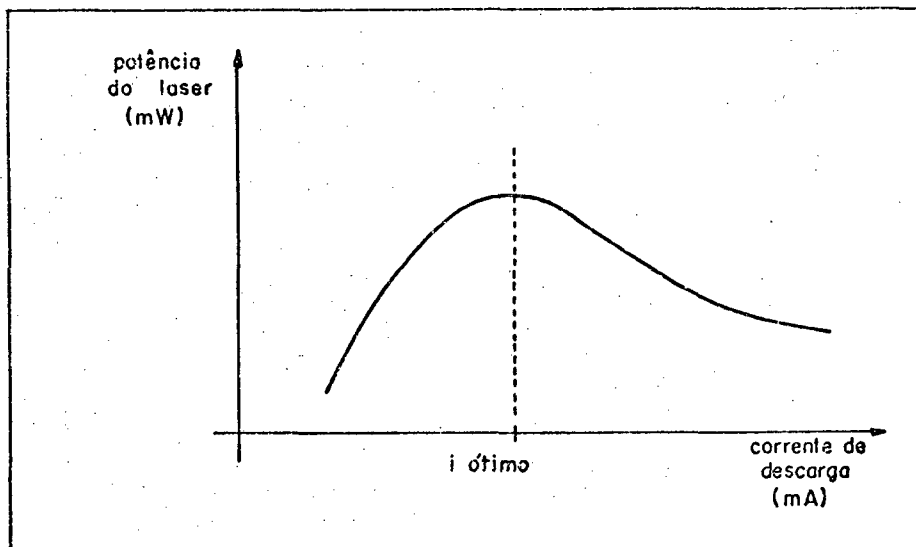
A dependência da Irradiância (densidade de potência) ( $I$ ), em função dos campos elétrico ( $E_0$ ) e magnético ( $H_0$ ), da onda eletromagnética resultante, pode ser observada pela equação abaixo /13/:

$$I = (1/2).E_0.H_0 = (n/2Z_0).E_0^2 \quad (2.6)$$

onde  $n$  é o índice do meio isótropo e

$$Z_0 = (\mu_0/\epsilon_0) \quad (2.7)$$

sendo  $\mu_0$  e  $\epsilon_0$  respectivamente a permeabilidade e permissividade do vácuo.



FIG; 2.5 - Variação da potência em função da descarga elétrica/15/



Como o campo elétrico dessa onda é função do campo elétrico entre os eletrodos, uma variação deste causará uma variação na intensidade da energia radiante e, conseqüentemente, uma variação de temperatura que provocará dilatações, com drásticos efeitos na estabilidade do feixe.

No entanto, a fonte alimentadora do laser, é estabilizada, de modo que pequenas variações de tensão não causam efeitos, mas variações maiores que ultrapassam a faixa de estabilização da fonte, são prejudiciais à estabilidade do feixe.

Existem também ruídos causados pela fonte alimentadora e pelo circuito elétrico acoplado ao tubo de descarga. Esses ruídos, transmitidos para a cavidade, perturbam a potência de saída e são denominados de "ruídos de descarga". São no entanto minimizados, através do uso adequado de um filtro na saída da fonte e do uso de um resistor estabilizador de descarga /15/.

#### 2.2.5 Análise Relativa das Causas

Analisando as causas de instabilidade anteriormente expostas, conclui-se que a maior fonte de instabilidade é a variação de temperatura, por ser impossível manter um sistema com temperatura totalmente estável.

### 2.3 COMPORTAMENTO TEMPORAL

Desde seu lançamento comercial em 1962, o laser de He-Ne evoluiu bastante em seu projeto, visando aperfeiçoamentos de desempenho e principalmente um maior tempo de vida.

Devido à baixa pressão interna do gás (em torno de  $1/700$  da pressão atmosférica), o maior problema consistia na vedação

perfeita do tubo, que permitia tanto o vazamento do gás hélio, como a entrada de vapor d'água e hidrogênio para o interior do tubo /19/. Com uma proporção de 1% de hidrogênio, o laser deixa de funcionar /20/. Além disso, o vapor metálico desprendido do cátodo, denominado "quente", se depositava nos espelhos, contaminando-os, conseqüentemente impedindo uma reflexão perfeita da luz. Com isso, o tempo de vida útil do laser alcançou inicialmente apenas algumas centenas de horas /19/.

A partir de 1966, após uma série de aperfeiçoamentos, o laser passou a ter uma vida útil em torno de 5.000 horas. Atualmente, dependendo da potência, a maioria dos lasers comerciais de He-Ne alcançam entre 15.000 a 20.000 horas de funcionamento contínuo /19, 21, 22/.

Na figura 2.6, é feita uma comparação entre a configuração dos primeiros tubos de laser, com janelas de Brewster em seus extremos e espelhos independentes do tubo, e um tubo de laser atual, com modificações dos eletrodos e espelhos colados diretamente ao tubo.

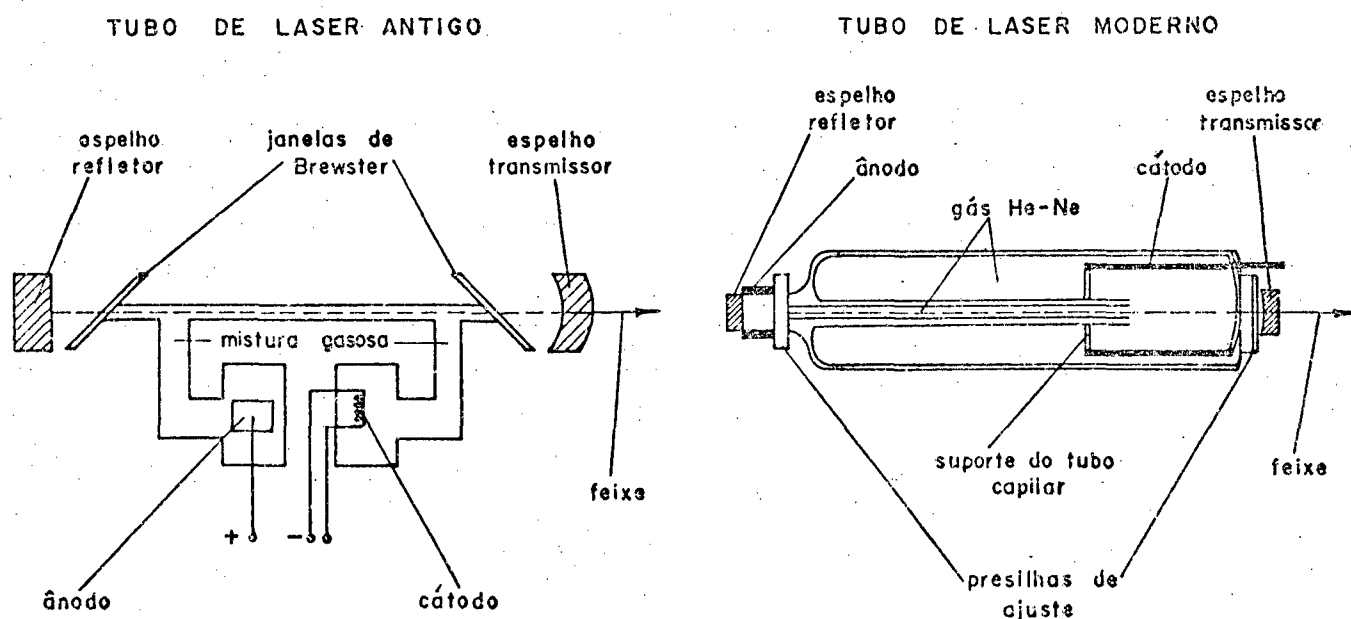


FIG. 2.6 - Confrontação de um tubo de laser antigo e um de configuração moderna.

O avanço, principalmente com relação ao tempo de vida do laser, deve-se basicamente aos seguintes fatores:

- obtenção de vácuo no interior do tubo, melhor e com menor grau de impurezas, para então introduzir a mistura gasosa.
- fixação dos espelhos diretamente no tubo, evitando que partículas de pó, vapor d'água e  $\text{CO}_2$  se depositem nas superfícies dos mesmos danificando-os com o tempo, como acontece quando estes são fixos externamente. Alguns lasers, os de maior potência, ainda usam fixação externa dos espelhos.
- substituição do tradicional "epoxy", para vedação do tubo e/ou colagem dos espelhos, por um tipo de cola "dura".
- substituição do cátodo de alumínio, por um cátodo "frio", feito de um metal denominado "kovar", por causa do coeficiente de dilatação ser praticamente igual ao do vidro. O alumínio, apresentando coeficiente de dilatação bem diferente ao do vidro, causava tensão sobre o vidro ao sofrerem aquecimento.

Apesar das técnicas modernas, constata-se que há uma perda por difusão do gás hélio através do vidro, numa razão de 1,3 Pa ao ano, ou seja, 1% da pressão total /21/. Como a razão entre as pressões ( $p_{\text{He}} / p_{\text{Ne}}$ ) compreendida entre 5 e 6 é vital para o laser, conclui-se que o tempo de vida total do laser é de 5 a 10 anos, independente de estar em operação ou não.

Outros fatores observados na durabilidade, são a potência e a polarização da luz. Lasers de maior potência apresentam menor durabilidade, e com luz polarizada também. Atribuem-se esses fatores à fixação externa dos espelhos e às janelas de Brewster, internamente ao tubo, respectivamente.

Como é impossível prever com exatidão a durabilidade de um laser, teoria da probabilidade e cálculos estatísticos são utilizados para obtenção provável do tempo de vida. O gráfico da figura 2.7.a representa a danificação em função do tempo, onde TMV significa o tempo médio antes de danificar.

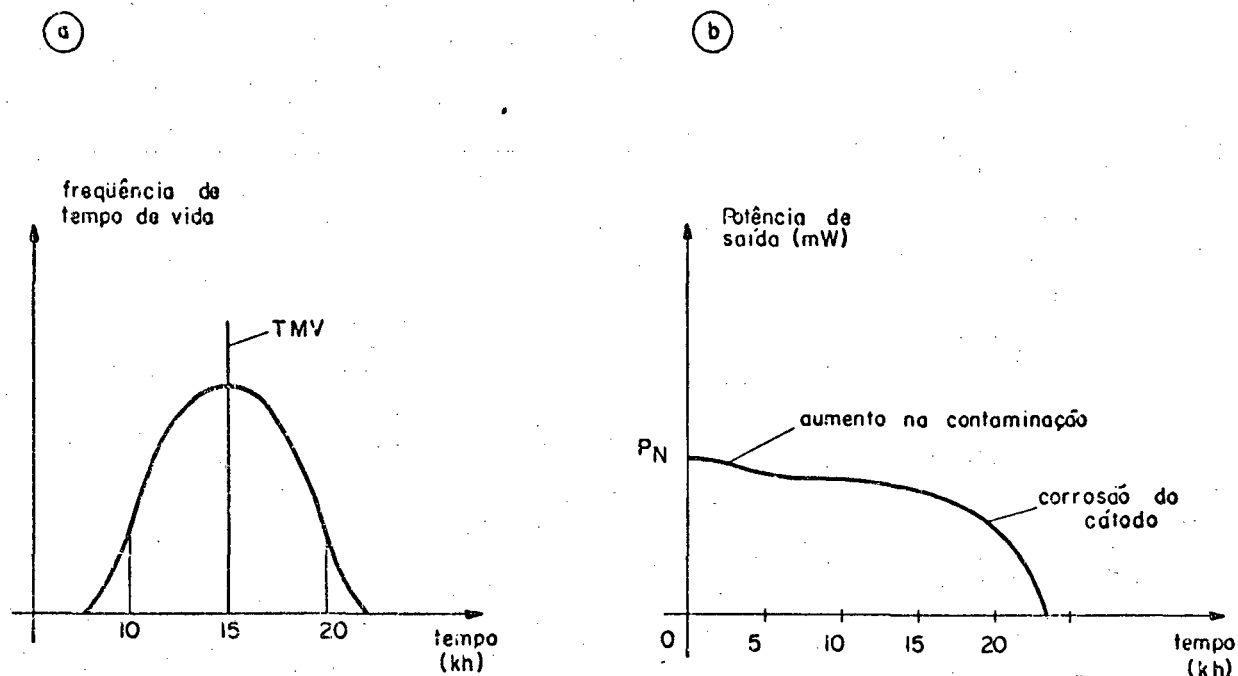


FIG. 2.7 - Tempo medio de vida (TMV) de um laser de He-Ne atual/21/

Na figura 2.7.b, está representado o tempo de funcionamento contínuo, da maioria dos lasers atuais, observando-se o caimento da potência em função do tempo. Observa-se que este tempo está basicamente limitado pela contaminação causada pelos eletrodos no tubo e sobre os espelhos. Tal contaminação provém da evaporação de materiais da superfície dos eletrodos, causada pela descarga de corrente contínua /19, 20, 21, 22/.

#### 2.4 CARACTERIZAÇÃO DA INSTABILIDADE

Neste item, caracterizar-se-á a instabilidade espacial da RP, relativamente a um referencial, conforme esquematizado na figura 2.8. Adota-se um plano de referências que na aplicação do LA é o objeto sob teste e nos trabalhos experimentais deste trabalho é um banco óptico. Supõe-se uma posição inicial da RP na

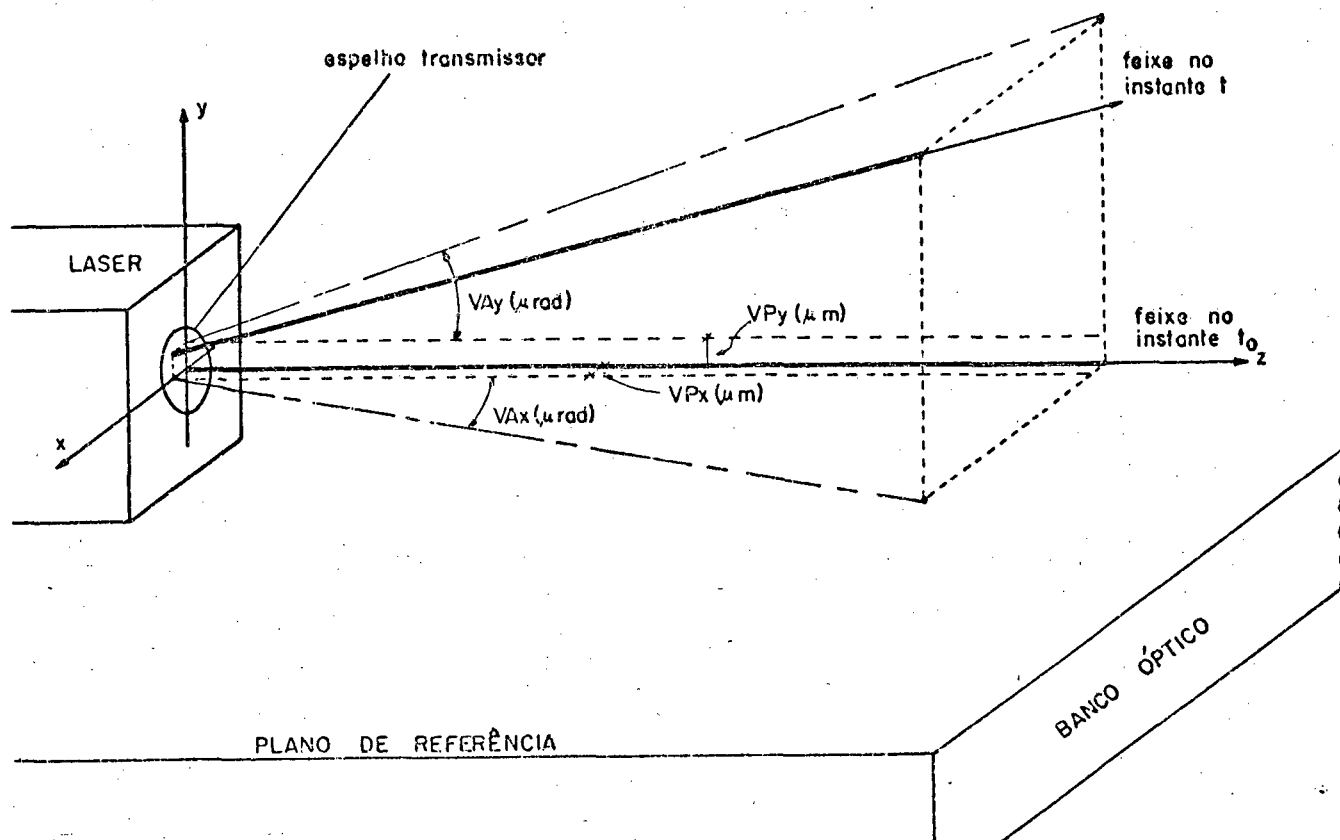


FIG. 2.8 - Caracterização das variações paralela (VP) e angular (VA) da RP.

origem do sistema de eixos coordenados  $x$ ,  $y$ , com o plano de referência ( $x - y$ ) adotado arbitrariamente sobre a superfície externa do espelho transmissor, e propagando-se na direção  $z$  nesse instante. Após um determinado intervalo de tempo, a RP se encontra na posição indicada, de modo desproporcional, para uma melhor visualização. Essa variação é caracterizada por dois parâmetros: a VP (variação paralela) e a VA (variação angular), que ocorrem nos planos  $xz$  e  $yz$ , respectivamente.

Uma instabilidade na forma de VP num ponto que se encontra a uma distância  $L$  da UGRP, é a mesma para qualquer distância; considerando no entanto a VA, o erro ocorrido é o produto desta variação pela distância  $L$ . Isto já permite concluir que a VA tem maior influência na instabilidade do LA.

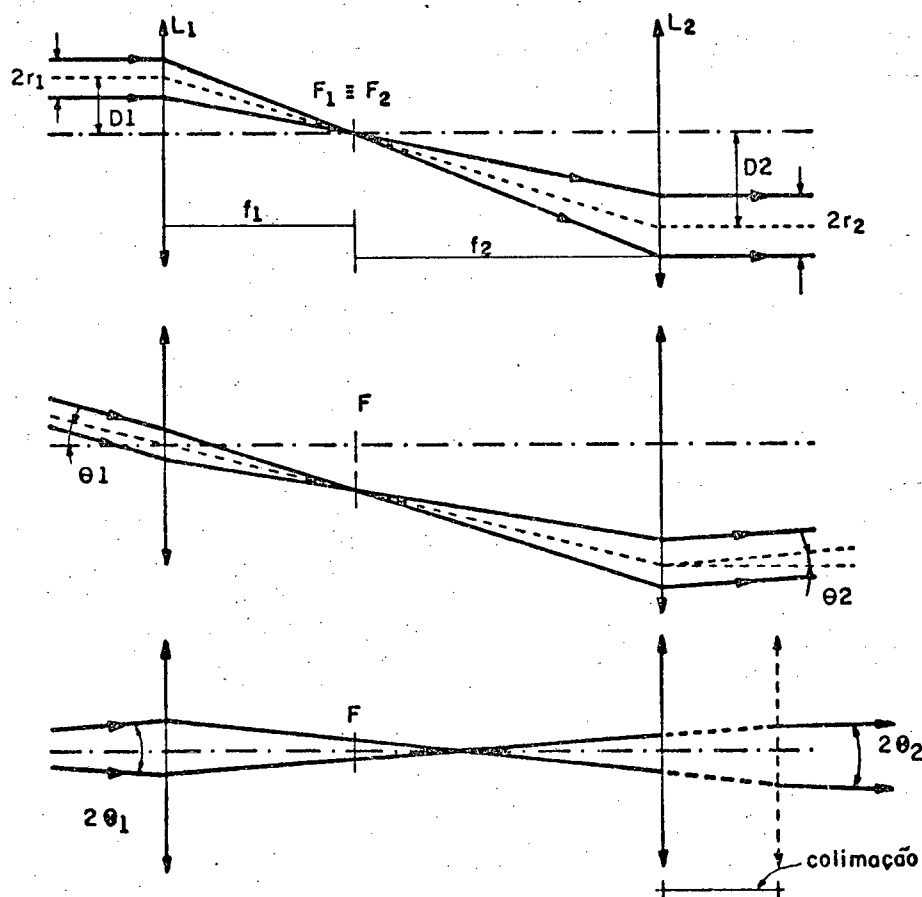
Por outro lado, utilizando-se um telescópio na saída do laser, essas variações tem seu comportamento alterado, conforme pode ser visto na figura 2.9.

O telescópio utilizado, do tipo astronômico ou de Kepler, tem como característica principal, para raios incidentes paralelos, o fator aumento (A), dado por /23/:

$$A = f_2 / f_1 \quad (2.8)$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  são as distâncias focais das lentes e o raio do feixe emergente ( $r_1$ ) em função do incidente ( $r_2$ ), é então dado pela equação

$$r_2 = A \cdot r_1 \quad (2.9)$$



$$A = \frac{f_2}{f_1}$$

$$2r_2 = A \cdot 2r_1$$

$$D_2 = -A \cdot D_1$$

$$\theta_2 = -\frac{\theta_1}{A}$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_1}{A}$$

FIG. 2.9 - Propriedade do telescópio astronômico, para expandir o feixe laser /10/.

Quando ocorre uma VP (D) da RP, esta é aumentada pelo fator A em sentido oposto e, quando ocorre uma VA ( $\theta$ ), ela é reduzida pelo mesmo fator, também em sentido oposto. A divergência do feixe ( $\theta$ ), também pode ser reduzida pelo fator A, por meio de um ajuste da lente ocular.

Visto então, que a VA tem maior influência nos ensaios de retilineidade que a VP, justifica-se o uso do telescópio para reduzir tanto a variação angular como a divergência natural do feixe.

### 3. ANÁLISE DO RESSOADOR ÓPTICO

-----

Visto que a instabilidade do feixe laser está intimamente relacionada com a configuração geométrica da cavidade ressonante, esta será estudada mais detalhadamente neste capítulo, bem como o comportamento do feixe, quando um dos espelhos sofre uma variação de posição.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DE RESSOADOR

Entende-se por ressoador de um modo geral, um sistema que em função de uma excitação externa, passa a oscilar senoidalmente com frequência característica, resultando numa oscilação de máxima amplitude. Fenômenos ressonantes sob aspectos físicos, são observados em sistemas mecânicos, acústicos, eletrodinâmicos e ópticos. Como característica dos ressoadores acústicos e ópticos, está a dimensão geométrica dos mesmos, em função do comprimento de onda, para que ocorra o efeito ressonante.

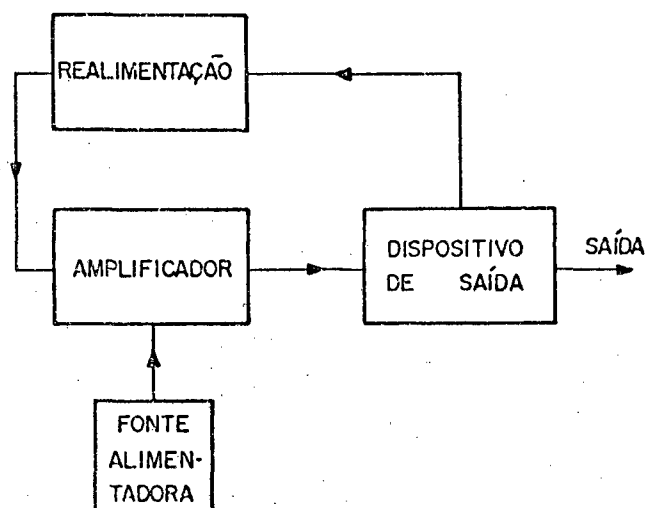
Um ressoador é dito óptico, quando o campo eletromagnético da luz é excitado por meio de auto frequências bem discretas. Tais ressoadores são conhecidos por ressoadores de alta frequência e apresentam como primeira dificuldade em sua confecção, o dimensionamento do mesmo, considerando-se o pequeno comprimento da onda de luz, comparativamente às dimensões do ressoador.

Na figura 3.1 é feita uma comparação esquemática entre um oscilador eletrônico (a), composto de 4 partes básicas: fonte alimentadora, amplificador, dispositivo de saída e rede de realimentação e as partes correspondentes de um sistema de laser /2/.

Para sistemas de laser, o ressoador óptico consiste de uma cavidade com superfícies refletoras em seus extremos, ou seja os



(a) OSCILADOR ELETRÔNICO



(b) LASER (Oscilador Óptico)

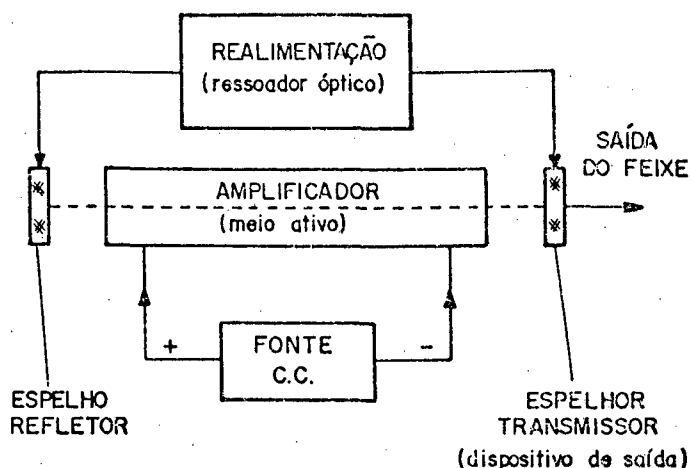


FIG. 3.1 - Diagrama de blocos de um oscilador eletrônico e as partes correspondentes de um laser /2/.

espelhos, tendo entre estes, o dispositivo que contém um meio homogêneo, dielétrico e isotrópico, no qual ocorre a emissão estimulada. No caso do laser de He-Ne, o meio ativo é a mistura gasosa, como já exposto no capítulo 2.

Quanto aos espelhos que formam a cavidade ressonante, estes devem satisfazer a critérios específicos, para uma otimização no rendimento energético do laser. O espelho refletor que fica na parte posterior do laser, apresenta um fator de reflexão  $R \simeq 1,00$  enquanto o espelho denominado de transmissor, apresenta  $R \simeq 0,98$  e fator de transmissão  $T' \simeq 0,02$ . O fator de absorção,  $A$ , é extremamente pequeno nestes espelhos, sendo na maioria das vezes, não considerado.

Esses espelhos são constituídos de finas camadas de materiais dielétricos tais como sulfeto de zinco (ZnS) e criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), depositadas sobre uma placa de vidro, para assim selecionar um determinado comprimento de onda. Isto pelo fato de existirem radiações de vários comprimentos de onda, originados

dos caimentos entre os diferentes níveis energéticos; e para que ocorra a amplificação de um comprimento de onda, este deve sofrer reflexão nos espelhos, e os demais, transmissão. Basicamente pela espessura das camadas dielétricas que é feita a seleção daquele comprimento de onda /12/.

Como vantagem também sobre os espelhos metálicos, os dielétricos oferecem pequeno fator de absorção.

Ressalva-se ainda que os melhores espelhos refletivos atuais, apresentam um fator de reflexão  $R' = 0.999$  /12/.

Outro parâmetro de grande relevância, é a distância entre os espelhos ou comprimento do ressonador ( $L$ ), que possibilita a formação do campo eletromagnético estacionário e, isto implica num espaçamento igual a um número inteiro ( $n$ ) de meios comprimentos de onda (fig. 3.2). Como a referida distância é muito maior que o comprimento da onda (aprox. 500.000 vezes), as

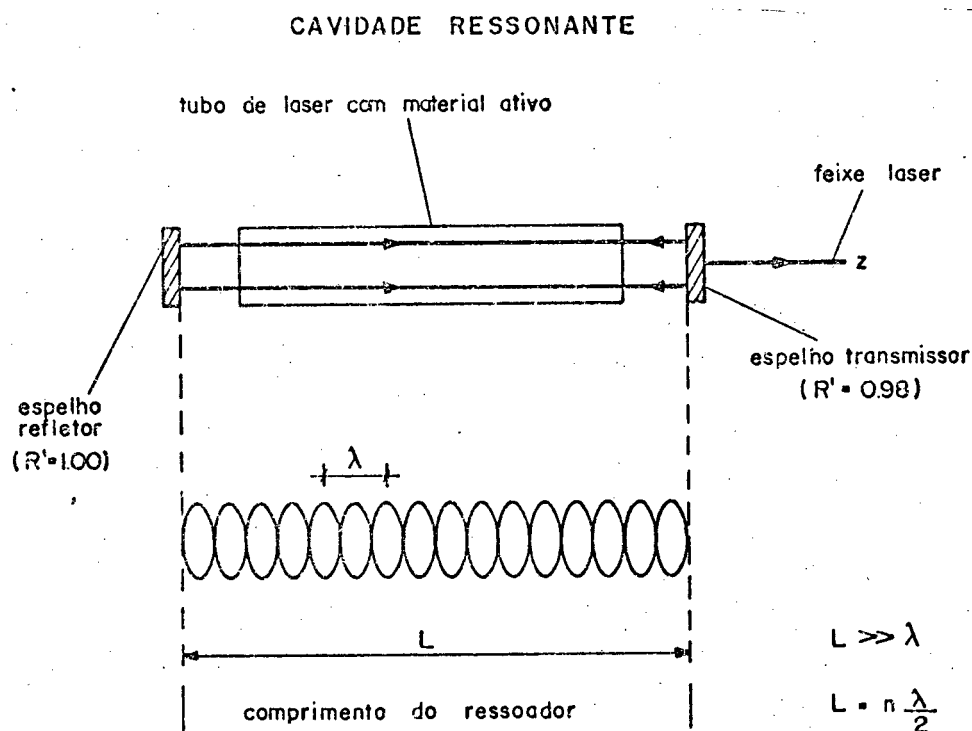


FIG. 3.2 - Esquema simples da cavidade ressonante de um laser.

frequências ressonantes ( $\nu$ ) são muito próximas, razão pela qual o laser tende a oscilar em vários modos diferentes, denominados modos longitudinais.

A diferença de uma frequência ressonante para outra, pode ser calculada de maneira simples:

como

$$L = n \cdot \lambda / 2 \quad \text{e} \quad \lambda = c / \nu \quad \text{então} \quad \nu = nc / 2L \quad (3.1)$$

portanto,

$$\nu_{n-1} - \nu_n = \Delta\nu = c / 2L \quad (3.2)$$

Para um ressoador típico de  $\emptyset,3\emptyset$  m de comprimento por exemplo, tem-se  $\Delta\nu = 5\emptyset\emptyset$  MHz, que é muito pequeno comparativamente à frequência da luz (na ordem de  $1\emptyset^{14}$  Hz) /14/.

Na figura 3.3, está esquematizada a curva de ganho do laser, em função das frequências ressonantes. A linha espectral gaussiana, que delimita o mínimo de ganho, também conhecida por alargamento Doppler, é devido ao efeito do movimento aleatório térmico dos átomos de gás do plasma.

Paralelamente e em função dos modos longitudinais, existem os modos transversais, que podem ser entendidos da seguinte maneira: de acordo com as equações de Maxwell, o campo elétrico ( $\vec{E}(\vec{r}, t)$ ), deve obedecer à equação da onda (eq. 3.3) bem como as condições de contorno nas paredes da cavidade. Uma solução que satisfaz a tais condições, apresenta o aspecto geral da equação 3.4 e é denominada de "Modo da Cavidade" /1/.

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E \vec{u}(\vec{r}) \exp(i\omega t) \quad (3.4)$$

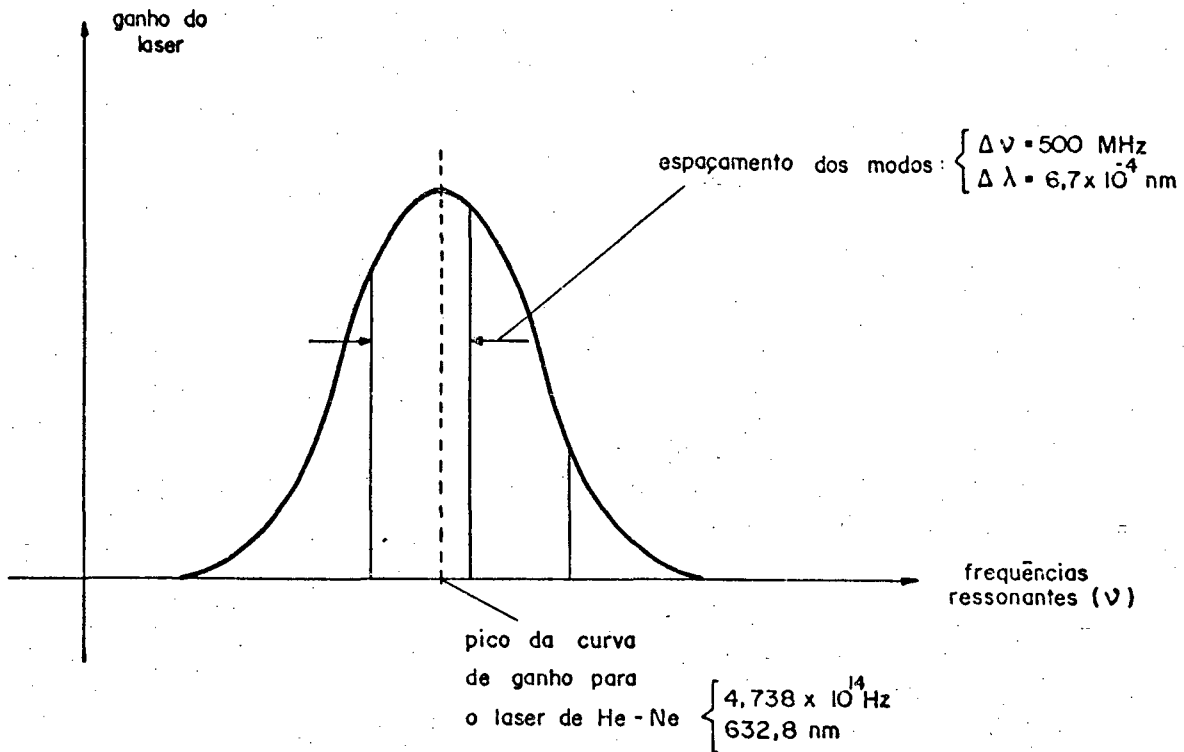


FIG. 3.3 - Distribuição de ganho e excitação de 3 modos fundamentais, para uma cavidade com  $L = 300\text{mm} / 14/$ .

Para as soluções do campo eletromagnético (e.m.) no interior de uma cavidade, tem-se a auto-função dada pela equação 3.5, onde  $H_m$  e  $H_n$  são os polinômios de Hermite, dados pela equação 3.6 e os modos da cavidade assim formados, são conhecidos por  $TEM_{mn}$  ("transverse electric and magnetic field"), por apresentarem os eixos dos campos elétricos e magnéticos da onda e.m., ortogonais ao eixo óptico ( $z$ ).

$$U_{mn}(x,y) = H_m H_n \exp(-(\pi/d\lambda)(x^2+y^2)) \quad (3.5)$$

$$H_q(x) = (-1)^q e^{x^2} (d^q/dx^q) e^{-x^2} \quad (3.6)$$

Para  $m = n = 0$ , tem-se  $H_0 = 1$  e a auto-solução da equação 3.5, fica:

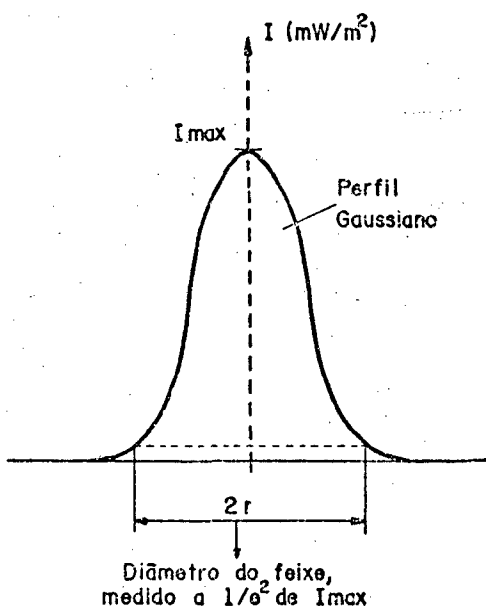
$$U_{00}(x,y) = \exp\left(-\left(\frac{\pi}{d\lambda}\right)(x^2+y^2)\right) \quad (3.7)$$

Essa auto-solução que corresponde ao modo  $TEM_{00}$ , apresenta um perfil gaussiano nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente /1/ e é o modo que se caracteriza por ser o mais estável, apresentar coerência espacial e proporcionar maior irradiância.

Para pequenas variações angulares da direção de propagação da onda e.m. relativamente ao eixo óptico, causadas pelas variações de posição dos espelhos, podem ocorrer modos de ordem superior, tais como  $TEM_{10}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{20}$ , etc.

Na figura 3.4, está representada a configuração gaussiana do modo  $TEM_{00}$  e a distribuição de campo de alguns modos de ordem superior.

(a) MODO FUNDAMENTAL ( $TEM_{00}$ )



(b) MODOS DE OPERAÇÃO  $TEM_{mn}$

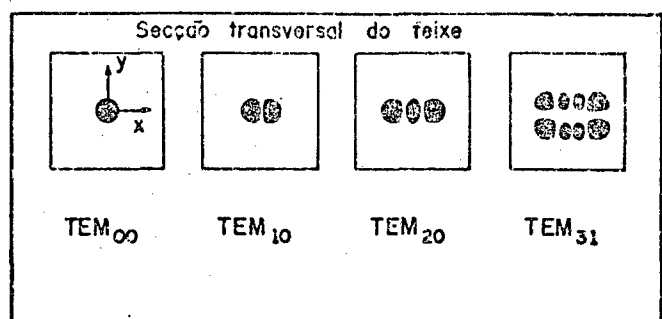


FIG. 3.4 - Distribuição gaussiana da densidade de potência do modo  $TEM_{00}$  e alguns modos de operação da cavidade ressonante.

### 3.2 TIPOS DE RESSOADORES

Para melhor compreensão dos diversos tipos de ressoadores, será utilizado o conceito geométrico de raio luminoso.

Os ressoadores são classificados em /1/:

- a) Estáveis. Um ressoador é dito estável, quando um raio incidente sobre os espelhos, retorna pelo mesmo caminho, após um ciclo de reflexão (fig. 3.5.a).
- b) Instáveis. Um ressoador é instável, quando um raio arbitrário diverge indefinidamente, ao oscilar entre os espelhos (fig. 3.5.b). Este ressoador apresenta grandes perdas, não chegando muitas vezes a produzir o feixe laser.

Mesmo um ressoador estável, pode se tornar instável, quando um dos espelhos sofre uma variação na posição, cujo valor depende do tipo do ressoador.

A seguir, estão representados os ressoadores mais comuns para lasers, destacando-se no final o de maior estabilidade, para o caso do laser de He-Ne (fig. 3.6).

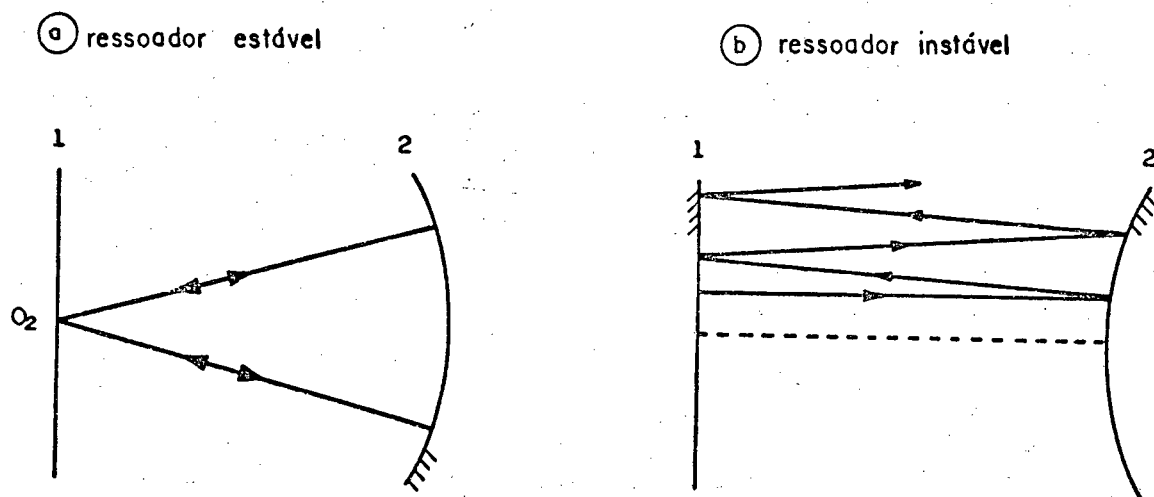


FIG. 3.5 - Configuração de um ressoador estável e instável /1/.

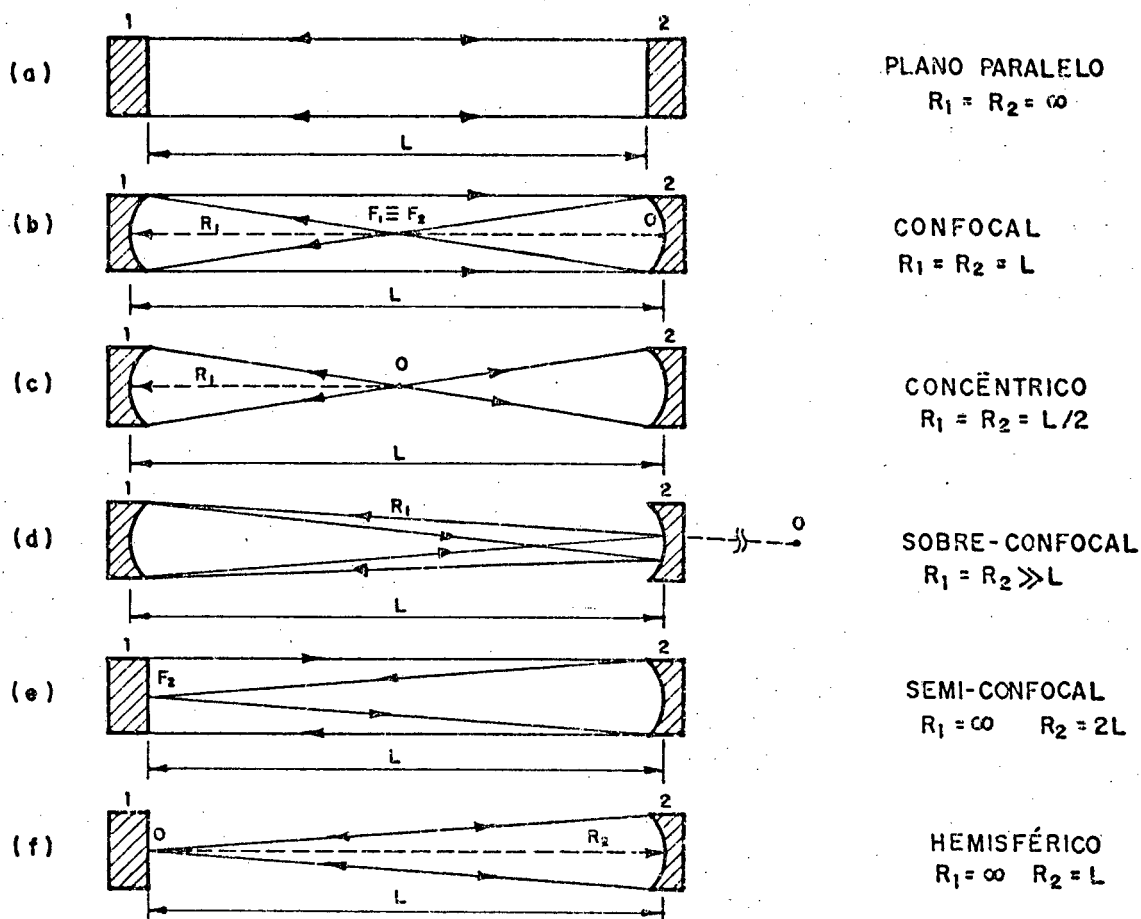


FIG. 3.6 - Ressonadores ópticos mais comuns.

- a) O ressonador plano-paralelo se caracteriza por proporcionar teoricamente a maior potência de saída, uma vez que utiliza todo o volume do meio ativo. No entanto, necessita de um alinhamento quase perfeito, pois uma variação angular num dos espelhos, da ordem de alguns segundos, pode torná-lo instável. Ocorrem também grandes perdas por difração, prejudicando diretamente a potência, anulando praticamente a vantagem acima mencionada. Por isso, só é utilizado quando o meio ativo for de grande volume.
- b) O ressonador confocal, constituído de dois espelhos esféricos de mesmo raio, separados pela distância  $R$ , é o ressonador que menos perdas apresenta, quando bem ajustado. A condição de ajuste angular, é da ordem de alguns minutos e pode ser

facilmente obtida, porém a distância entre os espelhos torna-se bem crítica, sendo por isso raramente utilizado quando se requer o modo TEM $\emptyset\emptyset$ . É o ressoador que proporciona solução analítica mais simples.

- c) O ressoador concêntrico, é constituído de dois espelhos esféricos de mesmo raio, separados pela distância  $L = 2 R$ , e não muito utilizado.
- d) O ressoador dito sobre-confocal, é composto de dois espelhos esféricos de mesmo raio, separados por uma distância bem menor que os valores dos raios. É muito utilizado em lasers a gás, principalmente para a seleção de comprimentos de onda, quando muitos oscilam simultaneamente. O alinhamento dos espelhos torna-se crítico para essa seleção.
- e) O ressoador semi-confocal é constituído de um espelho plano e outro esférico, com o foco deste sobre o anterior. Também não é muito crítico quanto a ajustes, e é muito utilizado em lasers a gás.
- f) O ressoador hemisférico, é composto de um espelho plano e outro esférico, de raio igual à distância entre eles. Apresenta como desvantagem, o fato de apenas 1/3 do volume do meio ativo ser aproveitado, que no entanto é largamente superada pelas vantagens de facilidade no alinhamento, e obtenção de um ressoador estável. Mas pode tornar-se instável para o modo fundamental por meio da divergência, quando  $L = R$ .
- g) Ressoador hemisférico reduzido, o mais utilizado nos lasers comerciais de He-Ne, é o ressoador hemisférico com a distância entre os espelhos, sensivelmente reduzida, minimizando assim as perdas por difração, tornando-se relativamente estável. A faixa de tolerância de ajuste angular dos espelhos, é de alguns graus, sendo portanto pouco sensível às pequenas variações de posição dos espelhos.

O espelho transmissor do ressoador, com um fator de transmissão ( $T'$ ), compreendido entre  $\emptyset, \emptyset^2$  e  $\emptyset, \emptyset^2$ , funciona também



como lente, para a fração da luz transmitida. Como a frente de onda sobre a superfície interna desse espelho é aproximadamente esférica (no caso do espelho ser esférico), é necessário convergir o feixe de saída o mais paralelamente possível ao eixo óptico. Para isto, a superfície externa apresenta forma convexa, passando o espelho a funcionar como lente convergente, para a luz emergente.

Quanto à montagem dos espelhos, estes podem ser fixos de duas maneiras, conforme já comentado no capítulo anterior:

- a) colados diretamente ao tubo, por meio de uma cola "dura" especial, que acompanha a dilatação do vidro, e que não permite o vazamento de gás.
- b) desacoplados do tubo e fixos no próprio suporte, por meio de um mecanismo de ajuste fino, constituído de 3 parafusos posicionados nos vértices de um triângulo equilátero, possibilitando assim eventuais ajustes em 3 graus de liberdade (2 angulares e 1 linear). Apenas o ajuste angular torna-se relevante, pois o comprimento do ressoador que teoricamente deve ser igual a um número inteiro de meios comprimentos de onda, é impossível de se obter na prática, pois devido à dilatação térmica, o comprimento do ressoador pode variar em várias vezes o valor do comprimento de onda.
- c) acoplados diretamente ao tubo, e providos de um mecanismo de ajuste fino, para os alinhamentos.

### 3.3 PERDAS NO RESSOADOR ÓPTICO

Num ressoador podem ocorrer diferentes perdas de energia, que prejudicam ou mesmo podem impedir a amplificação da luz. Como o fator de amplificação (rendimento no meio ativo) corresponde muitas vezes a apenas alguns porcentos, as perdas devem ser extremamente pequenas. Estas perdas podem ter basicamente as seguintes causas /12/:

a) Perdas por reflexão ( $\delta_r$ )

A cada incidência normal de uma onda sobre um dos espelhos do ressoador, ocorre uma perda por reflexão ( $\delta_r$ ), dada por:

$$\delta_r = 1 - R \quad (3.8)$$

Estas perdas influenciam diretamente o tempo de vida da luz no interior do ressoador, pois a reflexão nos espelhos faz aumentar esse tempo.

Se  $t_0$  for o tempo que a luz gasta para percorrer a cavidade de comprimento  $L$ , pode-se expressar o tempo ( $t$ ) da luz no interior da cavidade, pela equação

$$t = L/c(1-R) = t_0/(1-R) \quad (3.9)$$

Observa-se assim que o tempo de vida dos fótons na cavidade, pode ser aumentado se a perda  $\delta_r$  for diminuída. Esta diminuição no entanto é limitada pelas perdas por difração.

b) Perdas por difração ( $\delta_d$ )

A cada reflexão da luz num dos espelhos de dimensão  $2a$ , ocorre uma difração de mesmo valor se no lugar do espelho estivesse um orifício daquela dimensão. Se  $\theta$  for o ângulo de difração sobre o primeiro espelho, a difração sobre o segundo espelho terá uma configuração de diâmetro  $\phi$  (fig. 3.7.a) se considerarmos a luz ocupando todo o volume da cavidade.

Estas perdas por difração independem da geometria do ressoador, mas sim de um parâmetro denominado número de Fresnel ( $N$ ), dado pela equação:

$$N = a^2/L\lambda \quad (3.10)$$

onde  $2a$  é o diâmetro do espelho,

$L$  o comprimento do ressoador, e

$\lambda$  o comprimento de onda da luz

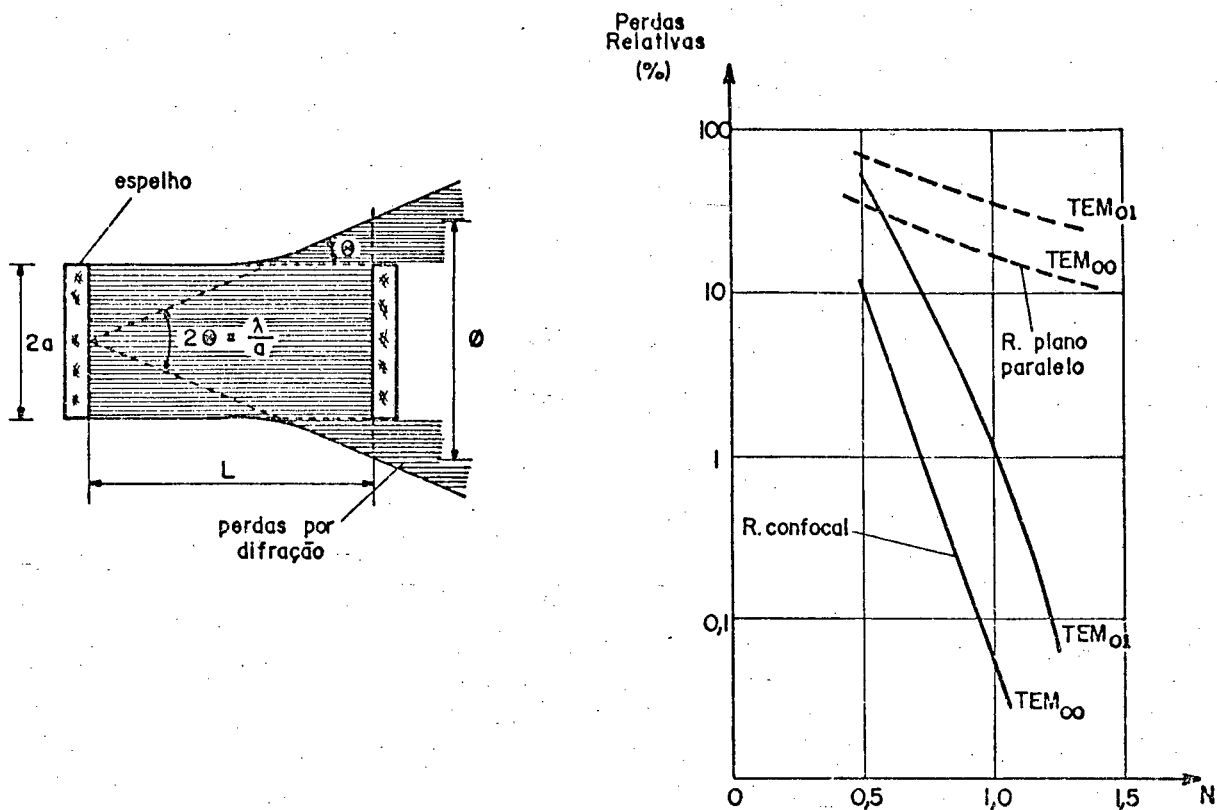


FIG. 3.7 - Perdas por difração, num ressoador óptico /12/.

Para valores não muito pequenos de  $N$ , a perda ( $\delta_d$ ) de uma onda plana, por reflexão, é dada por

$$\delta_d \approx 1 / N \quad (3.11)$$

No entanto, o valor correto das perdas por difração, depende da distribuição de energia no interior do ressoador e só pode ser obtido baseado nos valores corretos dessa distribuição, que por sua vez depende do tipo do ressoador e da forma da onda.

Uma comparação entre as perdas por difração, nos ressoadores confocal e plano-paralelo, para os primeiros modos, está sendo feita pela figura 3.7.b, observando-se as grandes perdas no ressoador plano-paralelo.

As demais perdas, tais como por reflexão, absorção e dispersão, são independentes da distribuição de campo no interior do ressoador.

c) Perdas por desalinhamento dos espelhos ( $\delta_\beta$ )

Pará uma melhor simplificação, estas perdas serão analisadas a par do ressoador plano-paralelo.

Quando as superfícies internas dos espelhos não estiverem bem paralelas, ou seja, apresentarem uma inclinação  $\beta$  um em relação a outro, uma onda diverge e termina fora do campo dos espelhos após uma série de reflexões consecutivas, como pode ser visto na figura 3.8. A perda causada por esse desalinhamento, pode ser dada pela equação:

$$\delta_\beta \approx \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{2a\beta}{\lambda} \right)^2 \approx \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{\xi}{\lambda} \right)^2 \quad (3.12)$$

onde  $\xi$  é o desvio linear da borda do espelho em relação ao comprimento do ressoador.

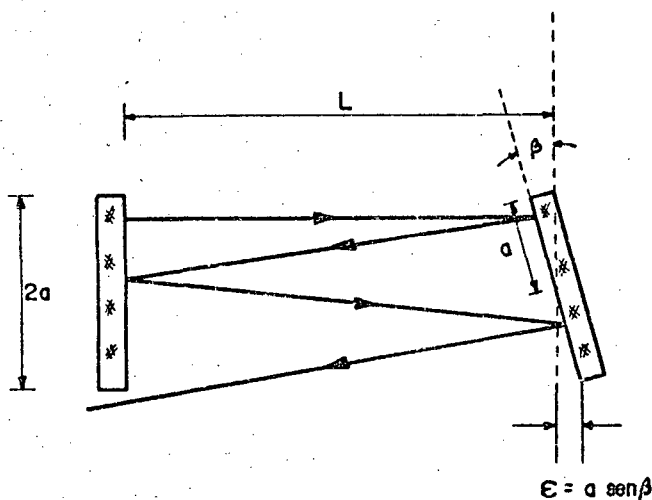


FIG. 3.8 - Perdas num ressoador por desalinhamento dos espelhos /12/.

Para que essas perdas não ultrapassem por exemplo 3%, é necessário que o ângulo seja menor que o ângulo de difração  $\Theta$  ( $\beta \lesssim \Theta, 1\Theta$ ). Igualmente significativo, é o deslocamento  $\xi$ , que deve ser menor que o comprimento de onda da luz ( $\xi \lesssim \lambda$ ).

Baseado nos requisitos acima, resulta que o ajuste angular do espelho deve ter valores  $\beta < 0,1$  mrad, o que torna quase impraticável o uso do ressoador plano-paralelo.

#### d) Perdas por dispersão ( $\delta_D$ )

As perdas por dispersão ( $\delta_D$ ), são causadas por partículas de impurezas depositadas nas superfícies dos espelhos e pela não planicidade das mesmas. Para que essas perdas não ultrapassem a 1%, as superfícies devem apresentar uma planicidade melhor que  $\lambda/10$  e uma limpeza considerada perfeita.

### 3.4 CAMINHO ÓPTICO DO FEIXE

Para uma melhor visualização do caminho óptico de um raio de luz na unidade geradora, tem-se a figura 3.9, supondo-se que os espelhos estejam perfeitamente alinhados. Nesse caso, as janelas de Brewster estão posicionadas de modo que o raio incida sob um ângulo que corresponde ao ângulo de Brewster ( $\alpha_B$ ).

No entanto, o ângulo de saída do raio via janela de Brewster, é função dos índices de refração dos meios ( $n_2$  e  $n_3$ ). Assim, uma variação de pressão e principalmente da temperatura do ar, alteram o valor de  $n_3$ , conseqüentemente o ângulo de emergência ( $\alpha_e$ ) /16, 23/.

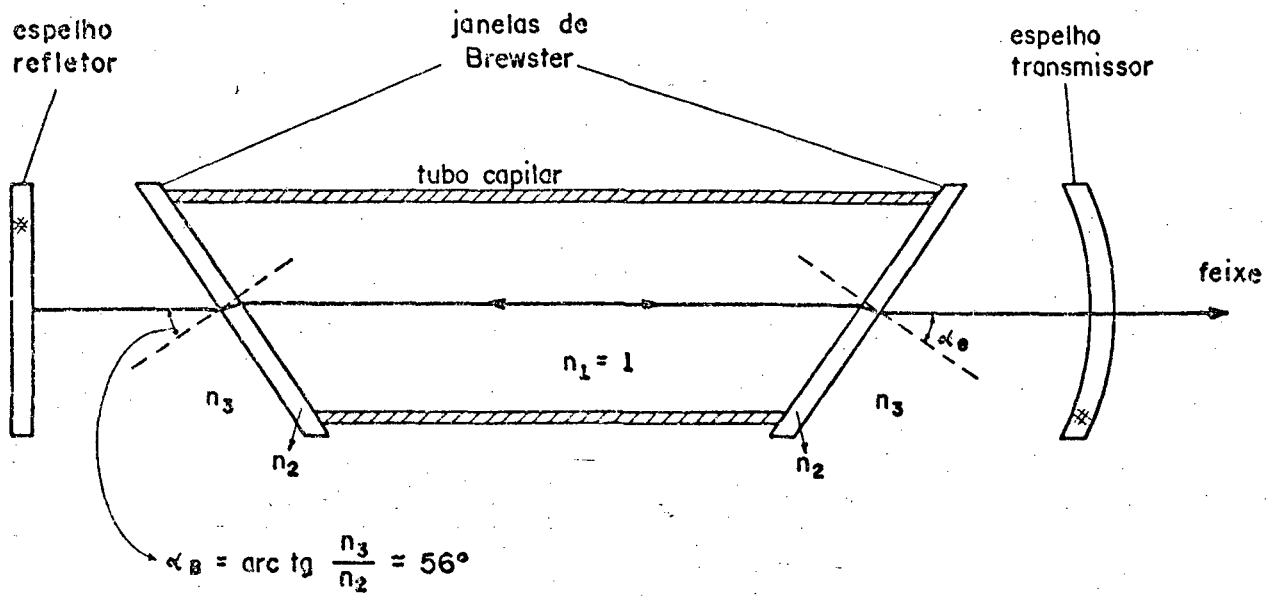


FIG. 3.9 - Caminho óptico de um raio de luz, na UGRP.

#### 4. DETERMINAÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO DO FEIXE LASER

---

A posição do feixe laser, é definida pelo centro energético do mesmo. Assim, a instabilidade do feixe é caracterizada pela variação do seu centro energético, motivo pelo qual será feito um estudo experimental detalhado do perfil energético do mesmo.

##### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL ENERGÉTICO

Quando o laser está operando no modo fundamental, TEM<sub>00</sub>, o feixe apresenta, teoricamente, uma frente de onda plana e um perfil da irradiância gaussiano, conforme mostrado na figura 3.4. Na prática, o perfil energético não se apresenta de maneira tão perfeita, como mostrado naquela figura e nem a frente de onda se mantém plana, visto que o feixe sofre uma divergência, caracterizada na figura 2.4.

O perfil energético do feixe observado na prática a várias distâncias do laser, desenvolve-se como exemplificado na figura 4.1, fornecida pelo fabricante de lasers /24/. As irregularidades apresentadas, são devido aos efeitos da difração (anéis de Fresnel) e causados basicamente pelas partículas de pó depositadas sobre a superfície externa do espelho transmissor e pelas imperfeições sobre as camadas internas dos espelhos. Tais distorções denominadas também de "ruído óptico", são mais nítidas próximo ao laser, desaparecendo gradativamente em função do afastamento em relação ao laser.

Devido à natureza ondulatória da luz e o pequeno diâmetro do feixe, este apresenta uma divergência natural (cap. 3), causando um aumento no diâmetro, conseqüentemente diminuindo a intensidade da luz num ponto considerado. Os pequenos picos, referentes aos ruídos, igualmente diminuem de intensidade e se alargam com o aumento de distância, fazendo com que o perfil passe a apresentar

## IRRADIÂNCIA RELATIVA

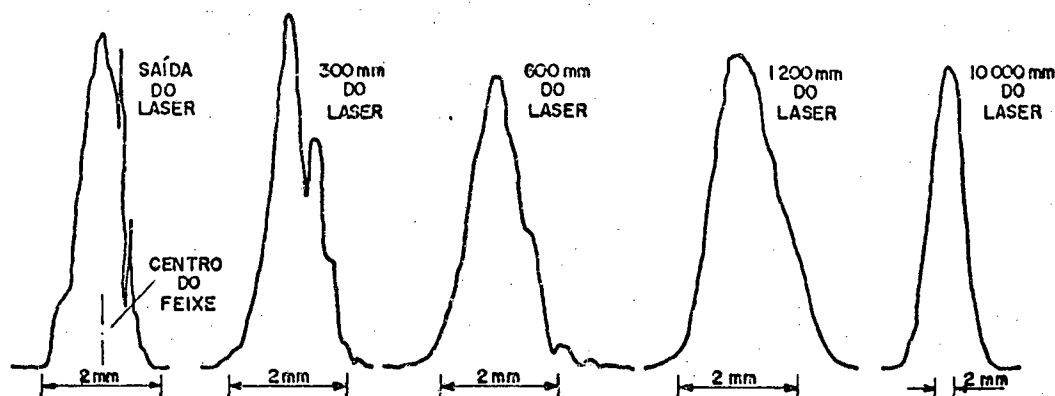


FIG. 4.1 - Variação do perfil energético em função da distância ao laser /12/.

uma configuração mais perfeita, ou seja, mais regular, aproximando-se da forma gaussiana.

Por outro lado, o aumento do diâmetro do feixe não se manifestará em forma de instabilidade do feixe, por causa da normalização que é feita nos cálculos da posição do feixe, conforme já comentado no capítulo 1 e melhor detalhado no capítulo 5.

Considerando agora a hipótese de que o feixe apresente uma estabilidade perfeita, ou seja, sem sofrer variação angular ou paralela, o centro energético do feixe se mantém colinear em função do distanciamento em relação ao laser, mesmo que o seu perfil energético esteja levemente distorcido por causa de uma impureza ou ranhura sobre o espelho de saída, por exemplo. Considerando no entanto uma variação angular ou paralela do feixe, ambas poderão ser acrescidas de uma variação paralela, causada pela impureza ou ranhura, que devido à difração da luz, deslocará o centro energético do feixe.



#### 4.2 OTIMIZAÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO

As irregularidades do perfil energético anteriormente apresentadas, podem ser melhoradas por meio de componentes ópticos, acoplados na saída do laser.

O principal desses componentes, é um telescópio, esquematizado na figura 4.2, que tem por finalidade além das já apresentadas no item 2.1, fazer uso de um filtro espacial, posicionado no foco das duas lentes, eliminando grande parte dos ruídos ópticos. Esses ruídos são causados pela difração da luz devido às impurezas depositadas sobre a superfície externa do espelho de saída ou ranhuras sobre o mesmo. Como os ruídos apresentam uma divergência maior que a do feixe, os mesmos podem

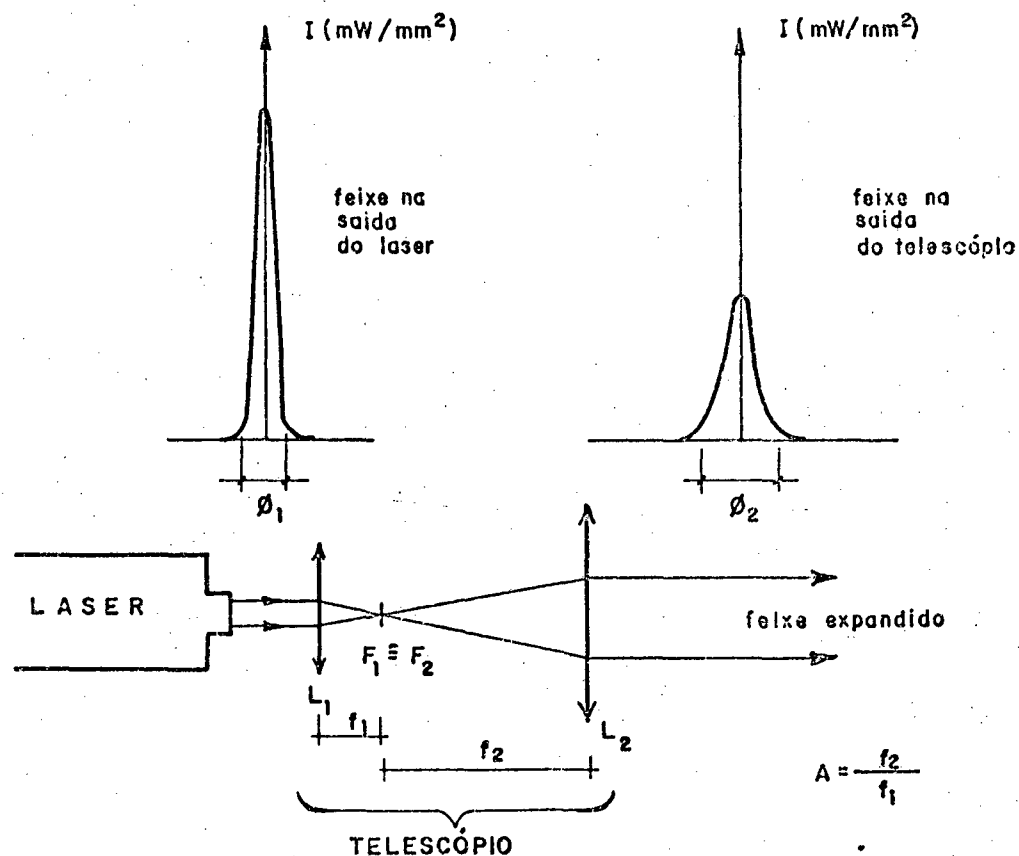


FIG. 4.2 - Telescópio para ampliação do feixe.

ser refletidos, ao se posicionar no foco das duas lentes que constituem o telescópio, um filtro espacial, que é constituído de um orifício de pequenas dimensões (aprox.  $30 \mu\text{m}$ ), permitindo assim apenas a passagem da luz do feixe propriamente dito, como pode ser visto pela figura 4.3 /25/.

Para cálculo de um diâmetro ótimo ( $\psi$ ) do orifício, pode ser utilizada a fórmula abaixo /14/:

$$\psi = (4 \lambda f) / 2r \quad (4.1)$$

onde  $f$  é a distância focal da primeira lente e  $2r$  o diâmetro do feixe incidente. Para  $f = 10 \text{ mm}$  e  $2r = 0,8 \text{ mm}$ , por exemplo, obtém-se para  $\psi$  o valor de  $32 \mu\text{m}$ .

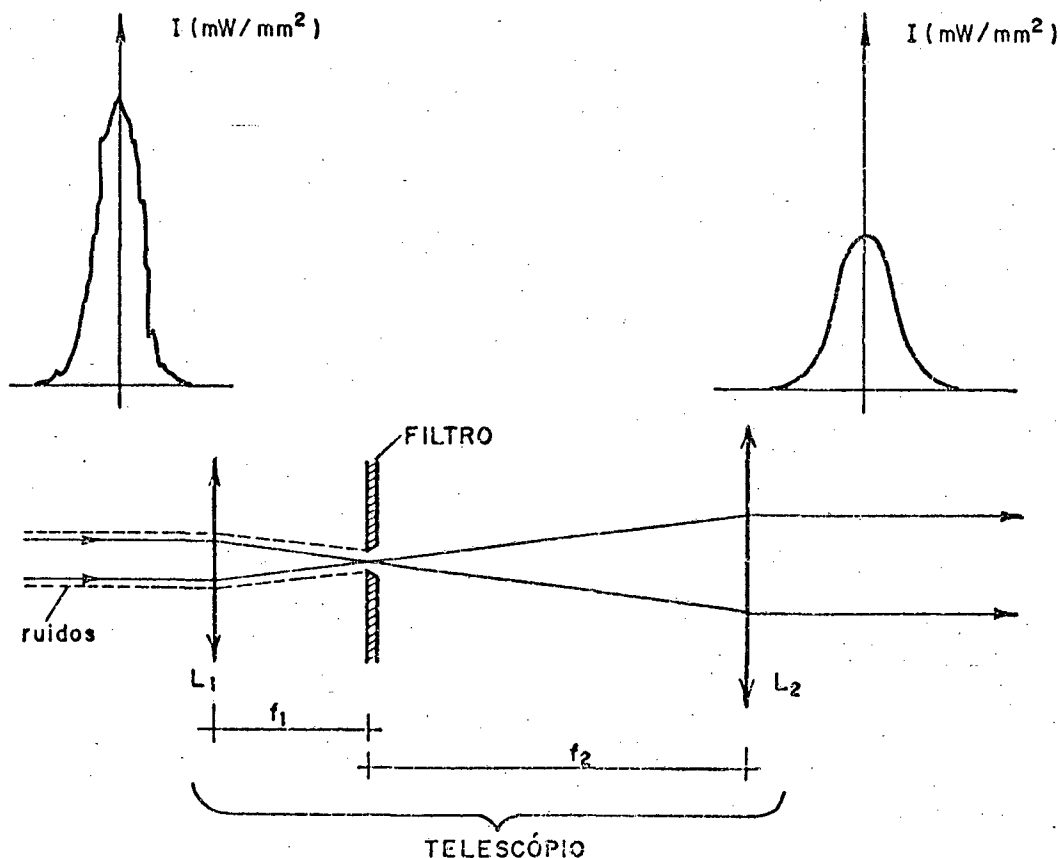


FIG. 4.3 - Uso do filtro espacial para eliminar os ruídos ópticos.

No entanto, uma variação angular ou paralela relativamente grande do feixe, deslocará o mesmo parcialmente fora do orifício, causando um acréscimo na instabilidade, ou poderá até deslocar o feixe totalmente fora do orifício.

Sem o uso do filtro espacial, os ruídos ópticos são ampliados pelo telescópio, além dos ruídos que surgirão, ocasionados pelas lentes do telescópio. Mesmo com o uso do filtro, a lente ocular do telescópio poderá ocasionar ruídos ópticos, porém de menor ordem, considerando a menor intensidade da luz sobre essa lente, devido o aumento do diâmetro do feixe.

#### 4.3 MEDIÇÃO DO PERFIL ENERGÉTICO

Para determinar a curva do perfil energético experimentalmente, fez-se necessário montar um dispositivo de medição adequado, para medir a irradiância em qualquer posição (x, y) de uma seção transversal do feixe, podendo-se assim traçar a curva dos valores das irradiâncias nas posições consideradas. Esses valores correspondem à irradiância média de uma pequena área na posição considerada (fig. 4.4.a), referente às dimensões de um orifício retangular utilizado, pelo qual passa a luz, para então incidir sobre o fotodetector. Optou-se por esse método, por não se dispor de um sistema que permitisse traçar a curva do perfil em pontos discretos.

Para obtenção do orifício, montou-se com auxílio de um microscópio, 4 lâminas de bordas finas, transversalmente duas a duas, sobre um suporte cilíndrico metálico oco (fig. 4.4.b). As dimensões desse orifício, pequenas relativamente ao diâmetro do feixe, foram medidas pelo método da difração de Fraunhofer /13/, utilizando-se a luz do laser, e o resultado obtido foi de (47 x 56)  $\mu\text{m}$ .

Na parte posterior do orifício, dentro do suporte, encontra-se um fotodetector. Este dispositivo foi montado sobre uma mesa

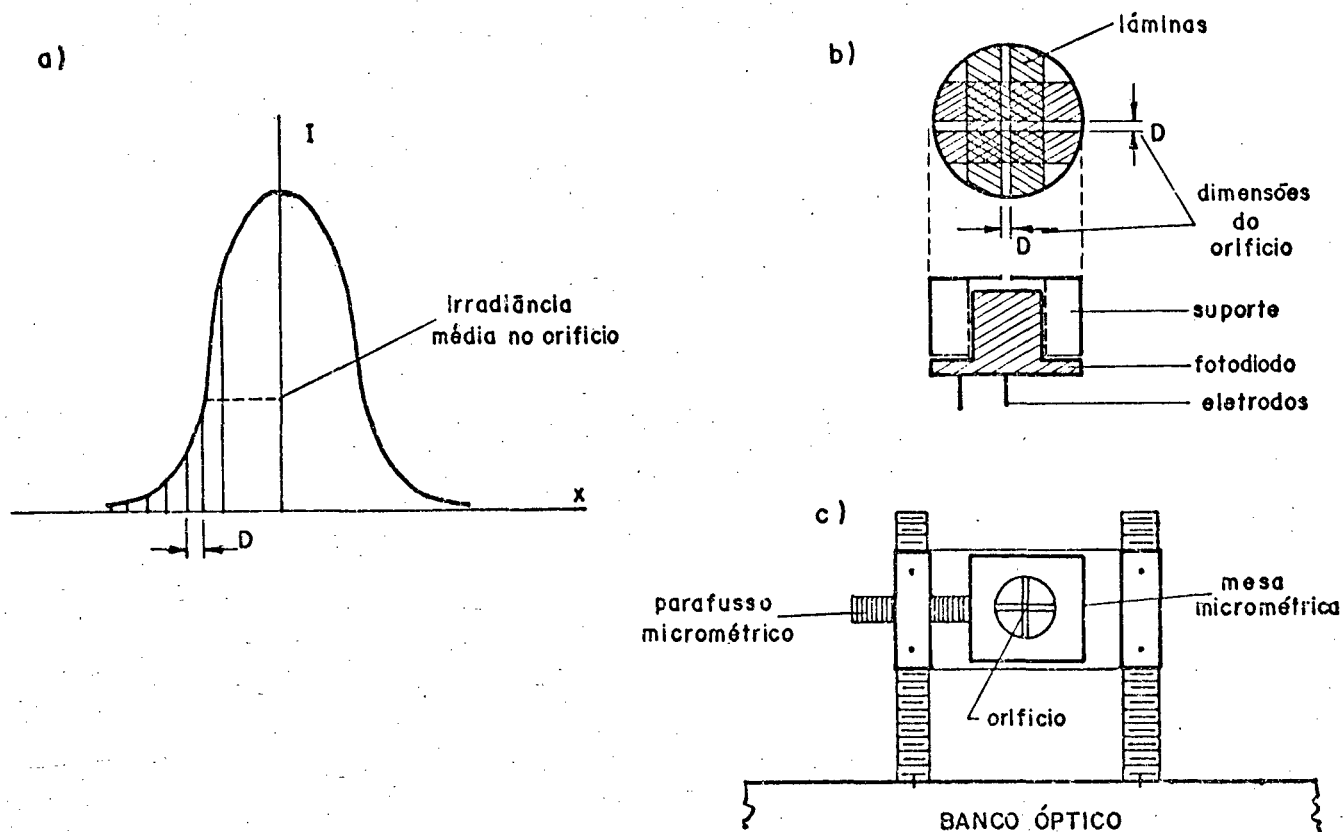


FIG. 4.4 - Dispositivo para medição do perfil energético.

micrométrica, que executará os deslocamentos transversais. A mesa micrométrica por sua vez, foi fixada ao banco óptico através de uma estrutura metálica ajustável (fig. 4.4.c).

O fotodetector utilizado para essas medições, foi do tipo fotocondutivo (linear com a irradiância) /26/ de baixo ruído elétrico. Para gerar o sinal proporcional à luz incidente, é necessário ligar a ele uma fonte de tensão de corrente contínua, de 10 V, conforme esquema da figura 4.5.

Foram aplicados dois métodos para obtenção do perfil energético:

a) com um medidor de deslocamento /27/ acoplado à mesa micrométrica, sendo esta posicionada de tal forma que o orifício se localizasse numa extremidade do feixe e com

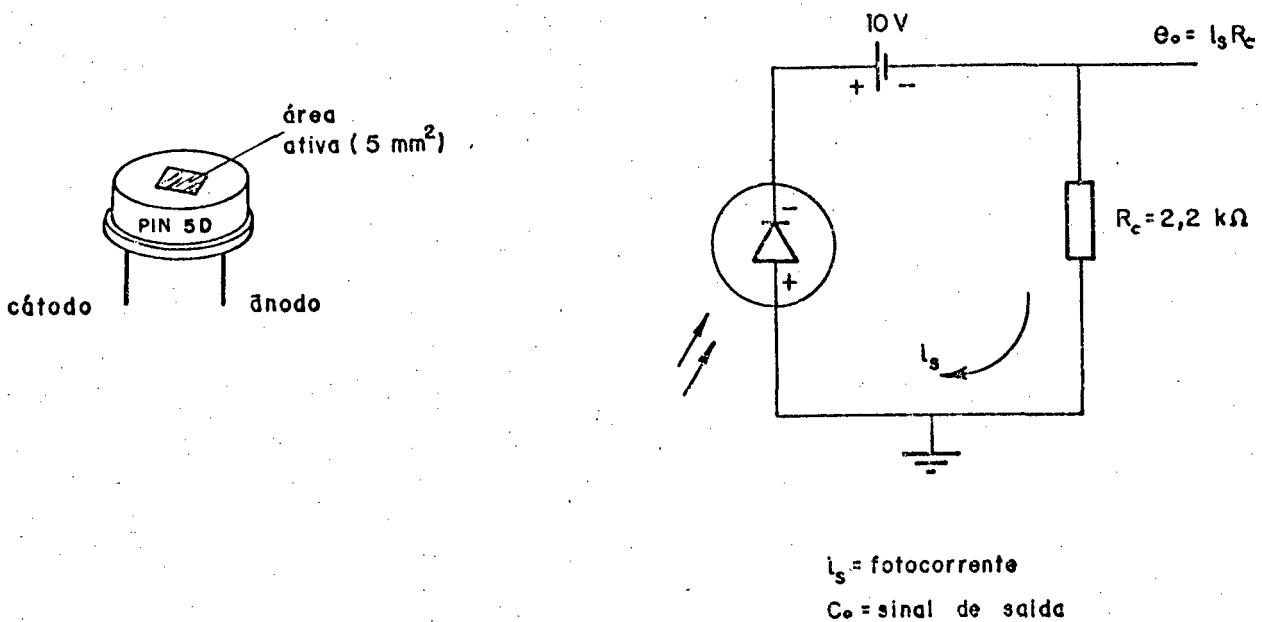


FIG. 4.5 - Fotodiodo PIN-5D e circuito de ligação /26/.

deslocamentos de  $5\phi\mu\text{m}$  em  $5\phi\mu\text{m}$ , percorria-se transversalmente o feixe. Os sinais elétricos foram medidos pelo SAS, controlado pelo microcomputador e junto com os valores dos deslocamentos fornecidos externamente, armazenados em forma de matriz na memória do computador. Posteriormente, foi traçado o gráfico por intermédio de uma plotadora (fig. 4.6).

A figura 4.7, é o resultado de uma medição, utilizando-se um laser de 5 mW de potência com diâmetro nominal de  $\phi,8\text{ mm}$  na saída do laser e divergência igual a  $1,0\text{ mrad}$ , após várias horas de funcionamento contínuo e com o plano de medição a  $3\phi\phi\text{ mm}$  da saída do laser.

b) no segundo método, o perfil de irradiância foi obtido de forma contínua e imediata, com auxílio de um registrador (X - Y), ao invés de medir ponto a ponto. Por intermédio de um transdutor de deslocamentos /28/, acoplado à mesa micrométrica sobre a qual estava montado o fotodetector, foi gerado num sinal (x)

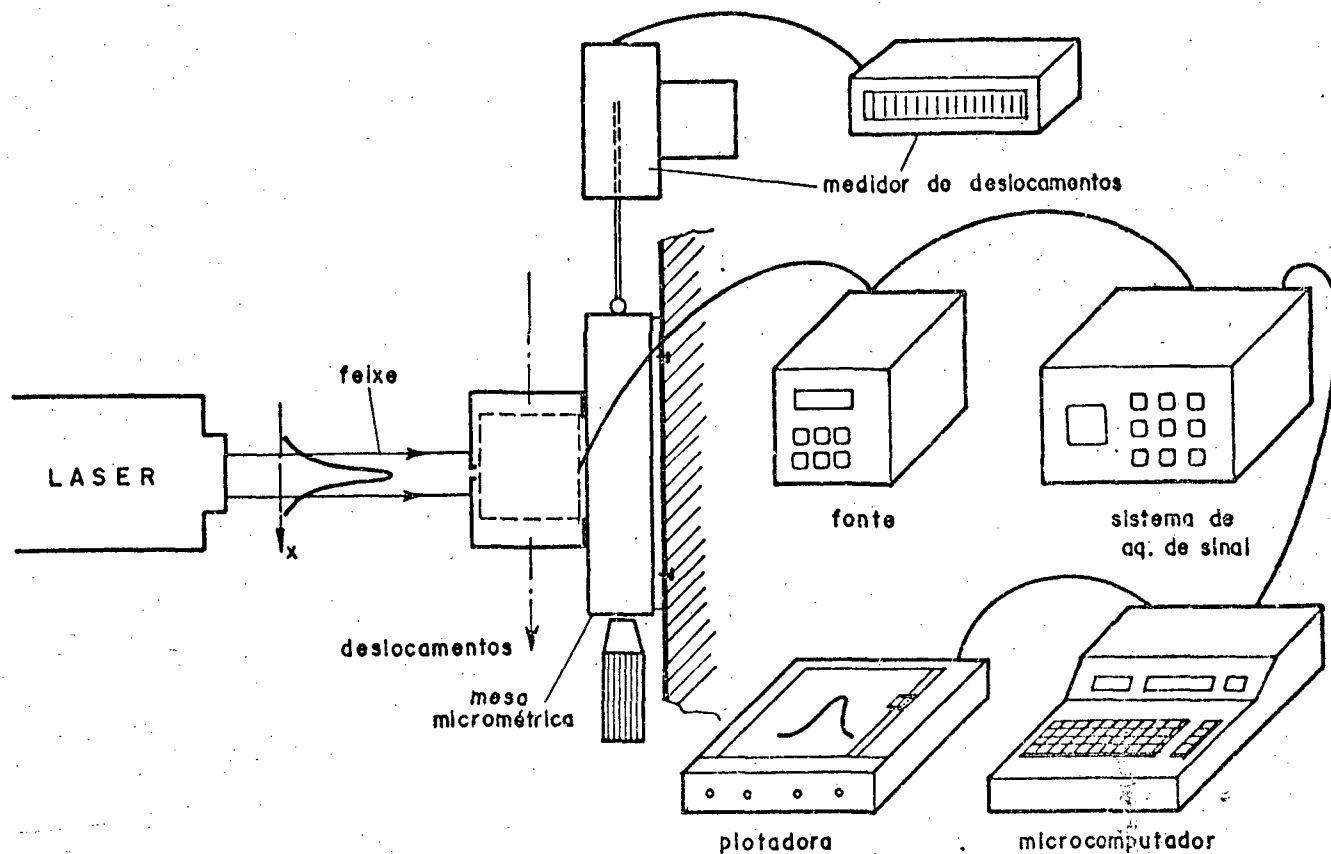


FIG. 4.6 - Montagem para determinação do perfil energético.

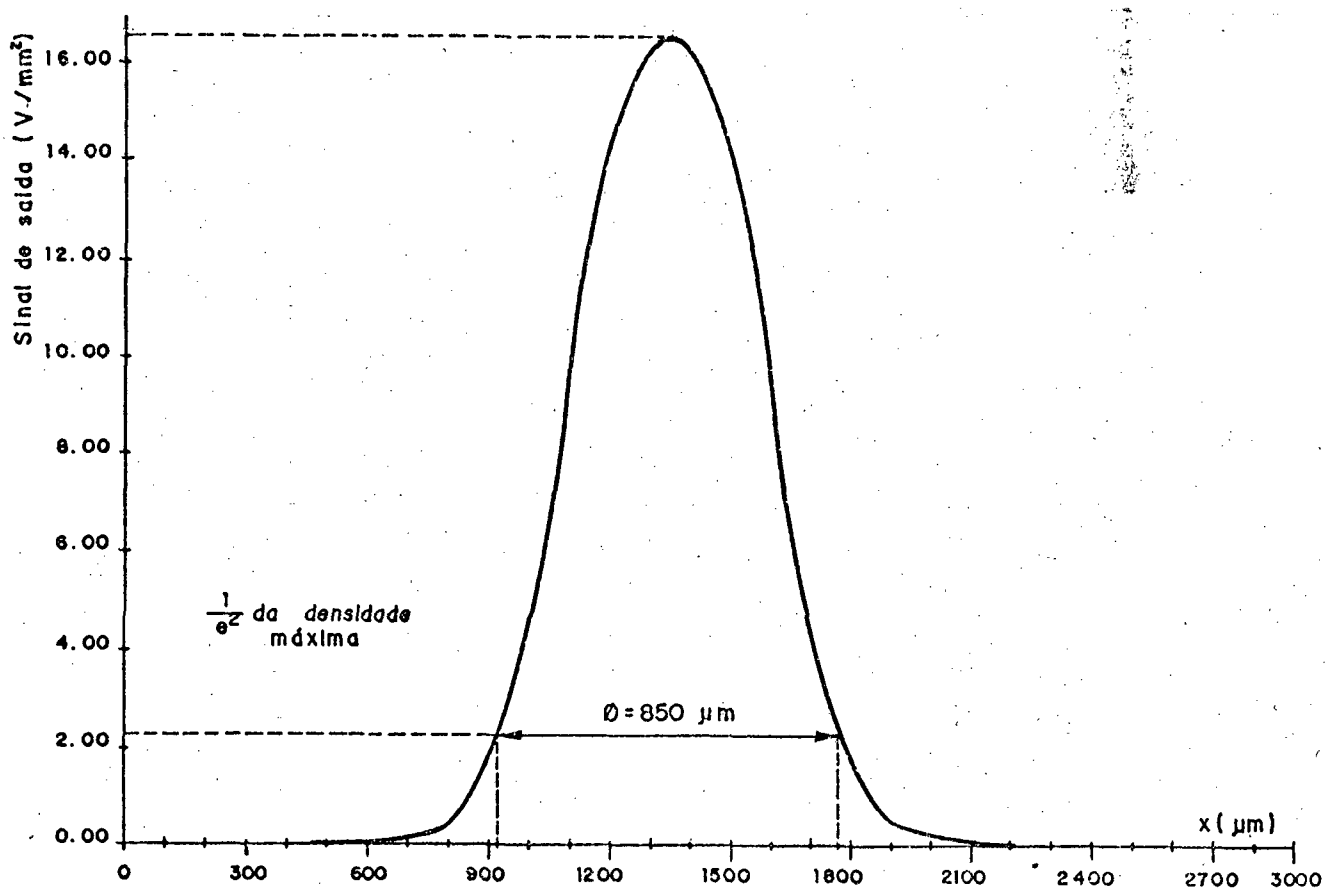


FIG. 4.7 - Perfil energético do feixe, medido de 50 µm em 50 µm.

referente ao deslocamento do fotodetector, e o outro sinal (y) corresponde à tensão gerada no fotodetector ao atravessar transversalmente o feixe luminoso. A figura 4.8 mostra um esquema dessa montagem; utilizou-se um filtro passa-baixas devido aos ruídos elétricos observados.

Ao parafuso micrométrico da mesa, foi acoplada uma pequena manivela, que proporcionou movimentos contínuos ao dispositivo de medição.

Uma fotografia dessa última montagem, para determinação do perfil energético, é mostrada na figura 4.9.

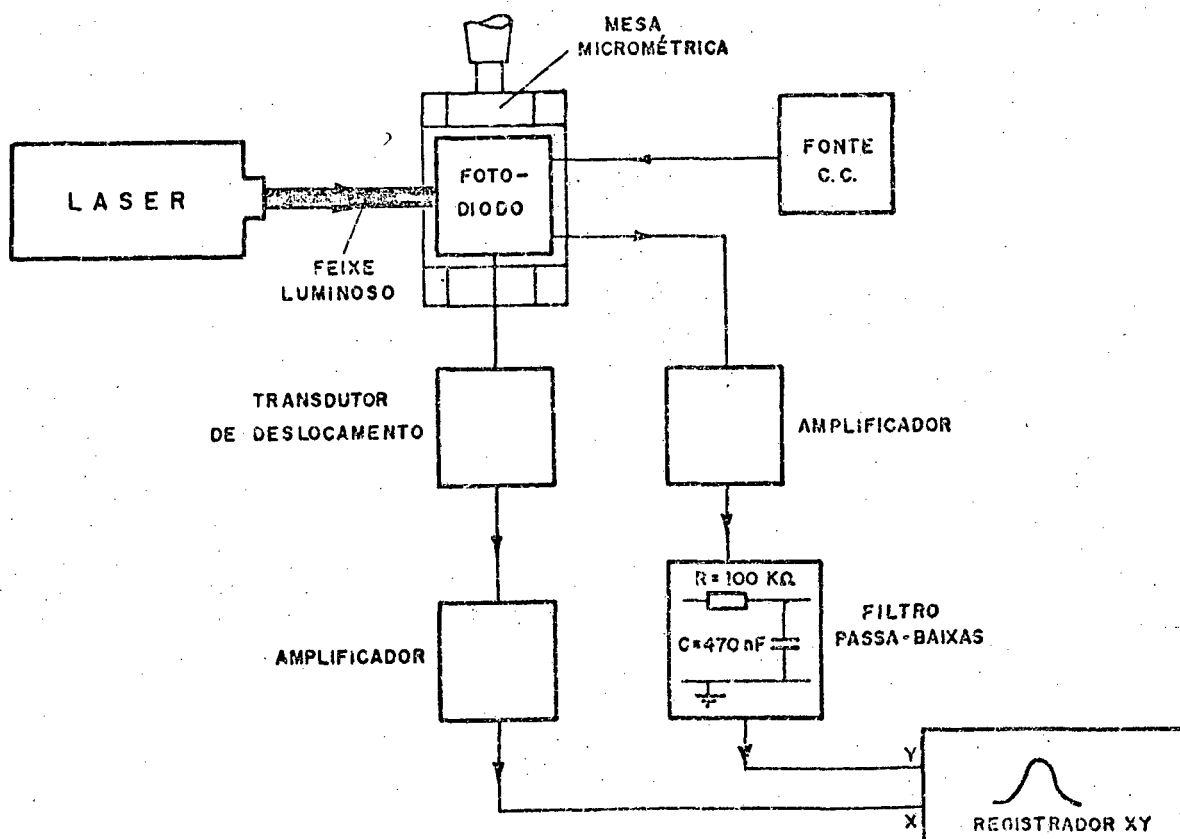


FIG. 4.8 - Diagrama da montagem para verificação do perfil energético, utilizando registrador (x-y).

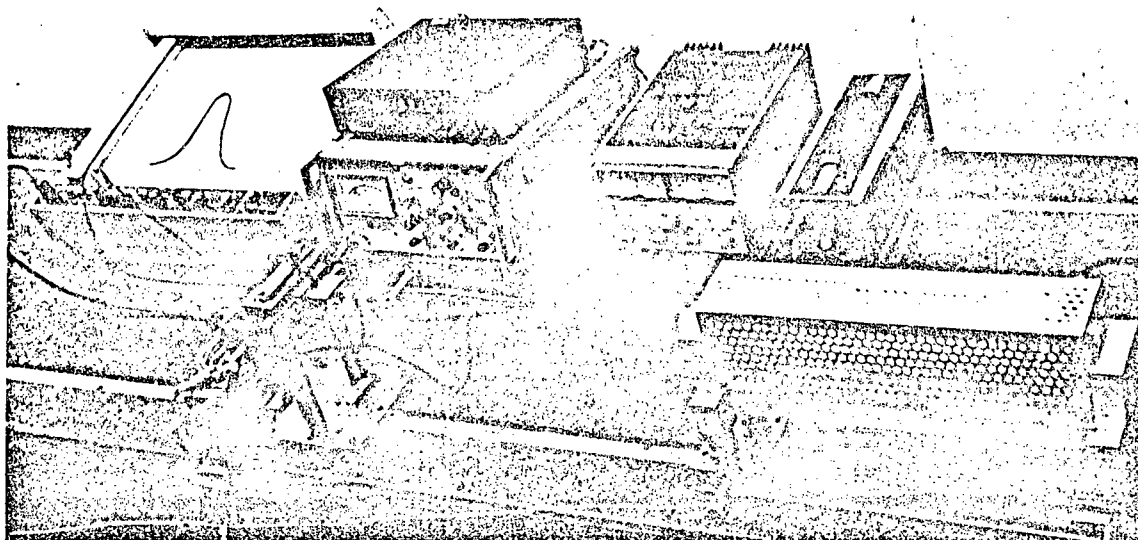


FIG. 4.9 - Determinação do perfil energético, com registrador X-Y.

#### 4.4 RESULTADOS DOS TRABALHOS EXPERIMENTAIS

Os resultados a seguir apresentados, obtidos aplicando-se o segundo método de medição do perfil anteriormente descrito, em função da maior rapidez, tiveram por objetivo verificar o perfil energético do feixe, sob diversas circunstâncias, tais como:

a) Em função da condição térmica do laser.

Analisando-se um laser de 5 mW de potência nominal, observou-se que durante a fase de estabilização das temperaturas, o perfil sofre pequenas alterações, até apresentar uma forma mais regular e estável. Na figura 4.10.a está representado o perfil no instante em que o laser foi ligado e após 30 min de funcionamento, observando-se uma pequena diminuição na potência (cerca de 10%). Essa diminuição na potência), é explicada porque o tubo do laser utilizado (LAB-1) estar no limite de seu tempo de vida útil,



apresentando uma potência variável, como será mostrado no capítulo 7. Um outro laser utilizado, apresentou um aumento na potência, em torno de 10%, no mesmo intervalo de tempo, mantendo-se então inalterado, o que comprova com os dados dos fabricantes de lasers. Na figura 4.10.b, tem-se a superposição do perfil, registrado a cada 30 min subsequentes, e na figura 4.11.c, o perfil após 150 min de funcionamento, apresentando-se de forma mais regular.

b) Em função da distância do laser.

Na figura 4.11, estão representados os perfis tomados a várias distâncias, com o laser em regime (após várias horas de funcionamento), observando-se um aumento do diâmetro do feixe, devido à divergência natural, conseqüentemente uma queda da irradiância relativa. No entanto, a energia total do feixe, se mantém praticamente inalterada. Os valores do diâmetro registrados, medidos a  $1/e^2$  da irradiância máxima, estão de acordo com os valores fornecidos pelo fabricante do laser.

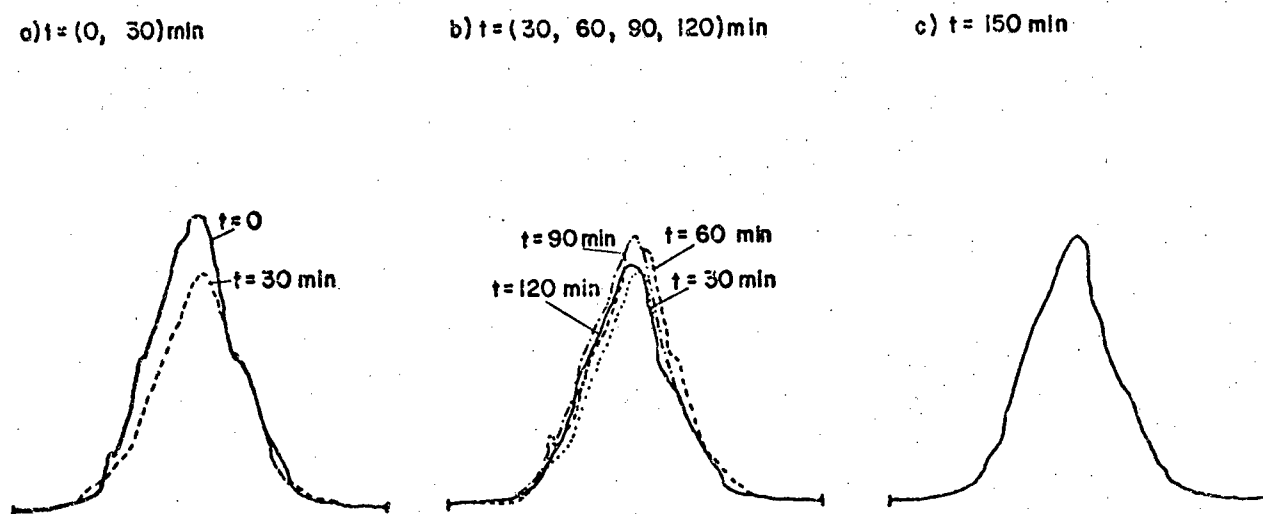


FIG. 4.10 - Perfil energético do feixe, durante a fase de esta bilização térmica.

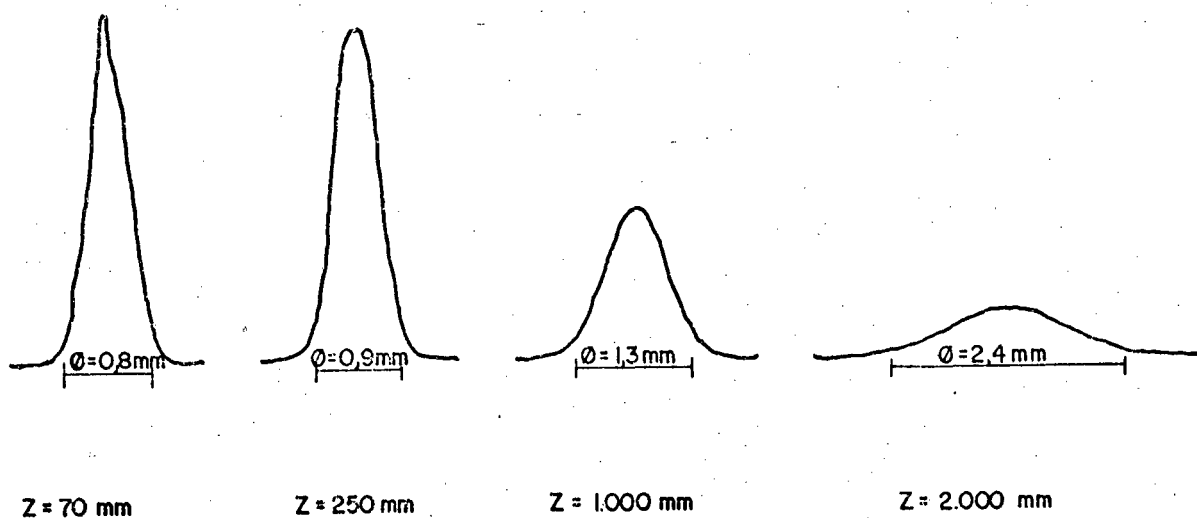


FIG. 4.11 - Perfil energético do feixe, em 4 posições diferentes.

c) Com uso do telescópio.

Utilizando-se um telescópio sem filtro espacial na saída do laser e o orifício a 100 mm do mesmo, observa-se as irregularidades ou ruídos ópticos (fig. 4.12.a), conforme comentado nos itens 4.1 e 4.2. A irradiância relativa diminuiu para cerca de 10% em relação ao valor sem telescópio, devido ao aumento do diâmetro.

d) Com uso de um polarizador.

Com um polarizador acoplado na saída do laser, para atenuar a irradiância do feixe, observa-se também certas irregularidades do perfil, como mostrado na figura 4.12.b. Essas irregularidades podem ser causadas basicamente pelo fato da luz no centro do feixe ser mais polarizada, sofrendo assim uma maior atenuação, pois a polarização é função do número de passagens da luz pelas janelas e Brewster, durante a amplificação na cavidade ressonante.

a) COM TELESCÓPIO

b) COM POLARIZADOR

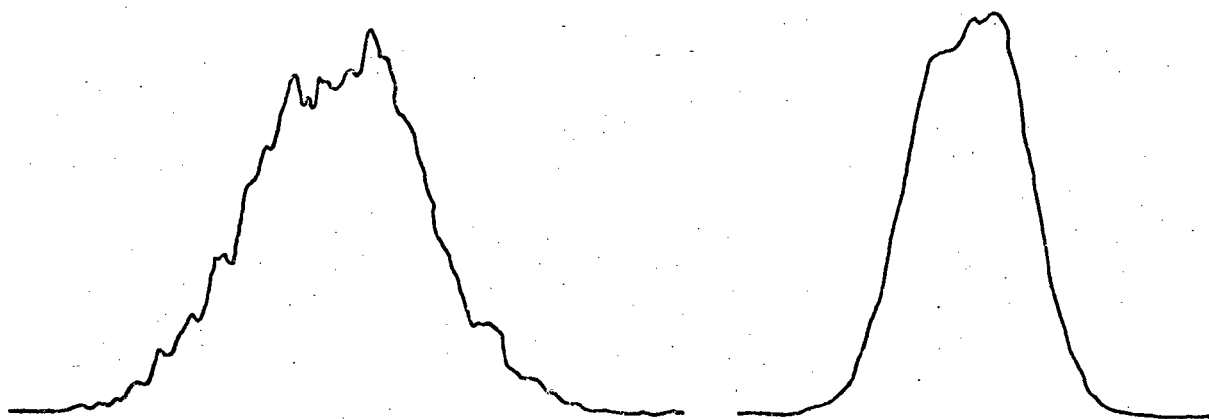


FIG. 4.12 - Perfil energético com uso de telescópio e com uso de polarizador.

e) Com perturbações ambientais.

Provocando-se turbulências de ar sobre o laser ou sobre o feixe, não se verificou uma alteração significativa do perfil.

## 5. INSTRUMENTAÇÃO PARA MEDIÇÃO DA INSTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE

### 5.1 MÉTODO PARA MEDIÇÃO DA INSTABILIDADE

Visto que a instabilidade espacial do feixe pode ser caracterizada pelas suas variações paralela e angular de posição (cap. 2.1), faz-se necessário ter um sistema que possibilite a medição simultânea desses parâmetros. Na figura 5.1.a estão esquematizadas essas variações ( $D$  e  $\theta$ ) no plano  $xz$  e duas posições de medição, A e B, de forma que é possível equacionar

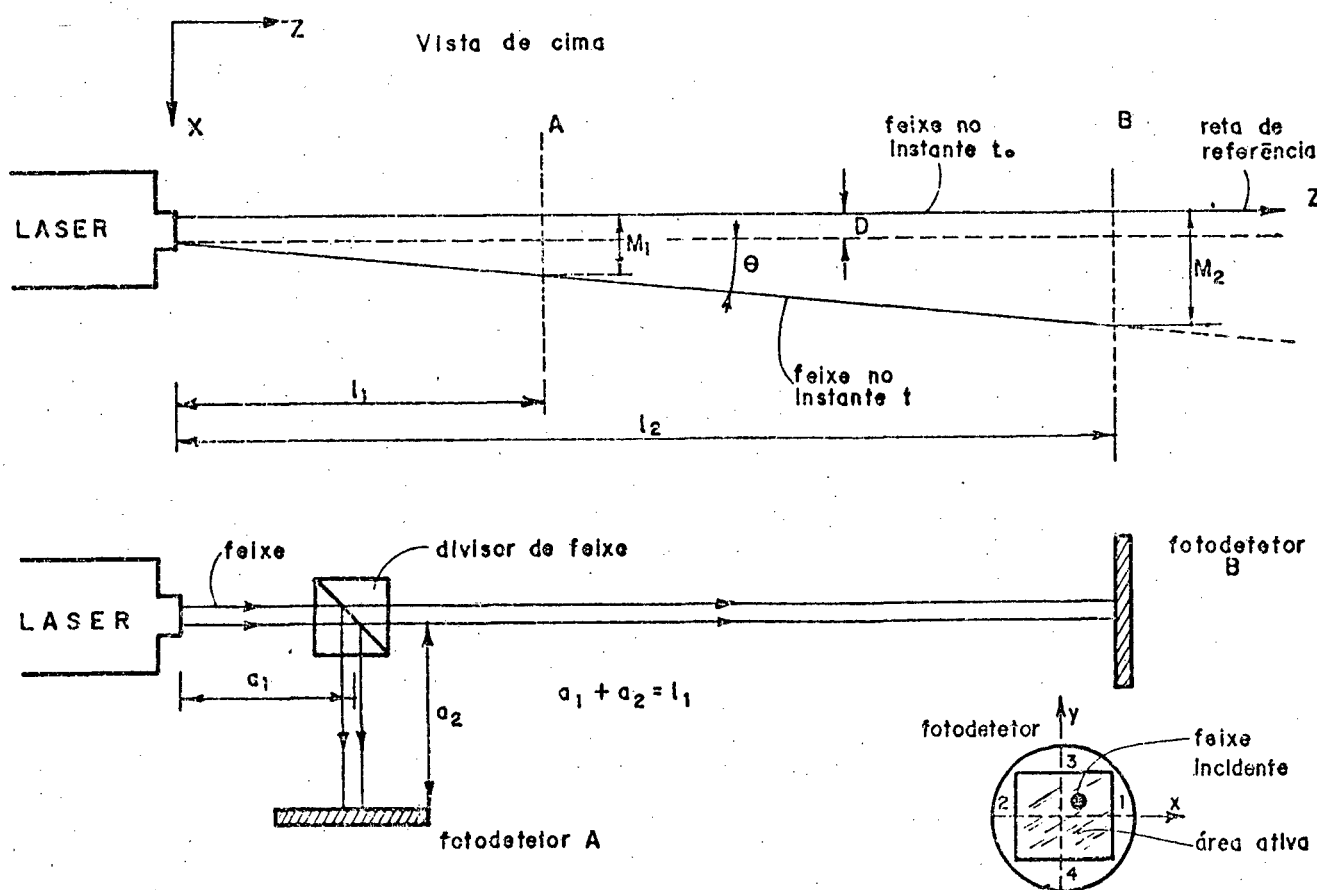


FIG. 5.1 - Método para medição da variação de posição do feixe ( $M_1$  e  $M_2$ ) sobre os fotodetektors (A e B).

esses parâmetros. Como é impossível posicionar um fotodetector na posição A sem interromper a trajetória do feixe de luz, utilizou-se um divisor de feixe, desviando assim parte da luz ortogonalmente, sobre um fotodetector localizado numa posição correspondente à posição A, como pode ser observado pela figura 5.1.b.

Quando ocorre uma variação paralela (D) e angular ( $\theta$ ) simultaneamente, no plano xz por exemplo, a partir de uma posição inicial tomada como referência, o fotodetector A acusará uma variação de medida  $M_1$  (com sinal inverso devido ao divisor de feixe e posição lateral), e em B uma variação  $M_2$ , dadas pelas equações:

$$M_1 = - (\theta \cdot l_1 + D) \quad (5.1)$$

$$M_2 = \theta \cdot l_2 + D \quad (5.2)$$

onde foi considerada uma aproximação paraxial ( $\text{sen } \theta \approx \theta$ ) e  $l_1$  e  $l_2$  são as distâncias da saída do laser (plano de referência) às posições A e B, respectivamente.

Resolvendo as equações 5.1 e 5.2, obtemos para D e  $\theta$ :

$$Dx = - (M_1 \cdot l_2 + M_2 \cdot l_1) / (l_2 - l_1) \quad (5.3)$$

$$\theta x = (M_2 + M_1) / (l_2 - l_1) \quad (5.4)$$

sendo  $M_1$  e  $M_2$ , dados pela equação geral

$$M(x) = K (V_1 - V_2) / (V_1 + V_2) \quad (5.5)$$

para a medida na direção x, onde  $V_1$  e  $V_2$  são os sinais elétricos gerados nos eletrodos 1 e 2 de cada fotodetector e K é a constante de calibração do mesmo.

Analogamente, a medida M no plano yz, é dada por

$$M(y) = K (V_3 - V_4) / (V_3 + V_4) \quad (5.6)$$

para ambos os fotodetetores. As variações  $D_y$  e  $\theta_y$  no plano  $yz$ , ocorrem no mesmo sentido para ambos os fotodetetores.

A leitura dos sinais gerados ( $V_i$ ) bem como os cálculos para obtenção das variações de posição ( $D$  e  $\theta$ ) do feixe, são realizadas com auxílio do microcomputador e que será melhor detalhado no item 5.5.

## 5.2 - O BANCO DE ENSAIO

Para medição da instabilidade do feixe, são necessários uma série de componentes e uma metodologia adequada, que serão descritos neste item. Como componentes, foram utilizados basicamente o banco óptico, dispositivos mecânicos, ópticos e eletrônicos, e como metodologia, a automatização por meio de um microcomputador, tanto para medição como apresentação dos resultados.

Na figura 5.2, tem-se uma fotografia do banco de ensaio, onde é mostrado o laser, o divisor de feixe e a montagem dos fotodetetores sobre o banco óptico, o SAS e o microcomputador.

Na figura 5.3, uma fotografia dos módulos de confecção dos relatórios, ou seja, microcomputador, impressora e plotadora.

### 5.2.1 - O Banco Óptico

Utilizou-se como elemento de referência para medição das instabilidades, um banco óptico, sobre o qual foram realizados os ensaios. É fundamental que este apresente máxima estabilidade, ou seja, isolamento de vibrações externas causadas por máquinas ou mesmo o deslocamento de uma pessoa na sala, o bater de uma porta, o funcionamento de um aparelho de ar condicionado, etc., que alteraram os valores das instabilidades medidas.

Foi utilizado uma mesa de granito, de dimensões (3200x735x120) mm /29/, apoiada sobre 4 amortecedores pneumáticos

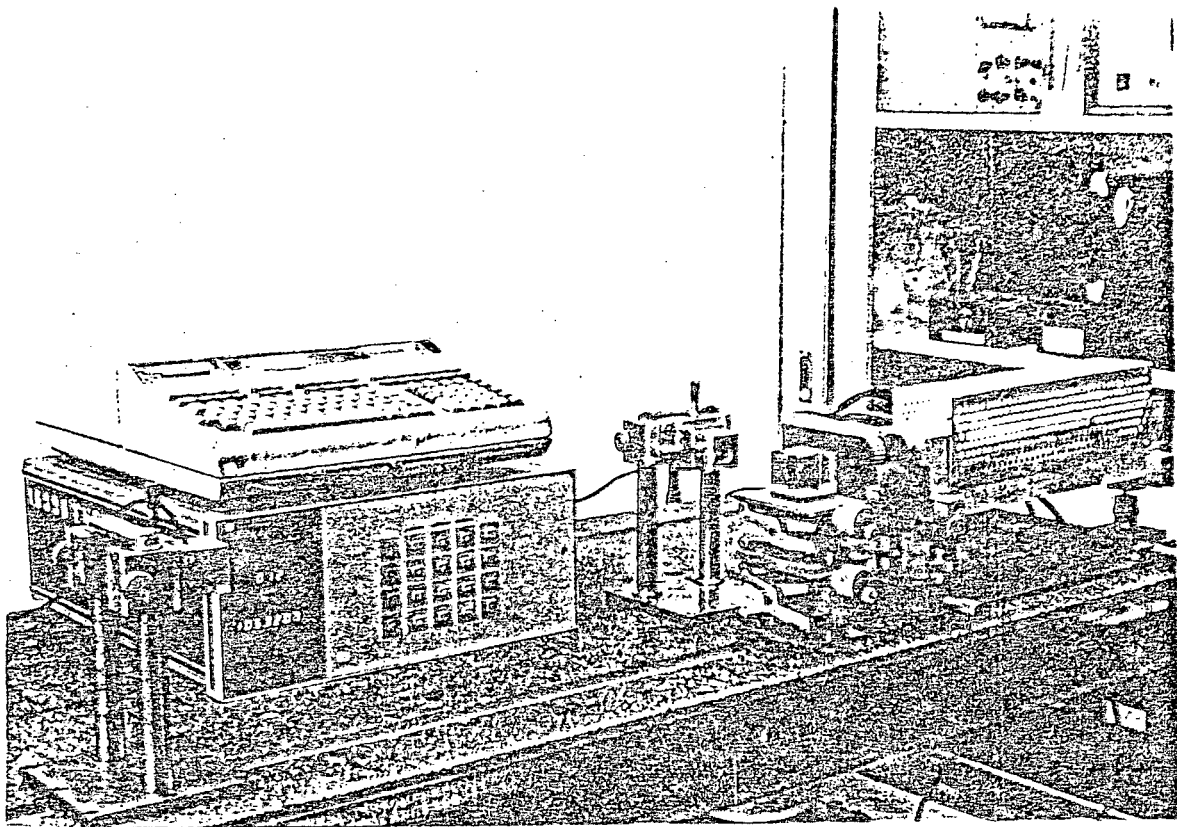


FIG. 5.2 - Montagem para determinação da instabilidade do laser.

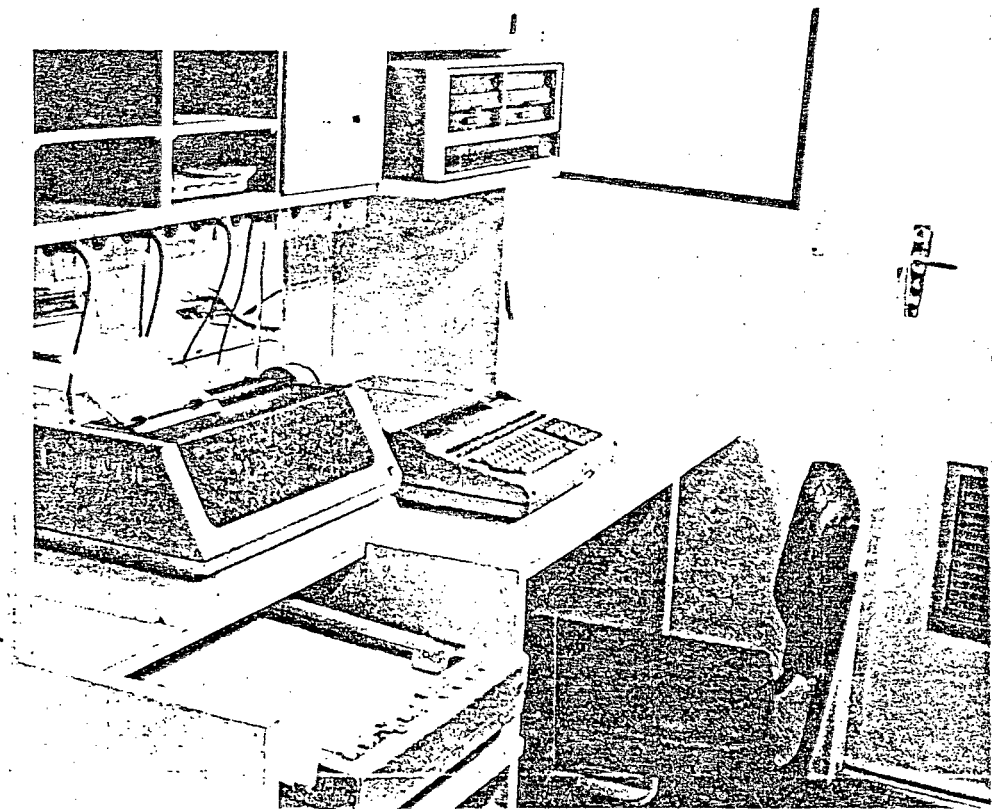


FIG. 5.3 - Processo automatizado para documentação das instabilidades.

e sendo cada qual apoiado sobre uma coluna de concreto especialmente construída, para proporcionar assim a melhor estabilidade possível ao banco óptico.

### 5.2.2 - Componentes Mecânicos

Os dispositivos mecânicos requeridos para operacionalizar o banco de ensaio, objetivando resultados de instabilidade confiáveis, devem obedecer a critérios específicos, a fim de proporcionarem suficiente estabilidade e facilidade de execução dos alinhamentos necessários.

Primeiramente com relação ao suporte do tubo, segundo a figura 5.4, este deve atender aos seguintes requisitos:

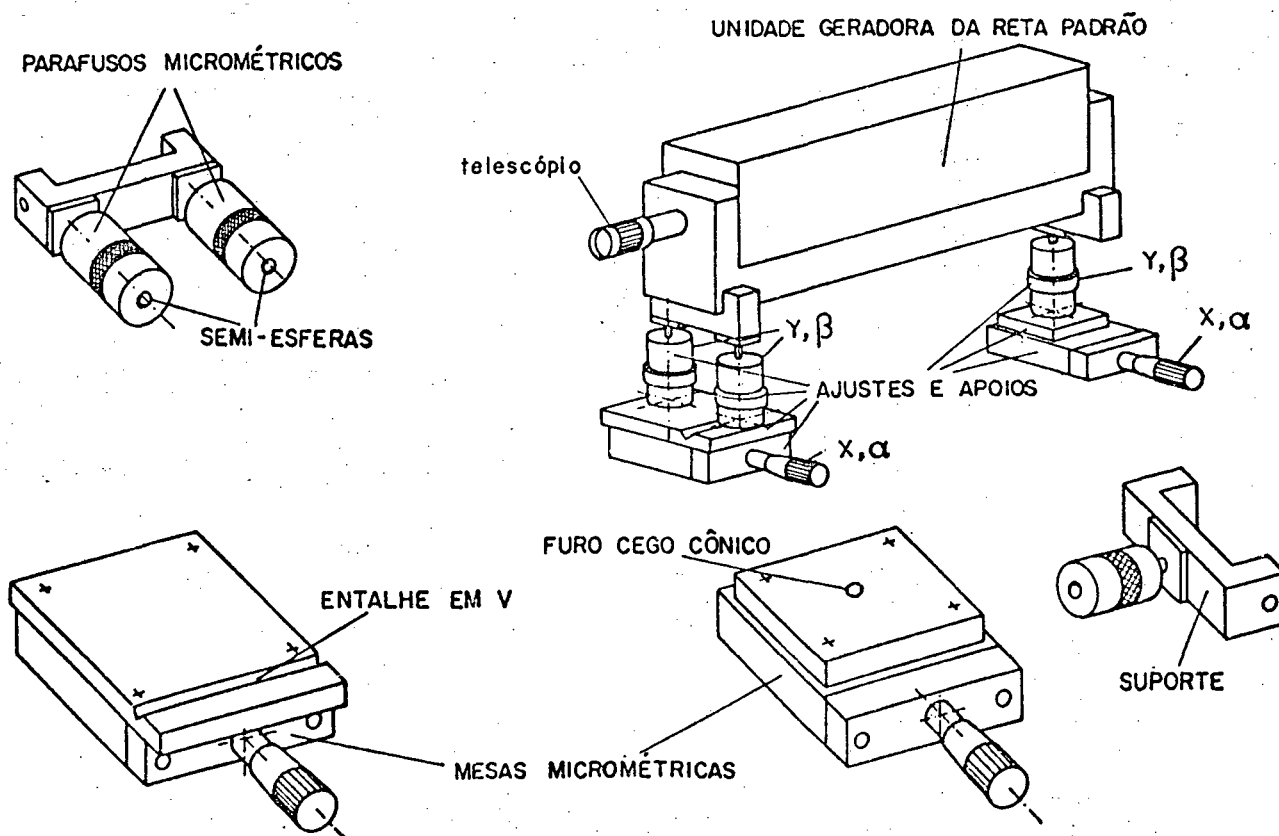


FIG. 5.4 - Dispositivos mecânicos de apoio e alinhamento do suporte do laser.



- apoio isostático que permite deformações diferenciadas do suporte em três graus de liberdade; constituído de três bases com semi-esferas na parte inferior, as quais são apoiadas respectivamente num entalhe em forma de "V", num furo cego cônico e sobre uma superfície plana.
- estabilidade do apoio isostático, ou seja, isento de folgas.
- mecanismos de ajuste fino, nas direções x e y, e em duas variações angulares,  $\alpha$  e  $\beta$ ; tais mecanismos são constituídos de parafusos de elevação nas três bases e duas mesas micrométricas, sobre as quais estão apoiadas as bases.
- fixação estática das mesas micrométricas sobre o banco óptico.

Os medidores de posição do feixe em A e B, constaram de elementos como mostrados na figura 5.5, cada um montado sobre um

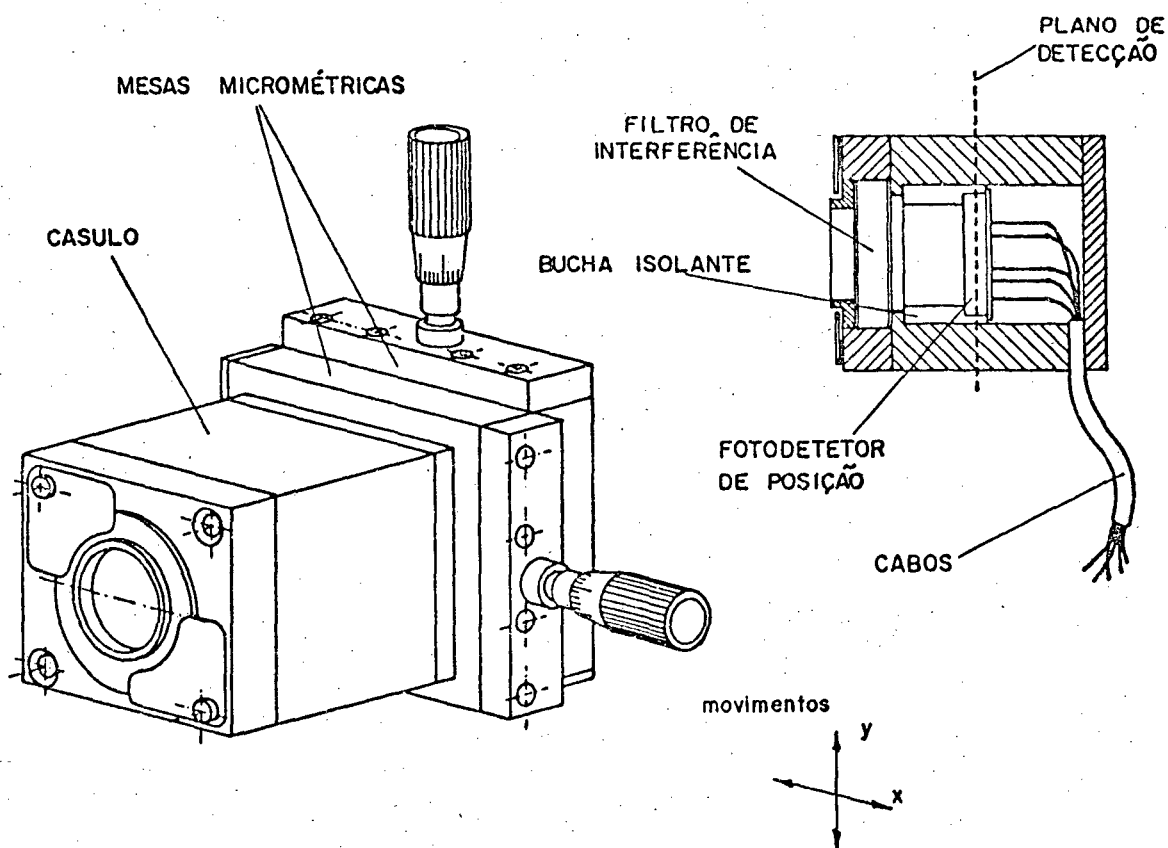


FIG. 5.5 - Dispositivos para montagem e alinhamento do fotodetector.

mecanismo de elevação vertical, fixo ao banco óptico, atendendo aos seguintes aspectos:

- montagem sobre um sistema de duas mesas micrométricas, possibilitando alinhamentos nas direções  $x$  e  $y$ .
- isolamento elétrico dos eletrodos.
- eliminação da luz do meio ambiente, por meio de um filtro de interferência, montado na parte frontal do dispositivo.

### 5.2.3 Componentes Ópticos

Os componentes ópticos que fazem parte do banco de ensaio para medição das instabilidades, são o telescópio e o divisor de feixe, a serem analisados em detalhes, na sequência:

a) Telescópio. As finalidades do telescópio já foram expostas no capítulo 2, no entanto, uma melhor análise quanto ao método de acoplamento ao laser, faz-se necessário, para a análise das instabilidades.

Na figura 5.6 está esquematizada a influência do telescópio na instabilidade, em função das deformações mecânicas do suporte. Quando o suporte do laser sofre uma variação paralela na direção  $y$  por exemplo, causadas pelas dilatações, o telescópio acoplado acompanha esta variação resultando em uma variação paralela de mesmo valor, enquanto o desacoplado, permanecendo fixo, proporcionará uma variação paralela contrária, aumentada do fator  $A$ . Analogamente, uma variação angular do suporte, proporcionará uma variação reduzida pelo fator  $A$  no telescópio desacoplado e de igual valor no acoplado.

Quanto à fixação do telescópio, o acoplado apresenta vantagem com relação ao alinhamento com o feixe, por ser praticamente imediato, enquanto no desacoplado é requerido um cuidado bem maior. Entre essa e outras vantagens, o telescópio acoplado existe pronto para utilização com diversos fatores de aumento, não necessitando de dispositivos específicos para

## TELESCÓPIO ACLOPADO

## TELESCÓPIO DESACLOPADO

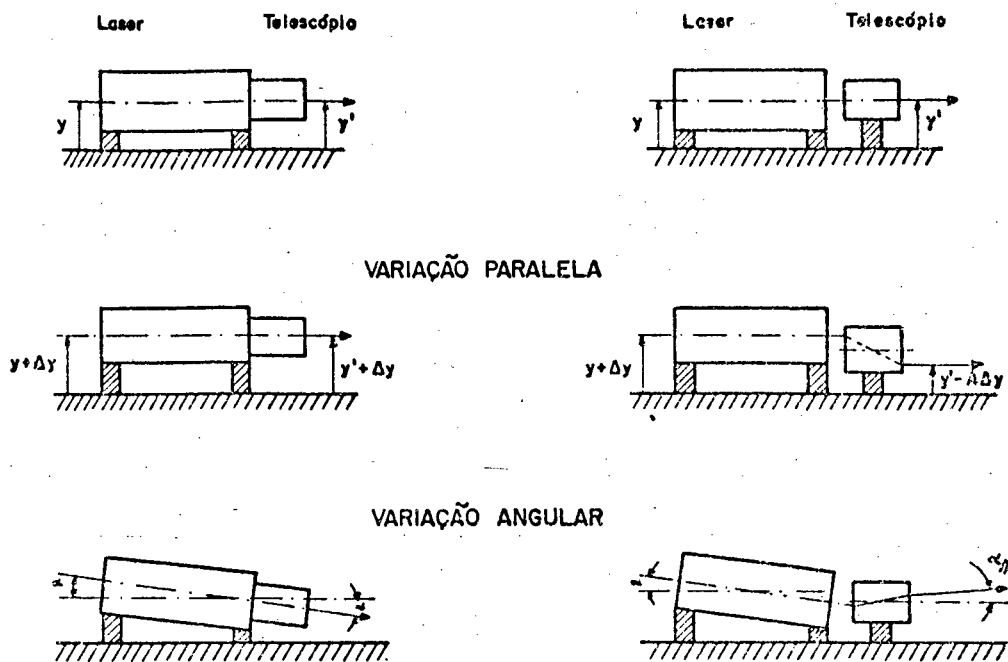


FIG. 5.6 - Uso do telescópio na saída do laser /10/.

montagem, como é o caso do desacoplado.

Utilizou-se portanto para os ensaios um telescópio acoplado com fator de aumento  $A \approx 4$  /30/, com mecanismo ajustável para colimação do feixe, e sem filtro espacial, por não existir o mesmo no telescópio disponível. O fator aumento foi considerado bom, pois um maior diâmetro do feixe causaria erros de linearidade nos fotodetetores, por atingir pontos mais extremos da área ativa dos mesmos.

b) Divisor de feixe. Para dividir o feixe em duas partes, sendo uma transmitida na mesma direção e outra refletida ortogonalmente, existem três dispositivos /14/:

- lâmina de faces paralelas, com uma superfície externa parcialmente refletora. Múltiplas reflexões ocorrem entre as duas faces, causando assim múltiplas imagens sobre o

fotodetector que recebe a luz desviada, que passa a ser uma desvantagem. Deve ser posicionado a  $45^\circ$  em relação ao eixo z.

- película fina, fixada sobre um anel rígido, que proporciona facilidade de manuseio. Apresenta como vantagem em relação à lâmina de faces paralelas, de não causar múltiplas reflexões, por causa da espessura; deve ter também um posicionamento de  $45^\circ$  com relação à direção do feixe incidente.
- cubo de vidro ou cristal, formado por dois prismas idênticos, colados um ao outro pelas bases e tendo sobre uma delas depositada uma fina camada de metal dielétrico, que proporciona a reflexão parcial da luz. Este componente tem vantagens sobre os anteriores, com relação ao fácil manuseio, e não sendo tão sensível a esforços mecânicos.

Quanto ao desvio paralelo ( $e$ ) que o feixe transmitido sofre entre as faces paralelas do cubo, devido à variação  $\theta$ , este é desprezível para variações angulares típicas, como é mostrado a seguir e esquematizado na figura 5.7. O desvio é dado pela

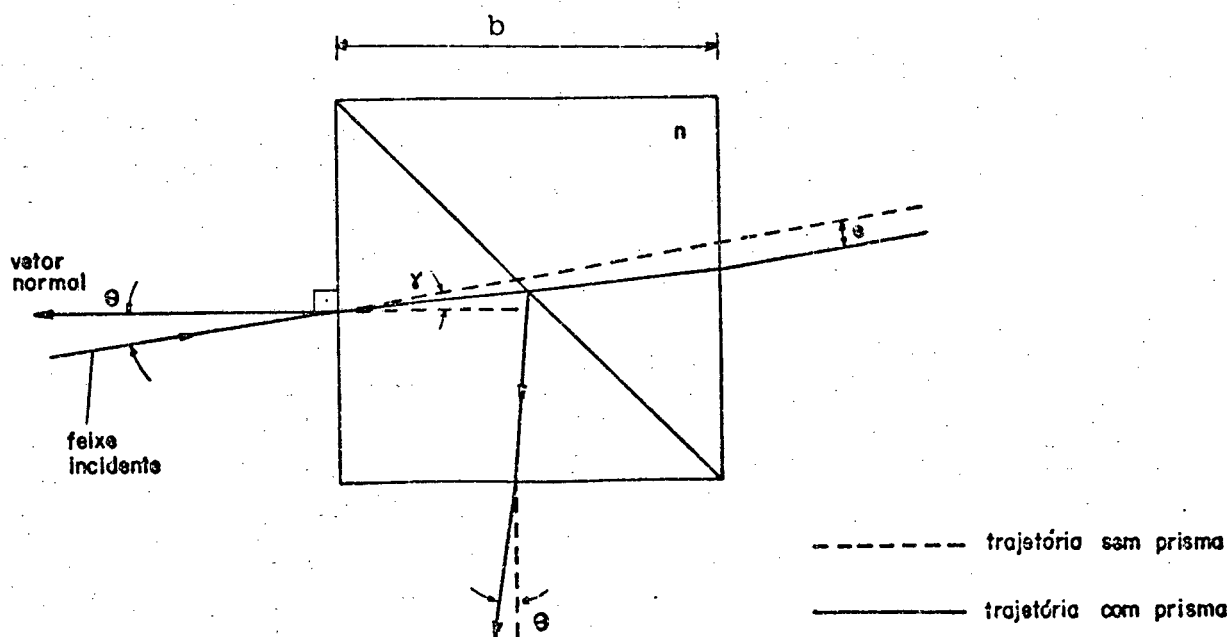


FIG. 5.7 - Desvio paralelo ( $e$ ) do feixe em função de  $\theta$ , quando atravessa o divisor de feixe.

fórmula:

$$e = (b/\cos\gamma).sen(\theta-\gamma) \quad (5.11)$$

onde  $\theta$  e  $\gamma$  são as variações dos ângulos de incidência e refração na primeira face, sendo determinado pela lei de Snell:

$$n_1.sen\theta = n_2.sen\gamma \quad (5.12)$$

Considerando pequenos ângulos, pode-se fazer  $sen\theta = \theta$  e  $cos\gamma = 1$ . Substituindo então  $\gamma$  da equação 5.12 na equação 5.11, com índices de refração respectivamente:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1 \text{ (ar) e } n_2 = n, \text{ obtem-se} \\ e &= b.\theta (1 - 1/n) \end{aligned} \quad (5.13)$$

Para os ensaios de instabilidade, utilizou-se um cubo com índice de refração  $n = 1,515$  e aresta  $b = 5\emptyset$  mm. Considerando uma variação angular ( $\theta$ ) de  $6\emptyset \mu\text{m/m}$ , por exemplo, obtém-se para  $e$  o valor de  $1 \mu\text{m}$ , desprezível portanto com relação aos valores da instabilidade.

#### 5.2.4 Equipamentos Eletrônicos

Para medição da posição do feixe, é utilizada uma série de módulos eletrônicos, conforme esquematizados na figura 5.8 e descritos sucintamente a seguir:

- a) Fotodetetores de posição, sobre os quais incide o feixe de luz, e que geram os sinais elétricos proporcionais à irradiância; serão melhor expostos no item 5.3.2.
- b) Filtros passa-baixa, para eliminar ruídos elétricos de alta frequência.
- c) Termoelementos, de ferro-constantan, aplicados em pontos

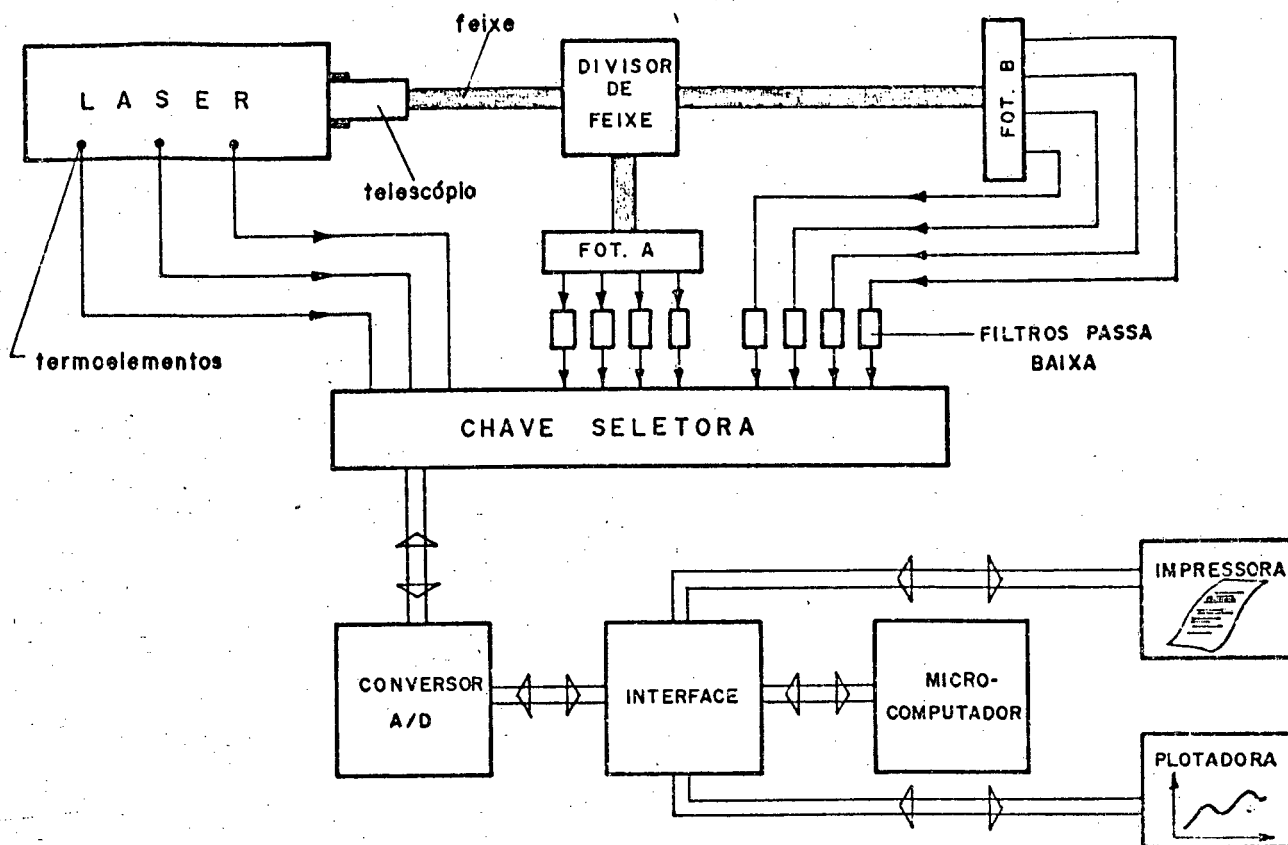


FIG. 5.8 - Módulos básicos para aquisição automática dos sinais e saída dos resultados.

estratégicos sobre o suporte do laser, para medição da variação de temperaturas nesses pontos.

d) Sistema de aquisição de sinais (SAS) /31/, composto de:

- chave seletora, que sob comando do microcomputador seleciona os valores dos quatro sinais elétricos de cada fotodetector, além dos sinais elétricos gerados pelos termoelementos e outros componentes quando necessário.
- conversor A/D (analógico/digital) para leitura dos sinais, com 4,5 dígitos.

e) Interface /32/ para conexão do SAS ao microcomputador e deste à impressora e plotadora.

f) Microcomputador /30/, que tem como função controlar o SAS, na leitura dos sinais elétricos, armazenando os dados na memória

principal, para então serem gravados em fita ou disco magnético, para posterior processamento e emissão dos relatórios.

- g) Impressora /34/, acoplada ao microcomputador, para emissão de tabelas das instabilidades medidas.
- h) Plotadora /35/, também acoplada ao microcomputador, para obtenção dos gráficos das instabilidades.

#### 5.2.5 Processo Automatizado de Medição

A posição instantânea do feixe relativamente a uma posição inicial de referência, é calculada a partir dos 8 valores das tensões geradas nos fotodetetores e de suas respectivas constantes de calibração.

No entanto, os valores das tensões não são constantes, devido aos ruídos elétricos e da instabilidade do feixe. Tomando-se apenas um valor de tensão de cada eletrodo, a posição calculada estaria afetada por um erro, função das oscilações mencionadas, o qual pode ser minimizado tomando-se a média de várias leituras seguidas. O ideal seria uma medição instantânea e simultânea nos 8 eletrodos e obter a posição média do feixe, a partir de vários valores de tensão de cada eletrodo. É evidente que leituras não instrumentadas, diretamente do indicador do voltímetro, na velocidade necessária, são impraticáveis por um operador. Pode-se no entanto realizar as leituras num intervalo de tempo relativamente pequeno, recorrendo-se a um processo automatizado de medição, tanto para leitura dos sinais elétricos, como para os cálculos e saída dos dados, referentes à posição do feixe, num instante considerado.

Além dos sinais oriundos dos fotodetetores, os sinais gerados pelos termoelementos, devem ser lidos pelo método automatizado, para poder correlacionar a instabilidade determinada com a variação das temperaturas.

Foram desenvolvidos programas de computador, para execução dos ensaios de instabilidade, com auxílio de um microcomputador, cabendo destacar as principais características de cada módulo:

- a) Aquisição de dados. Neste módulo, aplicado na fase do ensaio propriamente dito, realiza-se a leitura das tensões nos eletrodos dos fotodetetores, via SAS. No programa foram considerados como parâmetros de entrada, a serem estabelecidos pelo usuário, o número de leituras por eletrodo, sequência de leitura dos sinais, total de medições e, leitura dos sinais gerados pelos termoelementos. As leituras são posteriormente armazenados na memória principal do microcomputador e ao final da aquisição, gravadas em fita ou disco magnético, para posterior processamento.
- b) Processamento. A análise dos valores das tensões de cada eletrodo, é realizada antes da gravação, enquanto os cálculos das variações paralela e angular do feixe, aplicando as constantes de calibração, são realizados posteriormente, na fase de documentação das instabilidades.
- c) Documentação. A saída dos resultados referentes à instabilidade, foi feita de duas maneiras:
  - em forma de gráfico, com auxílio da plotadora, traçando-se o gráfico da variação paralela e angular separadamente, mas incluindo em cada um deles quando requerido, a variação da temperatura nos pontos estratégicos anteriormente definidos, para correlacionamento de causa e efeito.
  - em forma de tabela, confeccionada com auxílio da impressora, registrando a posição do feixe em cada instante medido. No entanto, a visualização das instabilidades através dos gráficos, torna-se mais prática, optando-se assim mais pela primeira alternativa.



### 5.3 FOTODETETORES

Fotodetetores, são dispositivos da optoeletrônica, utilizados para detectar a luz e gerar um sinal eletrônico /36/.

Para uma melhor compreensão dos fotodetetores utilizados na parte experimental do presente trabalho, faz-se necessário uma breve análise dos mesmos. De um modo geral, os fotodetetores, são classificados em /37/:

- a) Células fotoelétricas (a gás ou a vácuo). Se baseiam na emissão de elétrons quando sobre um determinado material incide um feixe luminoso (efeito fotoelétrico-Einstein).
- b) Células fotovoltaicas. Produzem uma tensão elétrica quando submetidas à ação de um fluxo luminoso, podendo ser consideradas portanto, como fonte de tensão. São construídas de material semicondutor e não necessitam de tensão externa (fonte externa) para seu funcionamento. As principais aplicações são: nos fotômetros em instrumentos fotográficos; na geração do som em projeções cinematográficas e nas chamadas baterias solares.
- c) Células fotocondutivas. Quando uma radiação luminosa incide sobre um semicondutor, a energia dos fótons ioniza as ligações covalentes, gerando pares elétron-lacuna em excesso aos pares já existentes termicamente pela junção dos materiais p e n /38/. O aumento de portadores de corrente diminui a resistência elétrica do material, aumentando a condutividade, e por isso o efeito é denominado de fotocondutivo e o elemento físico de fotocondutor. As células fotocondutivas por sua vez, podem ser do tipo:
  - Fototransistor. Constituído basicamente de duas junções, havendo uma janela que permite a incidência da luz sobre a junção base-emissor, aumentando a condutividade deste diodo base-emissor, com o conseqüente aumento da corrente de coletor.

- Fotorresistor. Constituído simplesmente pelo material semiconductor. Quando a junção do semiconductor é iluminada, sua condutividade aumenta. Quando neste elemento se impõe uma conexão em ambos os lados do material p-n, irá fluir uma corrente enquanto durar a incidência da luz. Esse efeito é denominado também de "fotovoltaico", pois nenhuma tensão elétrica externa é aplicada, e a célula gera uma força eletromotriz. Os materiais mais utilizados para a construção dos fotorresistores são o sulfeto de cádmio e o sulfeto de chumbo.
- Fotodiodos. Aplicando uma diferença de potencial de polaridade inversa à junção p-n, flue nesta uma corrente proporcional à potência luminosa incidente na junção. A corrente gerada é composta de uma fotocorrente e de uma corrente de fuga ou reversa (que existe no escuro). A corrente de fuga permanecerá constante, sob condições de temperatura e diferença de potencial constantes, e a fotocorrente será diretamente proporcional à intensidade da luz incidente /39/. Este fotodetector é denominado de fotodiodo e considerado uma fonte de corrente. O material mais utilizado, é o silício (Si).

### 5.3.1 Fotodiodos

Para a parte experimental deste trabalho, foram utilizados os fotodiodos, merecendo portanto uma melhor análise, que será feita a seguir.

Visando elevar as características de resposta em amplitude e/ou frequência do fotodiodo, foram desenvolvidas técnicas especiais, como os diodos PIN, largamente utilizados em aplicações de sistemas de medição /40/, e entre eles, os do presente trabalho.

A estrutura básica de um fotodiodo é mostrada na figura 5.9a, onde uma pequena camada de material semiconductor do tipo p

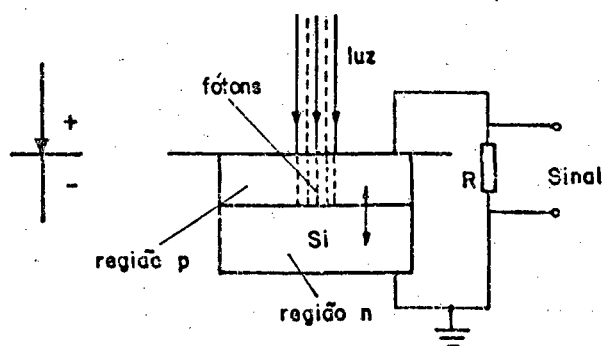
é depositada sobre uma camada de material semiconductor do tipo n, e na figura 5.9b, o diagrama de energia de um semiconductor dopado com impurezas doadoras e aceitadoras, tendo assim ambos os níveis de energia, aceitador e doador. Se fótons com suficiente energia incidem nesse semiconductor, ocorre a fotogeração, e as seguintes transições são possíveis (figura 5.9b):

- excitação intrínseca, que consiste na excitação de um par elétron-lacuna;
- excitação extrínseca, que consiste na excitação de um elétron doador dentro da banda de condução ou a passagem de um elétron de valência para o estado aceitador.

Como a densidade de estados nas bandas de condução e de valência ultrapassa fortemente a densidade de impurezas, a fotocondutividade é devida principalmente à excitação intrínseca.

A energia mínima de um fóton, necessária para a excitação intrínseca (criação de um par elétron-lacuna), é a energia de banda proibida ( $E_g$ ) e tem um comprimento de onda crítico ou

a) ESTRUTURA DO FOTODIODO



b) DIAGRAMA DE ENERGIA DE UM SEMICONDUTOR

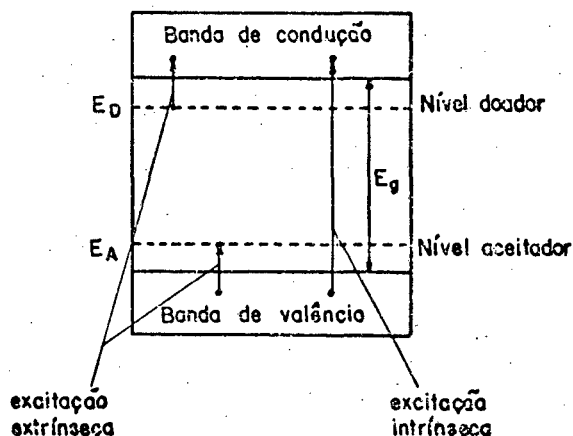


FIG. 5.9 - Estrutura básica de um fotodiodo, e fotoexcitação em semicondutores /36, 38/.

linear ( $\lambda_c$ ) correspondente, acima do qual não podem ser gerados os portadores de cargas. Para o silício (Si), tem-se os valores:

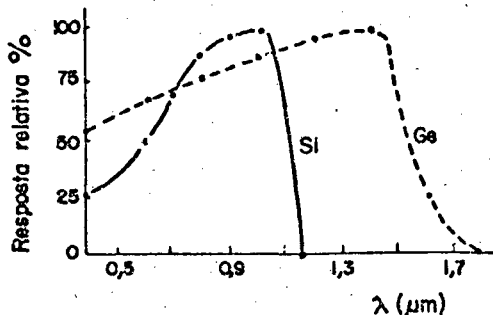
$$E_g = 0,17 \text{ eV} ; \lambda_c = 1,13 \mu\text{m}; \text{ e para o germânio (Ge):}$$

$$E_g = 0,11 \text{ eV} ; \lambda_c = 1,72 \mu\text{m}, \text{ à temperatura ambiente /38/.$$

Na figura 5.10a mostra-se as curvas de sensibilidade espectral para o silício e para o germânio, concluindo-se que o fotodiodo é um dispositivo seletivo de frequência; na figura 5.10b, observa-se que no caso do silício, ele se torna transparente para comprimentos de onda acima de  $\lambda_c = 1,13 \mu\text{m}$ . O rendimento fotoelétrico ou resposta espectral depende portanto da frequência da radiação incidente.

Os fotodiodos no entanto, podem ser otimizados para operarem em dois modos distintos:

a) RESPOSTA ESPECTRAL



b) PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO

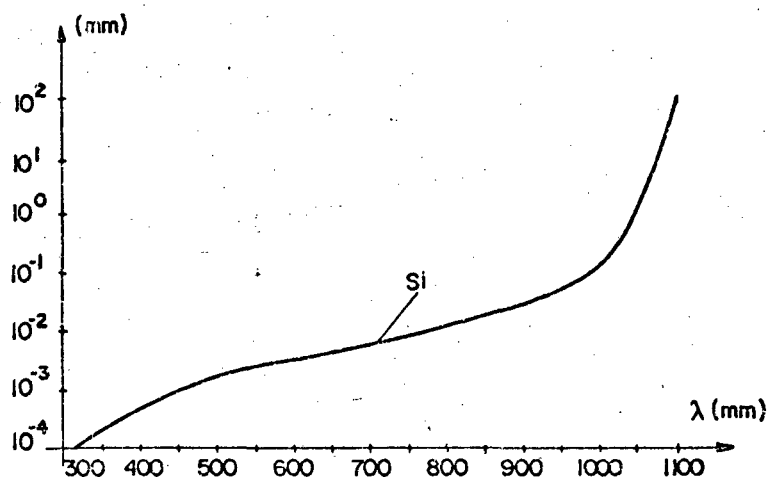


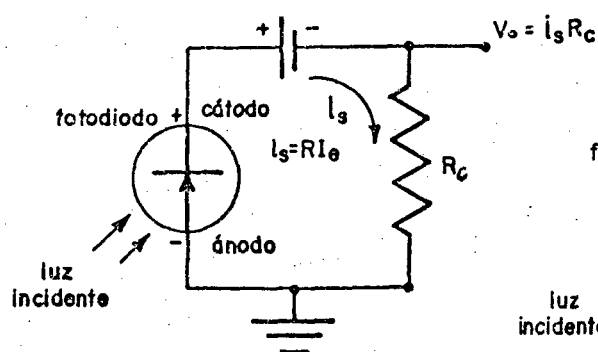
FIG. 5.10 - Características fotoópticas do silício (Si) e do germânio (Ge) /38, 45/.

- no modo fotocondutivo (figura 5.11a), com polarização inversa, gerando uma corrente elétrica;
- no modo fotovoltáico (figura 5.11b), tendo um amplificador operacional e na saída conectado um resistor, gerando assim uma tensão como sinal de medição.

Como vantagens ou desvantagens, podem ser citados:

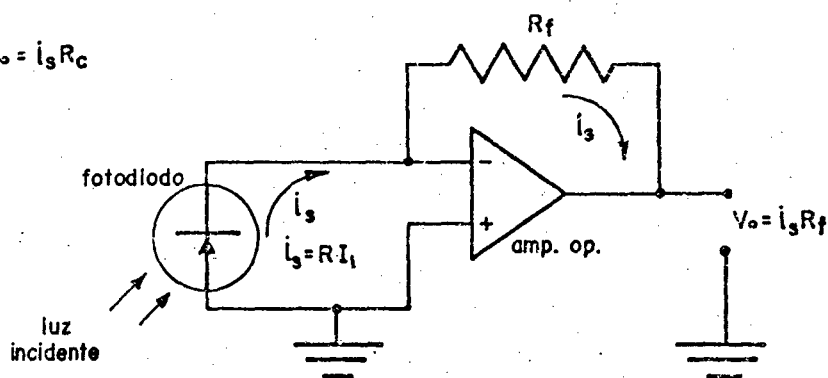
- o modo fotocondutivo apresenta alta sensibilidade a comprimentos de onda maiores, tem uma resposta de frequência estendida devido à capacidade de junção e uma fotocorrente linear com a irradiância;
- no modo de operação fotovoltáico, resulta um pequeno ruído gerado no fotodiodo, e apresenta menor sensibilidade e resposta de frequência que o fotocondutivo, e uma tensão de saída que é linear com uma resistência de carga menor que  $800\Omega$  e torna-se quase logarítmica para resistência de carga acima

a) MODO FOTOCONDUTIVO



$R$  = responsividade do fotodiodo (A/W)  
 $I_i$  = luz incidente (W)  
 $i_s$  = corrente de sinal

b) MODO FOTOVOLTAICO



$R_c$  = resistência de carga  
 $R_f$  = resistência de fundo  
 $V_o$  = sinal de saída

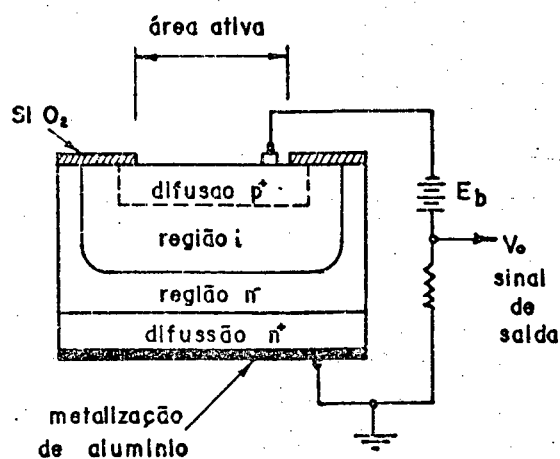
FIG. 5.11 - Circuito eletrônico básico do fotodiodo /26/.

de  $10 \text{ k}\Omega$ , considerando uma irradiância constante /39/.

Quanto às características construtivas dos fotodiodos, pode-se fazer a seguinte distribuição:

- Fotodiodo PIN. Conforme sugere a sigla, um fotodiodo PIN é constituído de uma camada de material intrínseco (i) (alta resistividade), contido entre duas camadas fortemente dopadas (baixa resistividade), dos tipos "p" e "n". A resistividade da região "i" pode variar entre  $0,1$  a  $1.000 \text{ ohm.metro}$  enquanto a resistividade das regiões "p" e "n" é normalmente menor que  $0,01 \text{ ohm.metro}$ . A saída nos dois terminais, é uma corrente que é proporcional à potência da luz incidente (figura 5.12.a).
- Fotodiodo Schottky. Este fotodiodo, diferente do de junção p-n, é constituído por uma camada "n", sobre a qual é depositada uma camada metálica, originando-se na interface entre as duas camadas, uma barreira de potencial; esta barreira bloqueia o escoamento de elétrons até que seja aplicada uma tensão direta adequada, geralmente bem menor que a necessária para levar à

a) FOTODIODO PIN



b) FOTODIODO SCHOTTKY

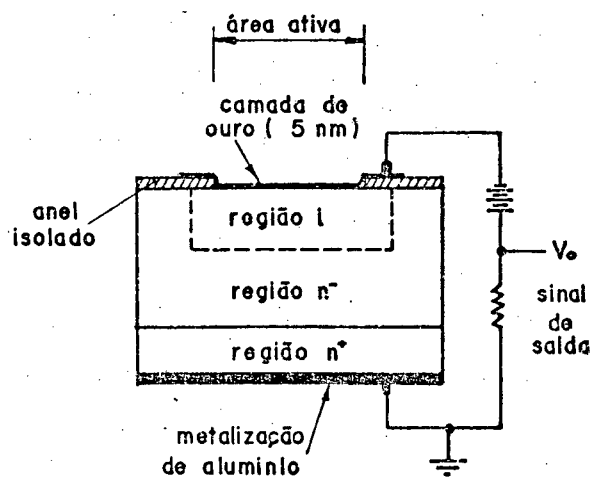


FIG. 5.12 - Estrutura dos fotodiodos PIN e SCHOTTKY /26/.

condução os diodos de junção /37/. São recomendados quando são necessários: uma alta resposta para o azul ( $\lambda$  menor que  $500\text{ nm}$ ), tempo de resposta rápido (menor que  $25\text{ ns}$ ) ou grandes áreas (maior que  $100\text{ mm}^2$ ). Não são recomendados para altas temperaturas (acima de  $50^\circ\text{C}$ ) e operações com alta irradiância (maior que  $0,1\text{ mW/mm}^2$ ) (figura 5.12.b)

Dependendo das finalidades, os fotodiodos são basicamente divididos em:

- Fotodiodos de um elemento: normalmente de pequena área ativa, utilizado para medição da variação de intensidade luminosa (figura 5.13.a).
- Fotodiodos com múltiplos elementos: dispostos em forma de matriz (uni ou bidimensional), utilizado para medição de

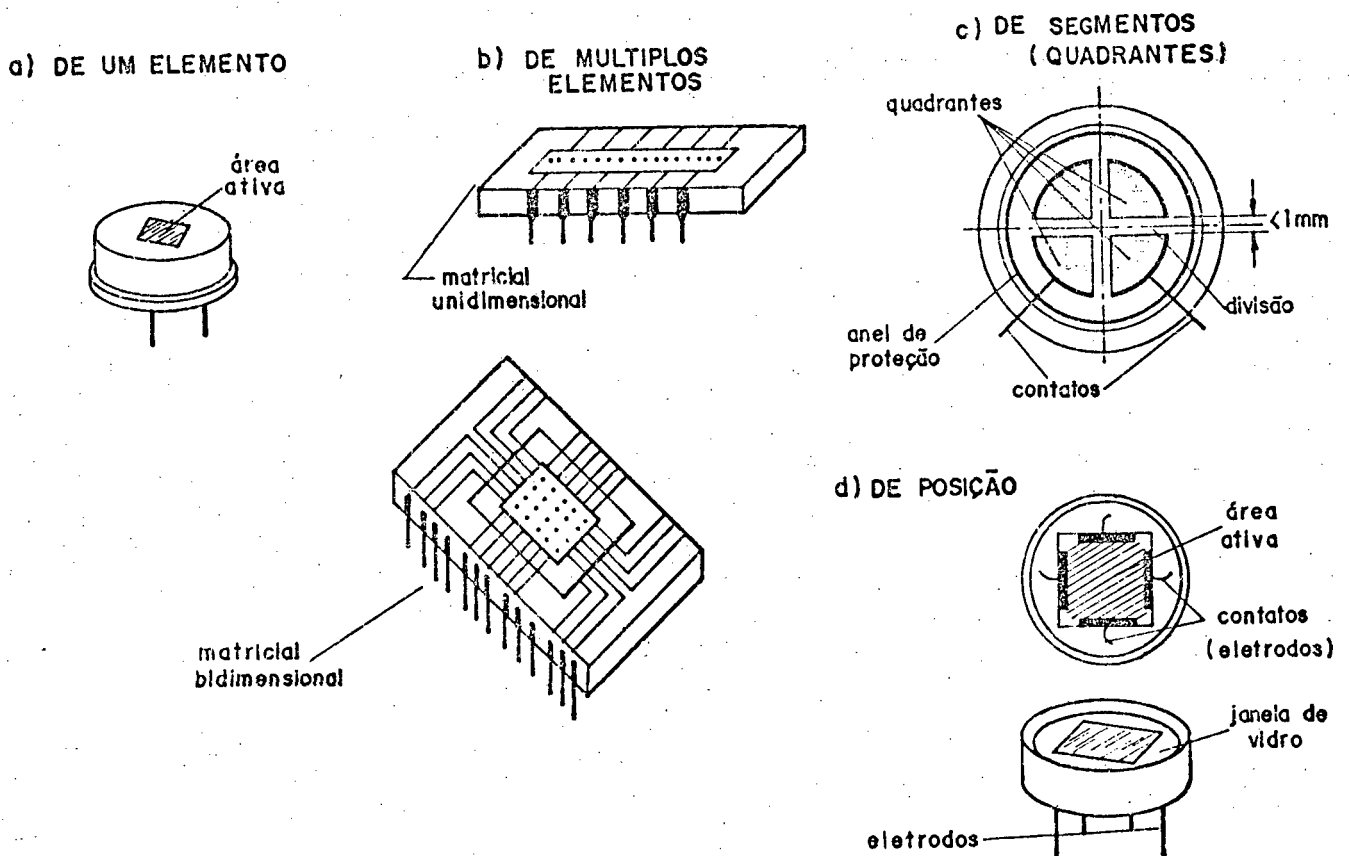


FIG. 5.13 - Representação de alguns tipos de fotodiodos.

dimensões ou áreas, sendo o sinal elétrico gerado pelas muitas células (elementos da matriz), respectivamente iluminadas. Os de linha, chegam a possuir até 2048 elementos espaçados de 15 ou 25 $\mu$ m e os bidimensionais, até 256x256 elementos (figura 5.13.b) /10 e 16/.

- Fotodiodos de segmentos: formados por exemplo, por 4 quadrantes de um círculo (figura 5.13.c), e separados por uma certa distância, onde cada quadrante possui um contato metálico, pelo qual flui a fotocorrente. É empregado para medição de posição de um feixe, sendo a linearidade e sensibilidade dos sinais elétricos função do perfil energético do feixe. Em função disto, esse fotodiodo é mais recomendado quando operado pelo método da compensação, buscando-se a igualdade dos sinais gerados, situação alcançada quando o feixe incide no centro do fotodiodo, e de aplicação interessante nos ajustes de alinhamento.
- Fotodiodo de posição (figura 5.13.d), que foi utilizado nos ensaios de instabilidade, e por isso será melhor analisado no item seguinte.

### 5.3.2 Fotodiodos de Posição

Os fotodiodos de posição, são construídos com uma técnica de difusão plana, ou seja, uma camada de material "p" é difundida sobre uma região de alta resistividade, como mostrado na figura 5.14.a. Paralelamente aos quatro bordos da área ativa, existem quatro faixas de material "n+" (fortemente dopado) difundidas sobre a camada "p", e sobre essas estão os quatro eletrodos, pelos quais serão coletados os sinais elétricos (figura 5.14.a). Devido à energia dos fótons da luz incidente, surgirá uma fotocorrente nas camadas dos materiais semicondutores, que será proporcional à potência do feixe e, devido à região de alta resistividade, a intensidade da fotocorrente será maior nos eletrodos mais próximos à posição de incidência da luz, como já



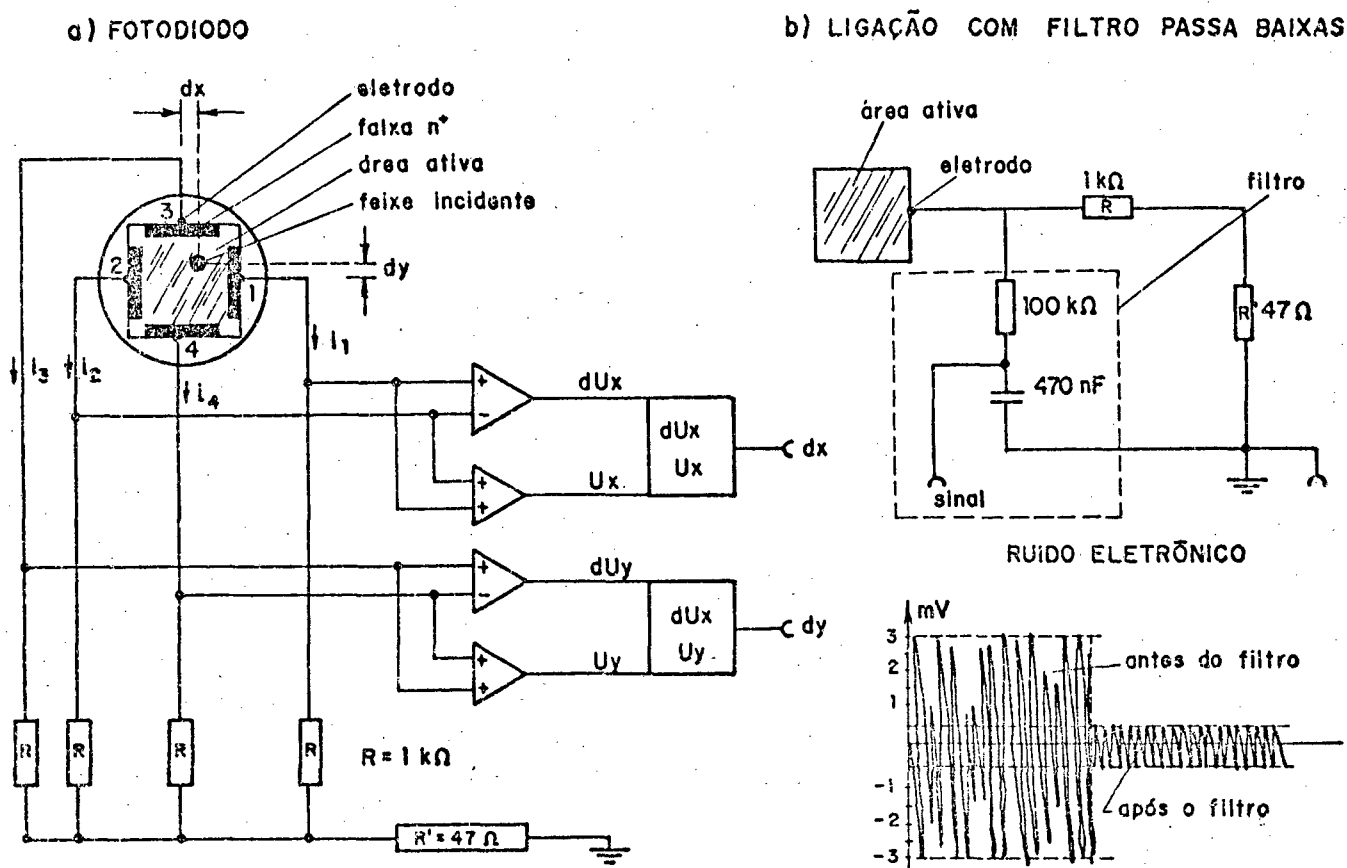


FIG 5.14 - Fotodiodo de posição e ligação de cada eletrodo com filtro passa baixas.

foi descrito pela figura 1.2. Portanto, uma variação da posição de incidência do feixe sobre o fotodiodo, fará com que os sinais elétricos nos eletrodos variem com esse deslocamento. Utilizando-se então a constante de calibração do fotodiodo e as variações desses sinais (tensões), calcula-se o deslocamento ( $dx$  e  $dy$ ) ocorrido do feixe incidente.

Utilizou-se no trabalho experimental, fotodiodos "PIN" de posição /26/, operando no modo fotovoltáico, e com uma área ativa quadrada de  $100 \text{ mm}^2$ . Esses fotodiodos (PIN) têm vantagem sobre os do tipo "Schottky", por apresentarem melhor resposta espectral na faixa do vermelho e operarem com uma densidade de potência de até  $0,5 \text{ mW/mm}^2$ . Com relação aos fotodiodos de quadrante, a maior vantagem dos de posição é que o sinal  $x$  e  $y$  independe do perfil energético do feixe.

No entanto, para que os resultados das medições sejam relativamente confiáveis, algumas características dos fotodiodos que podem induzir a erros, devem ser analisados:

- Ruído: característica de todo componente eletrônico, são as frequências de interferência causadas pelo próprio dispositivo, ou induzidas pelas condições ambientais e limitam a resolução das medidas. Para verificar tais ruídos conectou-se um dos eletrodos do fotodiodo (sem ser iluminado), à entrada de um osciloscópio e observou-se um ruído com amplitude de pico de 6mV e frequência de até 20 MHz.

Com o uso de um filtro passa baixas, que "corta" as amplitudes dos ruídos acima de uma determinada frequência, pode-se minimizar a influência de tais ruídos. Na figura 5.14.b, está esquematizado o filtro utilizado, bem como o esquema de ligação com um resistor de carga, para cada eletrodo do fotodiodo. Verificou-se assim uma amplitude residual de  $\pm 0,5\text{mV}$ .

- Saturação: visto que os fotodiodos "PIN" devem operar com uma densidade de potência não superior a  $0,5 \text{ mW/mm}^2$ , e os lasers utilizados apresentarem potência de 5mW, com feixe de diâmetro em torno de  $1 \text{ mm}^2$  na saída, ocorreria uma saturação no fotodiodo que prejudicaria o valor correto do sinal de saída, se utilizados sem uma atenuação. Utilizou-se então em telescópio (um dos motivos do uso do mesmo) ampliando o feixe em 4 vezes, considerado o suficiente, e além disso, o feixe é dividido em duas partes, não ocorrendo portanto a saturação nessas condições.

Outra alternativa para atenuar a densidade de potência, seria o uso de um polarizador, uma vez que o feixe era polarizado. No entanto, os ensaios para verificação do perfil energético mostraram que o polarizador altera sensivelmente o perfil, podendo assim introduzir a valores de instabilidade do feixe que não correspondem ao comportamento sem polarizador, e assim tal alternativa foi desconsiderada.

- Linearidade: o fotodiodo apresenta uma resposta linear em função da variação da intensidade da luz, na região próxima do centro da área ativa. No entanto, com o distanciamento do centro, a resposta deixa de ser linear, e próximo às bordas da área ativa, ocorrem elevados erros de linearidade. É conveniente então que o diâmetro do feixe não seja demasiadamente ampliado (maior que 5 mm), e a faixa de operação ser próxima ao centro.
- Luz externa: como esse fotodiodo é sensível a um largo espectro da luz visível, o iluminamento do ambiente, principalmente quando ocorre uma variação do mesmo, pode causar erros nos ensaios. É aconselhável utilizar um filtro de interferência, que permite a passagem de luz numa banda em torno do vermelho ( $\lambda = 0,633 \mu\text{m}$ ), na entrada do fotodiodo, ou, como foi na maioria dos ensaios, a operação de medição deu-se em ambiente totalmente escuro.

### 5.3.3 Ajuste e Calibração

Para se obter os valores das variações de posição do feixe incidente no fotodiodo, utilizando-se a razão entre a diferença e a soma dos sinais elétricos gerados nos eletrodos, numa direção, é necessário ter-se um fator constante (K) do fotodiodo, que caracteriza sua sensibilidade (variação do sinal de saída em função do sinal de entrada). Esse fator de calibração é obtido experimentalmente, impondo-se deslocamentos conhecidos ao fotodiodo e tomando-se os valores das variações das tensões assim ocorridas.

O ensaio de calibração foi realizado nas condições mais favoráveis possíveis, minimizando a influência da instabilidade

do laser e do sistema de medição. Baseado nos estudos prévios de causas de instabilidade, proporcionou-se um ambiente climatizado, sem interferência de luz ambiente e com o laser termicamente estabilizado. O diâmetro do feixe foi ampliado em  $2\phi$  vezes por meio de um telescópio desacoplado, e por meio de um diafragma produziu-se um feixe de diâmetro reduzido, à entrada do fotodiodo (figura 5.15). Assim, a variação angular foi reduzida pelo fator  $2\phi$  e a paralela aumentada pelo mesmo fator. Esse aumento na variação paralela no entanto não afeta a estabilidade após o diafragma, visto o grande diâmetro do feixe antes do diafragma.

Para a calibração, /4/ procedeu-se então da seguinte maneira:

Com o fotodetector montado sobre duas mesas micrométricas cruzadas e posicionado de modo que os eletrodos do eixo x estivessem paralelos ao plano de referência, e o feixe incidindo no centro do mesmo, proporcionou-se deslocamentos pré-fixados na direção x, por meio do parafuso micrométrico, e medidos através de um transdutor deslocamento eletrônico com indicação digital e resolução de  $0,1\mu\text{m}$  /28/. Os sinais elétricos foram

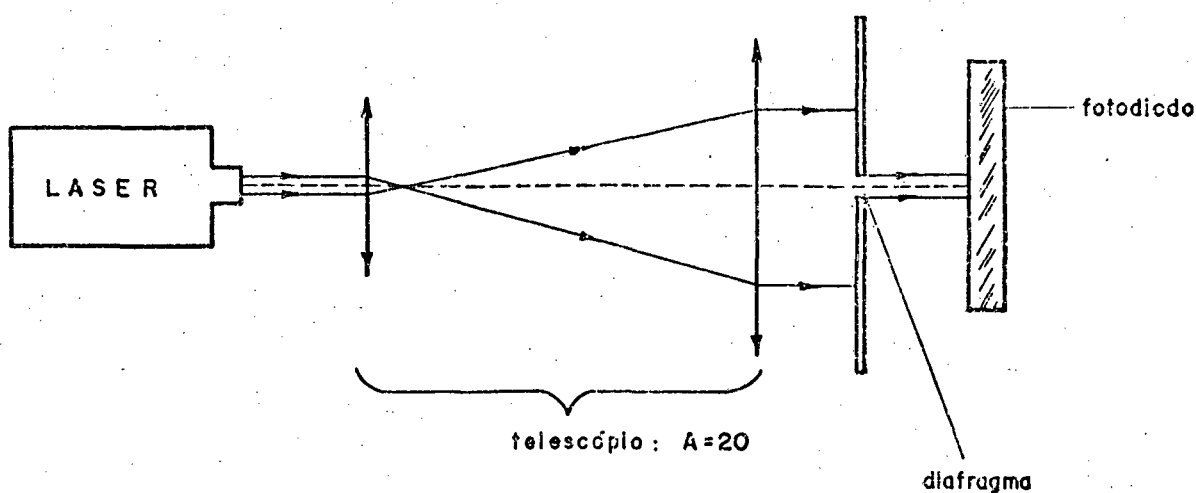


FIG. 5.15 - Telescópio e diafragma, utilizado para calibração do fotodiodo.

medidos pelo processo de aquisição automatizada e os valores dos deslocamentos impostos, foram informados via teclado do microcomputador. A constante  $K$  foi então determinada pela equação:

$$K = DX/DU \quad (5.14)$$

Onde  $X$  é o deslocamento fornecido e  $U$  a razão entre a diferença e a soma dos sinais, na direção  $x$ .

Realizando uma só medida no entanto, não se obtém um valor muito confiável, razão pela qual foram escolhidos diversos pontos numa determinada faixa, e realizados também diversos ciclos de medição, para esses pontos pré estabelecidos. Considerando ainda os ruídos, tanto do fotodiodo como do SAS, que induzem a erros na medida, e a velocidade de leitura oferecida pelo SAS (200/s), foram realizadas várias leituras sequenciais nos eletrodos (e no caso 10 leituras apresentou menor dispersão da medida), e feita então a média da tensão por eletrodo.

Visando uma otimização na calibração, adotou-se também a seguinte estratégia:

Considerando uma eventual variação da posição do feixe, foi utilizado um fotodiodo de referência, fixo, posicionado à mesma distância do primeiro, sobre o qual foram registradas as instabilidades do feixe e então subtraídos os valores do fotodiodo em calibração.

Foi determinada então a função transferência /41/ e a constante  $K$ , bem como obtidas as devidas curvas de calibração, com auxílio da plotadora. Esses cálculos, bem como o método de medição, foram realizados por meio do sistema automatizado.

Para uma segunda alternativa de otimização da calibração, supôs-se que o deslocamento do fotodiodo não ocorresse na direção  $x$ , mas no plano  $xy$ , devido a um alinhamento não perfeito. Foram realizadas então leituras dos sinais em ambas as direções e realizados os cálculos correspondentes. Resultados dessa

alternativa não se apresentaram diferentes, sendo portanto desconsiderada.

Fez-se também uma calibração análoga na direção y, obtendo-se resultados idênticos aos da direção x.

Outros fotodiodos do mesmo tipo, apresentarem valores pouco diferentes para a constante K, razão pela qual calibrrou-se cada fotodiodo individualmente.

Os resultados de uma calibração estão sendo mostrados nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18. Foram tomados 9 pontos de medição, distanciados de  $50 \mu\text{m}$ , em relação ao centro do fotodiodo na direção x, e realizando-se 6 ciclos de medidas. Na figura 5.16 está a tabela desses resultados, com os valores dos erros médios para cada ponto, aparecendo também a função transferência e a constante de calibração. Na figura 5.17 está o gráfico com a

#### CALIBRAÇÃO DO FOTODETETOR A -- Eixo x

##### \*RESULTADOS\*

PONTO	U[V/V]	VI[ $\mu\text{m}$ ]	VR[ $\mu\text{m}$ ]	EA[ $\mu\text{m}$ ]	E%(VI)	dp	Im
1	-0.04127	-200.0	-200.1	-0.11	0.05	0.18	0.47
2	-0.03076	-150.0	-149.7	0.31	-0.21	0.21	0.54
3	-0.02044	-100.0	-100.1	-0.14	0.14	0.29	0.75
4	-0.01001	-50.0	-50.1	-0.10	0.20	0.35	0.91
5	0.00039	0.0	-0.2	-0.21	0.00	0.17	0.44
6	0.01090	50.0	50.2	0.23	0.46	0.18	0.48
7	0.02127	100.0	100.0	-0.01	-0.01	0.27	0.71
8	0.03175	150.0	150.2	0.24	0.16	0.19	0.49
9	0.04208	200.0	199.8	-0.20	-0.10	0.22	0.56

Numero de Ciclos: 6

Fator t de prob.: 2.6

Função Transferência:  $Y = 0.00021 * X + 0.00044$

Constante de Calibração: 4798.2

FIG 5.16 - Tabela dos resultados de uma calibração.

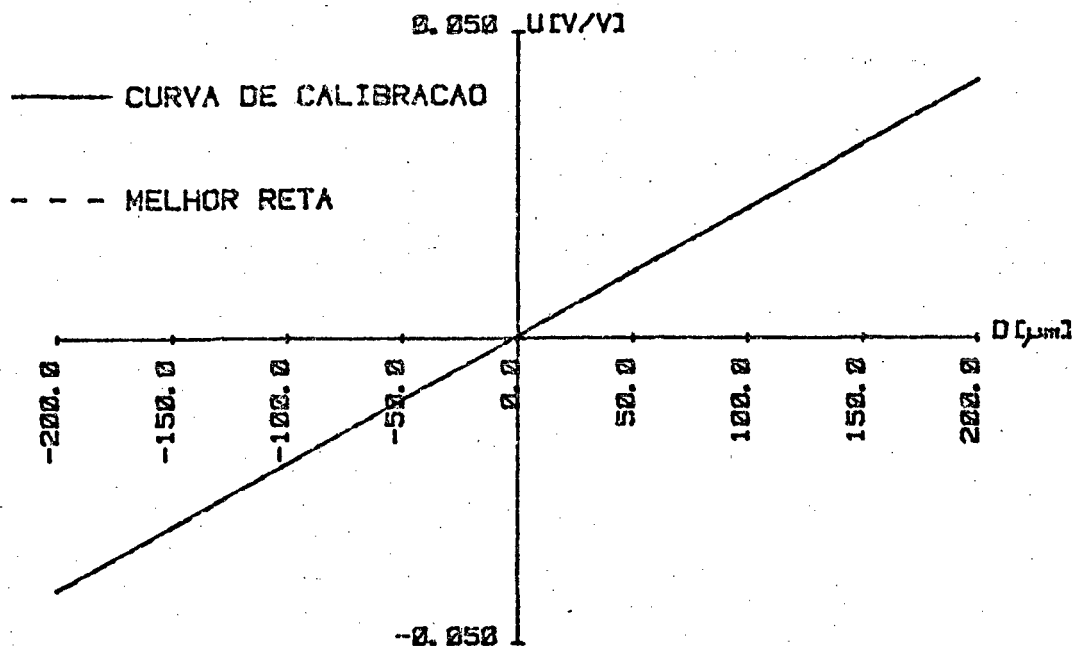


FIG. 5.17 - Gráfico da calibração.

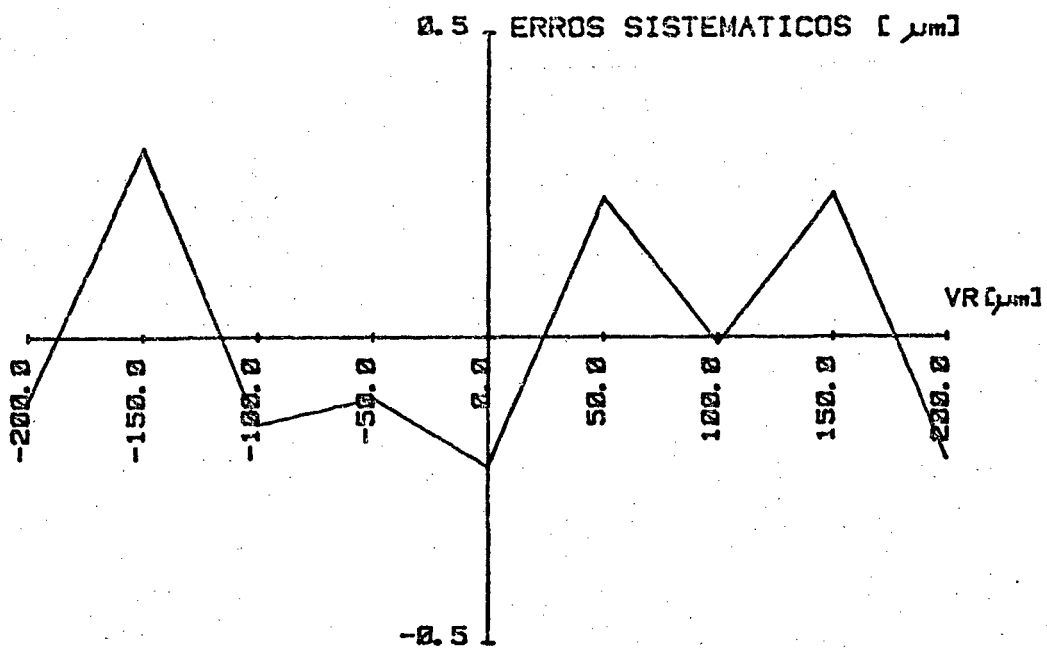


FIG. 5.18 - Curva de erros referentes à calibração.

curva dos pontos e a melhor reta, traçada pelo método dos mínimos quadrados (M.M.Q) e na figura 5.18, o gráfico dos erros sistemáticos ocorridos em cada ponto.

Quanto à resolução do sistema de medição constatou-se que uma diferença de 1,5 mV entre os sinais dos eletrodos corresponde a uma variação da posição do feixe de  $1\mu\text{m}$ , para a densidade da luz normalmente utilizada (com laser de 5 mW e fator de ampliação do feixe igual a 4). Visto no entanto que o ruído do fotodiodo ser de amplitude igual a 1 mV e considerando ainda os ruídos do SAS, pode-se estimar que a resolução do sistema é de  $1\mu\text{m}$ .

#### 5.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios por meio do processo automatizado, os parâmetros associados a cada caso específico, devem ser fornecidos ao microcomputador via teclado, e são basicamente os seguintes: distância dos fotodiodos ao laser (em mm), fator de aumento do telescópio, número de medições e intervalos de tempo entre as mesmas, número de leituras (n) por eletrodo e sequência de leitura, e o número de termoelementos.

Objetivando no entanto uma otimização nos resultados, algumas alternativas referente ao modo de leitura, são possíveis:

- a) realizar n leituras em cada eletrodo de um fotodiodo, e depois do outro;
- b) realizar n leituras por eletrodo, numa direção (x), em ambos os fotodiodos e depois na outra direção (y);
- c) realizar uma leitura por eletrodo numa direção em ambos os fotodiodos e depois na outra direção, repetindo-se assim o ciclo n vezes.

Colocando-se em prática essas três alternativas, observou-se que a última, apesar do tempo da medição ser um pouco superior às anteriores, apresentou resultados com menor dispersão da medida,



e com um número de 8 a 12 ciclos, essa dispersão foi mínima. Para 10 ciclos de leitura, o tempo de medição foi em torno de 1 s, considerado bom para os ensaios, optando-se por esse número de leituras.

Com relação ao tempo total do ensaio e número de medições, esses dependiam do objetivo do ensaio.

Na figura 5.19 como exemplo, estão representados os gráficos da variação paralela e angular respectivamente, de um ensaio típico de instabilidade, feito com um laser após a fase de estabilização das temperaturas e em condições ambientais normais, ou seja, sem cuidados especiais. Foram realizadas 30 medições, com um intervalo de tempo de 20 s entre as mesmas.

## 5.5 RECOMENDAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DA INSTABILIDADE

Com base na análise feita neste capítulo, pode-se resumir que para obtenção de resultados de alta confiabilidade, que expressem unicamente a instabilidade do gerador da reta padrão, uma série de precauções relevantes se fazem necessárias, e são analisadas a seguir:

- a) garantir uma estabilidade do banco óptico, evitando vibrações do elemento de referência, causadas por fontes externas, conforme comentado no item 5.2.1.
- b) mecanismos de montagem do laser e fotodiodos devem apresentar estabilidade ótima, relativamente ao banco óptico.
- c) ambiente climatizado, com temperatura controlada em torno de 22° C e umidade relativa do ar abaixo de 75% são recomendadas, principalmente para uso dos fotodiodos.
- d) evitar turbulências aleatórias de ar, tais com o abrir e fechar de portas, o andar de uma pessoa ou mesmo a permanência de mais pessoas no recinto do banco de ensaio, e o acender e apagar de luzes.

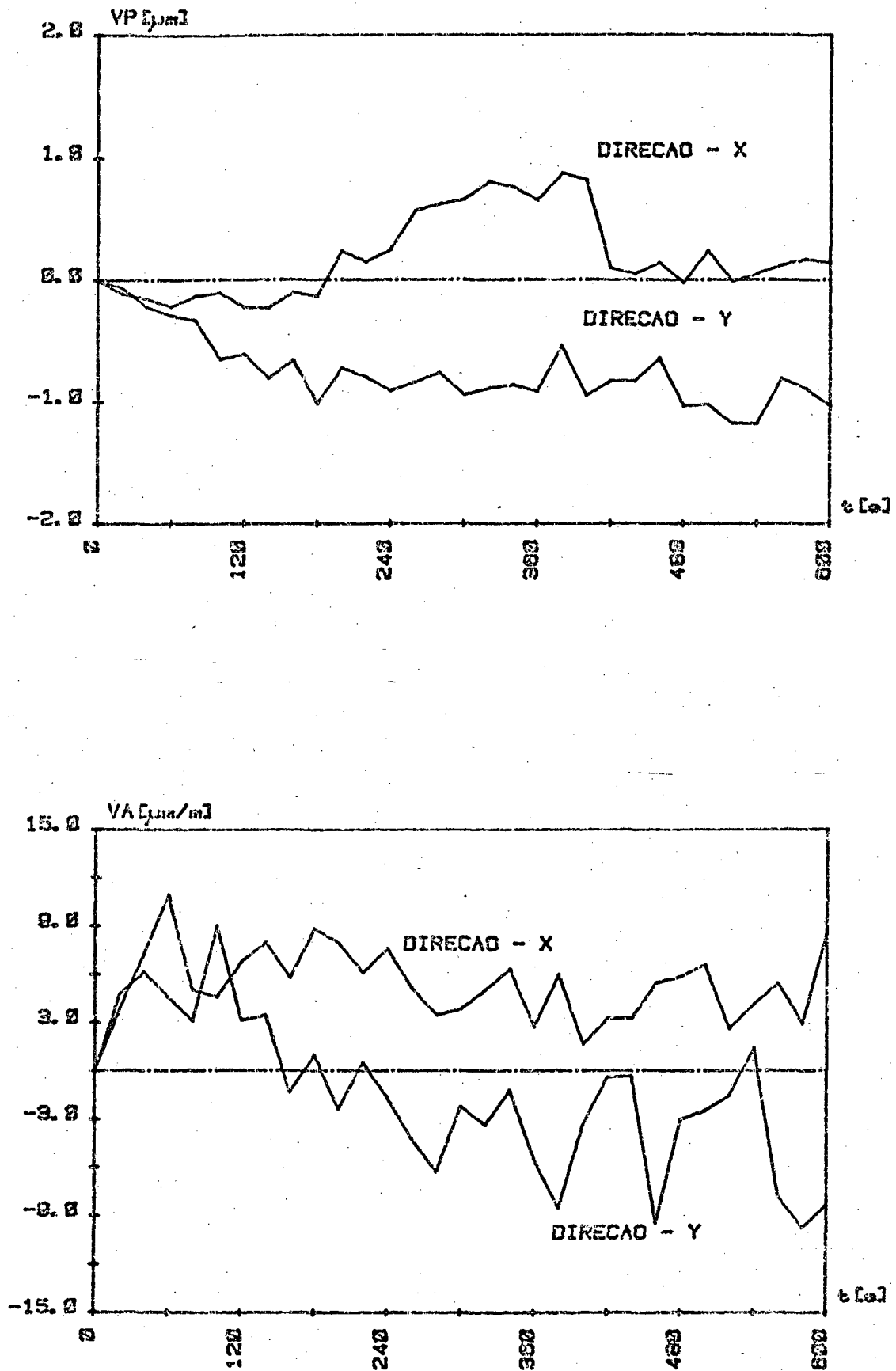


FIG.5.19 - Instabilidade (VP e VA) típica de um laser.

e) parâmetros de medição. Conforme já mencionado anteriormente, o ideal de uma medida seria se fosse realizada instantaneamente. Como tal é impossível, deve-se reduzir ao máximo o tempo de medição, e levando também em consideração o número de leituras por eletrodo, otimizando assim esses parâmetros.

## 5.6 TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DA ESTABILIDADE

Uma das técnicas de otimização da estabilidade do feixe, relativamente simples, é o uso de um ventilador de refrigeração, posicionado preferivelmente na parte posterior do laser e com o fluxo de ar dirigido sobre o mesmo /10, 16/. Apesar de parecer inconveniente tal prática, ela se mostra viável, por homogeneizar o ar em torno do laser, reduzindo assim o gradiente de temperatura, do laser para o meio ambiente. Sem um ventilador, o gradiente de temperatura é maior, e pequenos fluxos aleatórios, causados no meio ambiente, causarão uma imediata variação da posição do feixe. Com o uso do ventilador, esses fluxos aleatórios são dispersos antes de atingirem o laser.

## 6. ESTUDO EXPERIMENTAL DA INSTABILIDADE DE LASERS

---

Visto que a instabilidade do feixe laser pode ter as mais diferentes causas, conforme apresentado no capítulo 3, dependendo grandemente de sua forma construtiva e das condições operacionais, analisar-se-á neste capítulo, experimentalmente sob esses aspectos, a instabilidade de quatro lasers.

Como característica construtiva comum à maioria dos lasers (e de todos analisados), pode ser citado o suporte, feito de alumínio que, apesar de seu relativamente grande coeficiente de dilatação térmica ( $23 \times 10^{-6} / K$ ) apresenta vantagens em relação a outros materiais, pelo seu baixo peso específico ( $2,65 \times 10^3 N/m^3$ ), tornando assim a unidade geradora, leve e manuseável, e pelo elevado coeficiente de condutibilidade térmica do alumínio, existe uma rápida dissipação do calor.

Além dessas vantagens do alumínio, sobre outros materiais, ele absorve mais os ruídos acústicos, minimizando assim seus efeitos /35/.

Outra característica comum, é um resistor estabilizador, conectado ao ânodo, internamente ao suporte, para minimizar os efeitos de capacitância do mesmo.

### 6.1 OS LASERS ANALISADOS

Os lasers analisados experimentalmente são, a seguir, descritos sucintamente, destacando-se suas principais características, segundo especificações do fabricante. Destaca-se que sobre instabilidade nada consta na documentação técnica dos mesmos.

#### a) Laser A.

O laser A /24/ de 5 mW de potência com luz polarizada e ressoador quase hemisférico com espelhos desacoplados do tubo,

tem o mesmo montado num suporte retangular, de dimensões (80 x 83 x 47) mm, apoiado sobre 4 apoios de borracha (fig. 6.1). O feixe tem um diâmetro nominal de  $\varnothing,8$  mm e apresenta uma divergência natural de 1,1 mrad.

b) Laser B.

O laser B /42/ de 5 mW de potência, tem os espelhos integrados ao tubo, com mecanismos de ajuste, sendo o tubo montado num suporte cilíndrico de 44 mm de diâmetro e 406 mm de comprimento (fig. 6.1). A luz é polarizada e o feixe apresenta diâmetro de  $\varnothing,9$  mm e divergência de 1 mrad. Não possui bases de apoio, sendo portanto necessário um mecanismo de montagem para o mesmo.

c) Laser C.

O laser C /43/ tem uma potência nominal de 2 mW, com espelhos integrados ao tubo, e este montado num suporte cilíndrico de 35 mm de diâmetro e 280 mm de comprimento. A luz não é polarizada e o feixe tem diâmetro de  $\varnothing,5$  mm e uma divergência de 1,6 mrad. Como no laser anterior, não possui bases de apoio.

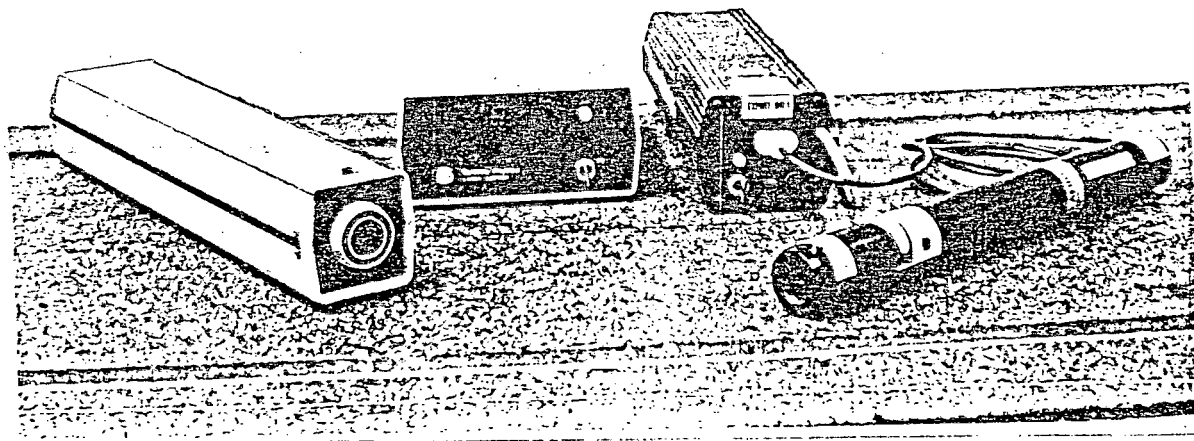


FIG. 6.1 - Fotografia dos lasers A e B, respectivamente.

## d) Laser D, ou "LAB-1".

Com vistas a uma otimização da estabilidade, foi desenvolvido pelo LABMETRO, um protótipo de suporte de alumínio maciço (fig. 6.2), sobre o qual foi montado um tubo de 5 mW de potência /44/, com luz polarizada, e espelhos desacoplados do tubo, também montados no suporte. O ressoador é do tipo quase hemisférico e o diâmetro de  $\varnothing,8$  mm e divergência de 1,1 mrad.

## 6.2 TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO

Considera-se tempo de estabilização, o tempo transcorrido a partir do instante em que o laser for ligado, até seus principais componentes entrarem em regime de temperatura estabilizada, ou seja, oscilante com relação a valor médio constante. Nesse período, os componentes mecânicos e ópticos sofrem uma maior

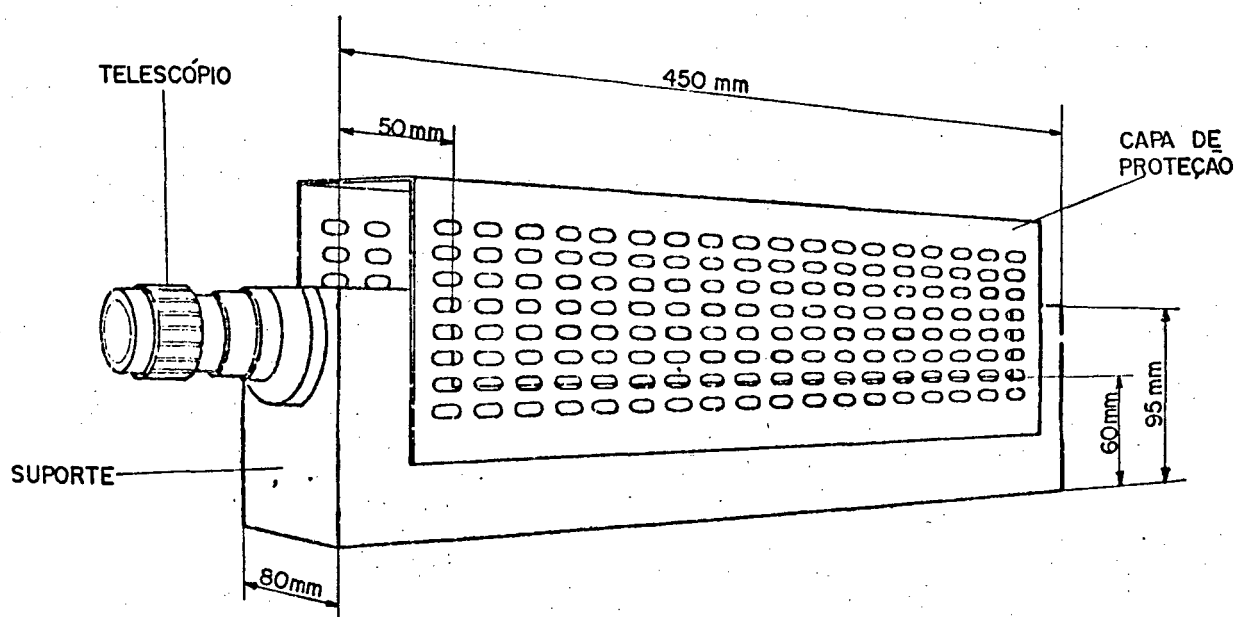


FIG. 6.2 - Laser "LAB-1", com suporte de alumínio maciço.

alteração geométrica (dimensão, forma, posição), e o feixe, conseqüentemente, uma maior variação na sua posição espacial. Após esse tempo, a menos que ocorram perturbações externas, como será visto adiante, o feixe permanece dentro de uma determinada faixa de instabilidade.

O procedimento geral de ensaio, já foi descrito no item 5.4, mas considerando o objetivo de medir a instabilidade durante o tempo de estabilização, faz-se necessário determinar os pontos de monitoração das temperaturas e realizar ensaios com e sem o uso do ventilador, para uma melhor análise da instabilidade.

A seguir, apresentam-se os resultados em forma de gráfico, nas variações paralela (VP) e angular (VA) respectivamente, de alguns ensaios realizados, com intervalos de 2 min entre leituras.

a) Laser A. Este laser, com apoios originais de borracha, e sem uso de um ventilador, apresenta um tempo de estabilização de cerca de 120 min, como pode ser observado pela figura 6.3. A variação das temperaturas foi observada em 3 pontos sobre o laser, e estão correlacionadas às variações de posição do feixe. Observa-se uma maior variação, tanto paralela como angular, nos primeiros 20 min quando o gradiente de temperatura se apresenta maior.

Utilizando-se um ventilador impondo um fluxo pela parte posterior do laser, observa-se uma variação paralela e também angular (fig. 6.4), bem menor que no caso anterior, como conseqüência de uma maior dissipação do calor, conseqüentemente menor deformação térmica.

Um ensaio feito com este laser, com as proteções laterais removidas (fig. 6.5), e com uso de um ventilador, demonstrou que o tempo de estabilização reduziu-se a aproximadamente 50 min e a variação paralela máxima passou a ser 70  $\mu\text{m}$ , e a angular de apenas 60  $\mu\text{m}/\text{m}$ , caracterizando assim as deformações provocadas pelo suporte do tubo.

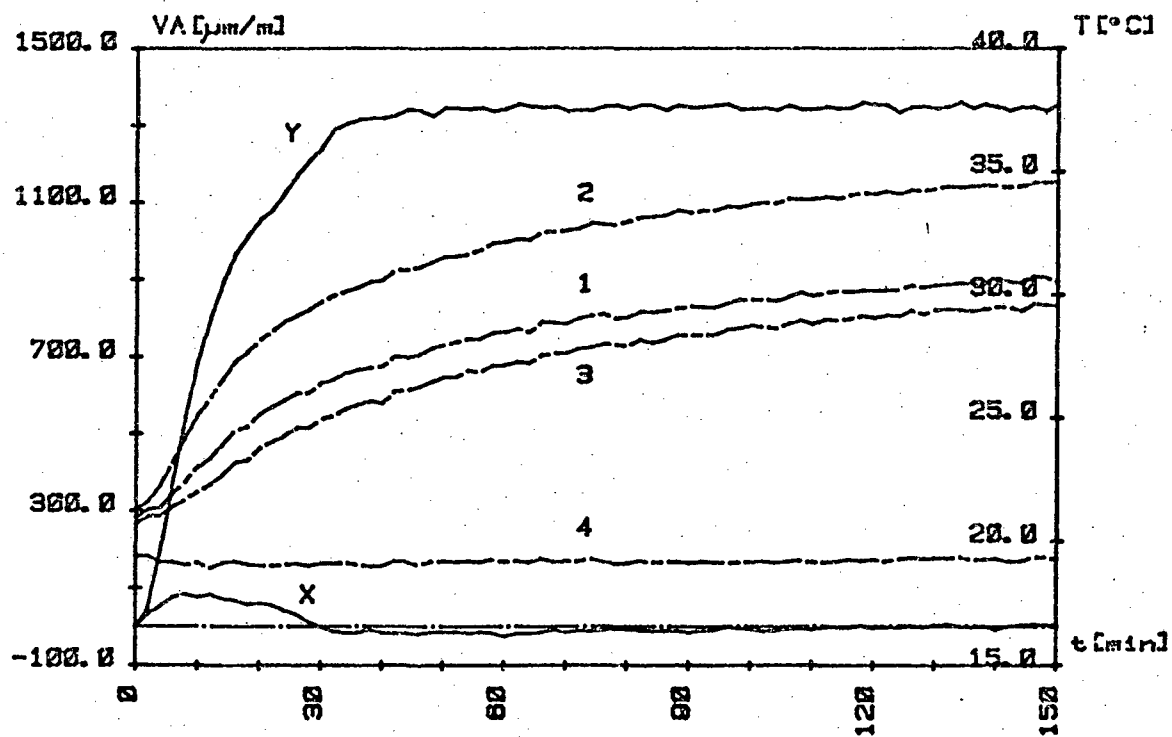
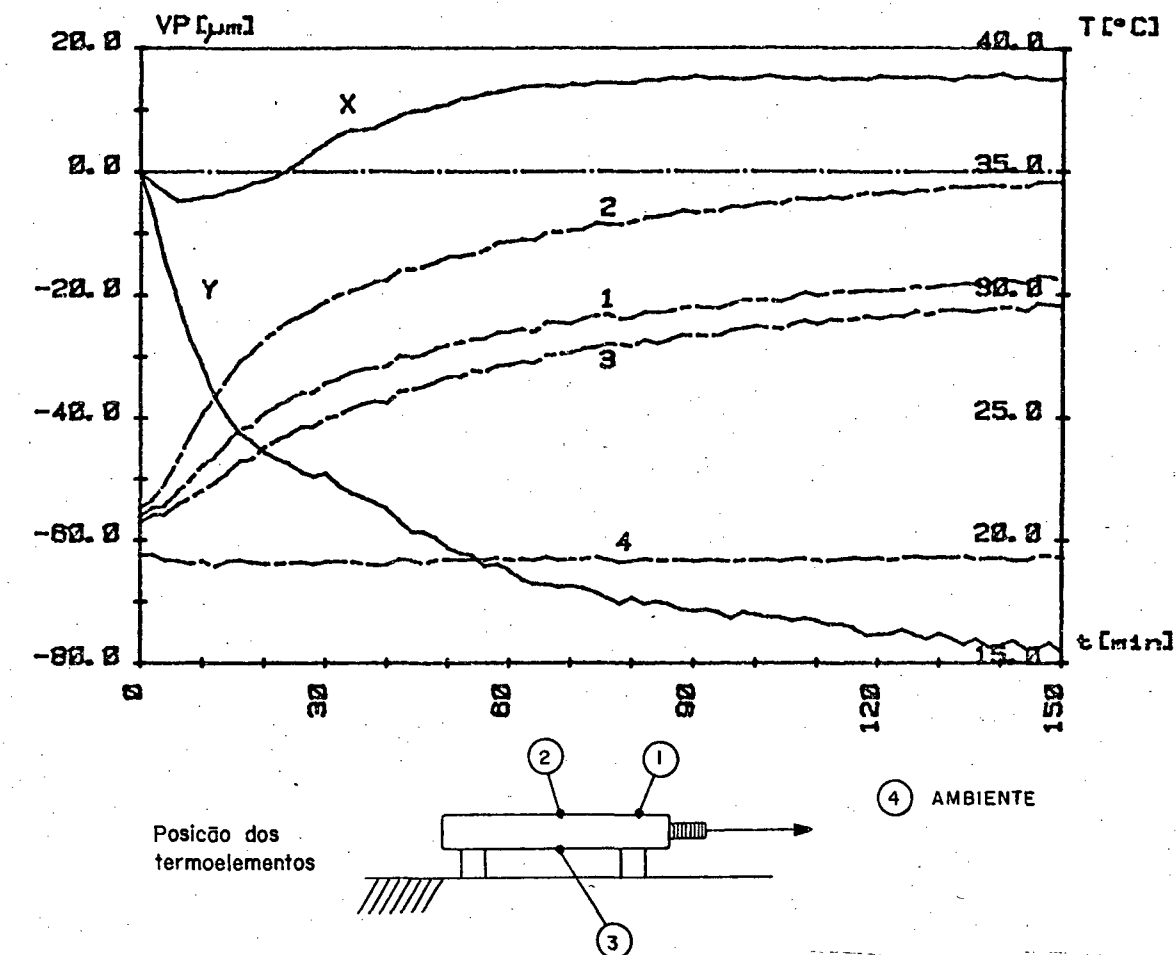


FIG. 6.3 - Instabilidade do laser A, durante o período de estabilização.



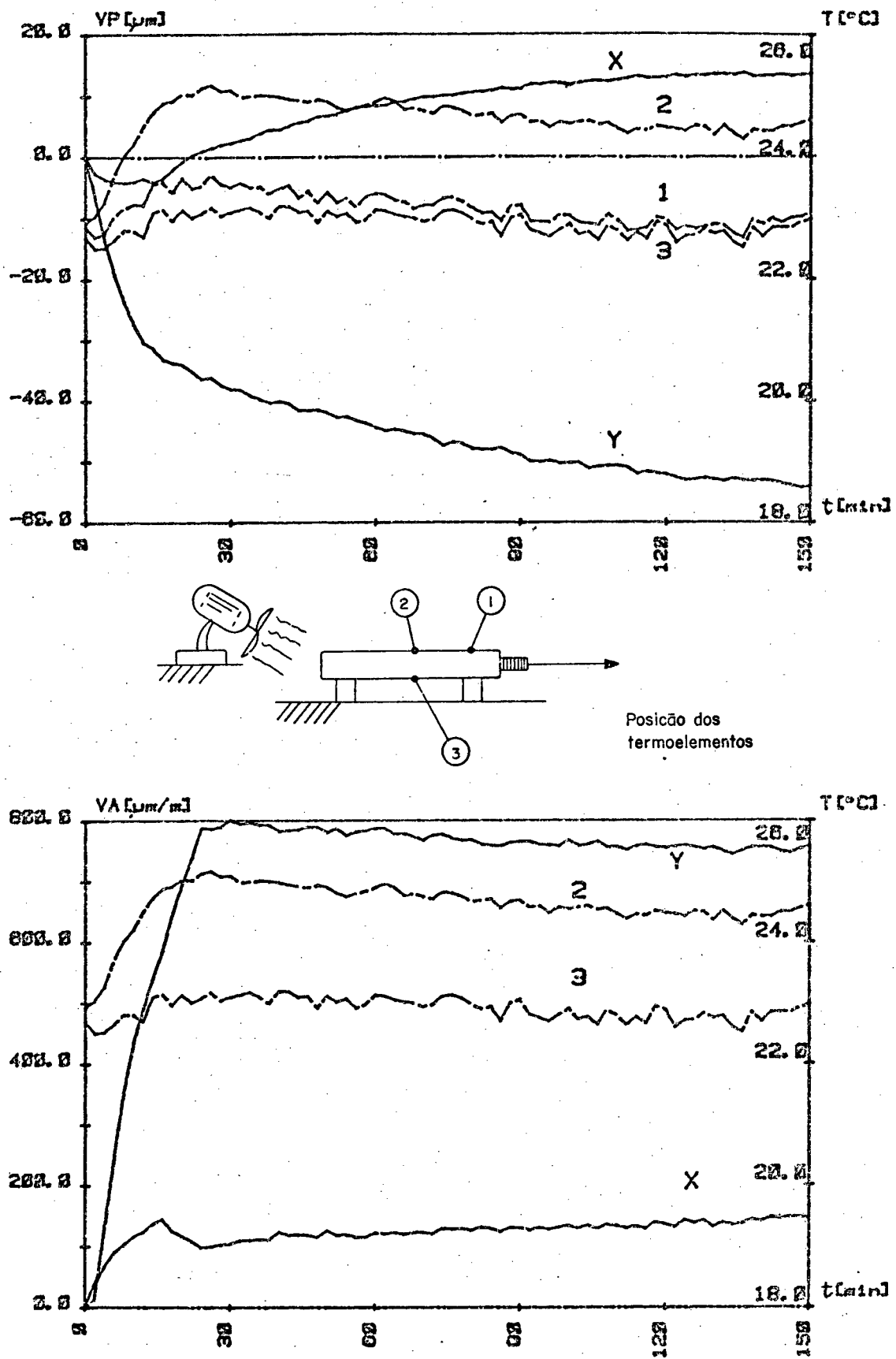


FIG. 6.4 - Instabilidade do laser A, com uso de um ventilador, no período de estabilização.

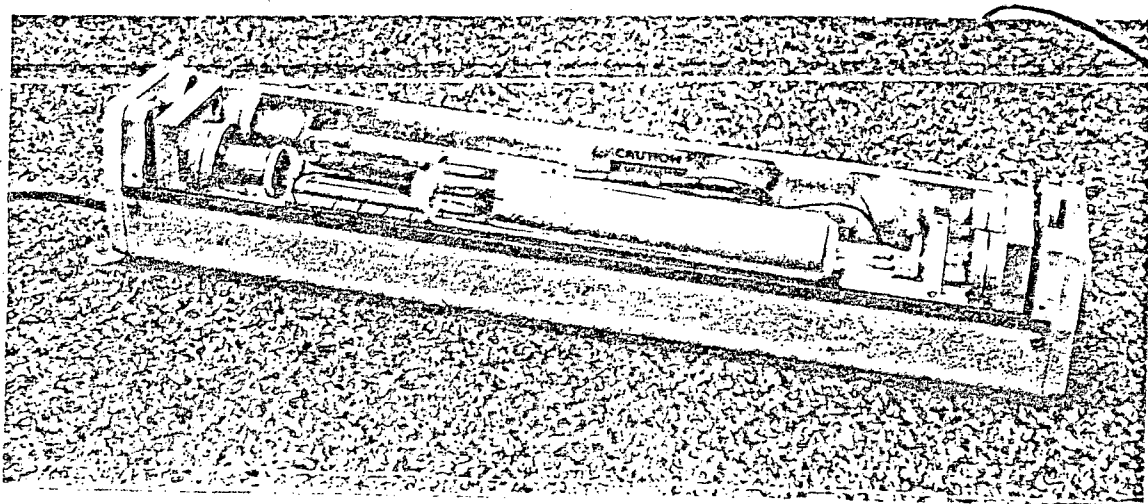


FIG. 6.5 - Fotografia do laser A, com tubo exposto.

- b) Laser B. O tempo de estabilização, sem ventilador, bem como as variações paralelas e angular, podem ser observadas pela figura 6.6. Com uso de um ventilador, esse tempo é sensivelmente menor e o valor das temperaturas também menores.
- c) Laser C. Com uso de um ventilador, este laser apresentou um tempo de estabilização, em torno de 80 min (fig. 6.7). As variações paralela e angular, durante essa fase, foram menores que as dos lasers anteriores, porém a instabilidade, um pouco maior. Explica-se isso, pelas dimensões reduzidas desse suporte e do próprio ressoador.
- d) Laser D. Este laser, com tubo montado sobre o suporte de alumínio maciço, apresentou um tempo de estabilização em torno de 120 min, sem ventilador, e uma variação paralela máxima de 4  $\mu\text{m}$  e angular máxima de 60  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Com uso de um ventilador, o tempo de estabilização foi em torno de 90 min e ocorreu uma variação paralela máxima de 2  $\mu\text{m}$  e angular, de 30  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Realizou-se um outro ensaio de estabilização das temperaturas, sem uso do ventilador durante os primeiros 100 min, após os quais foi ligado o ventilador. Observa-se (fig.

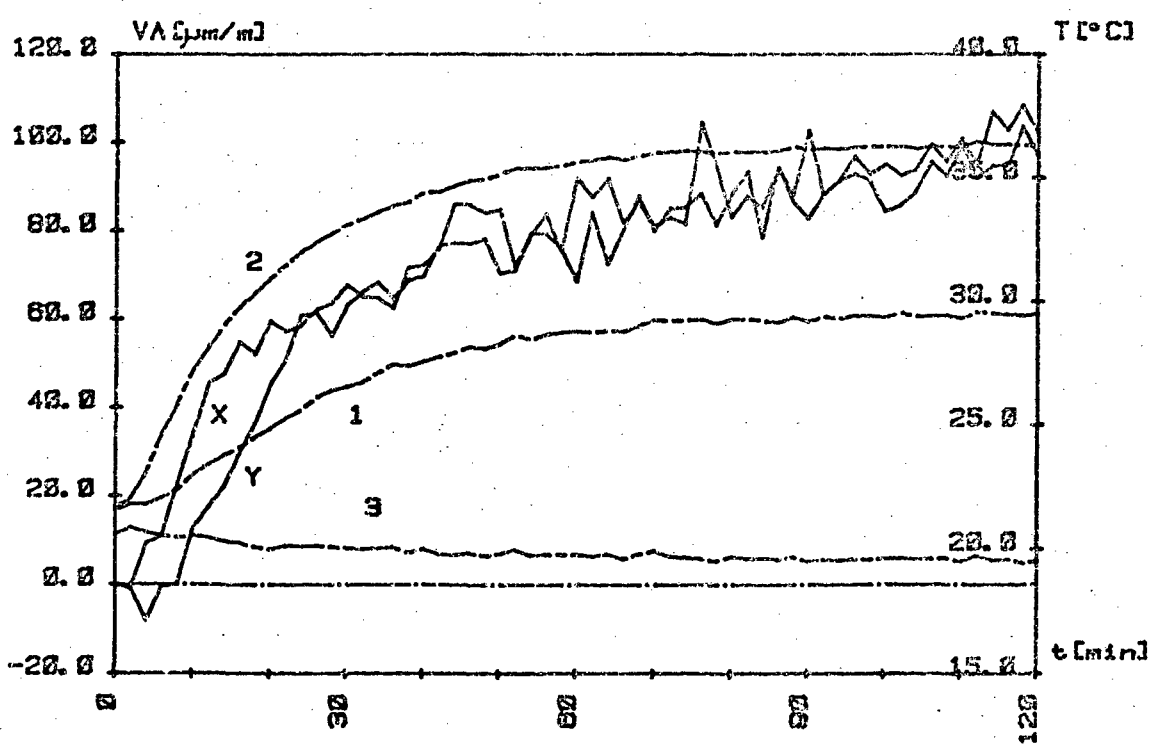
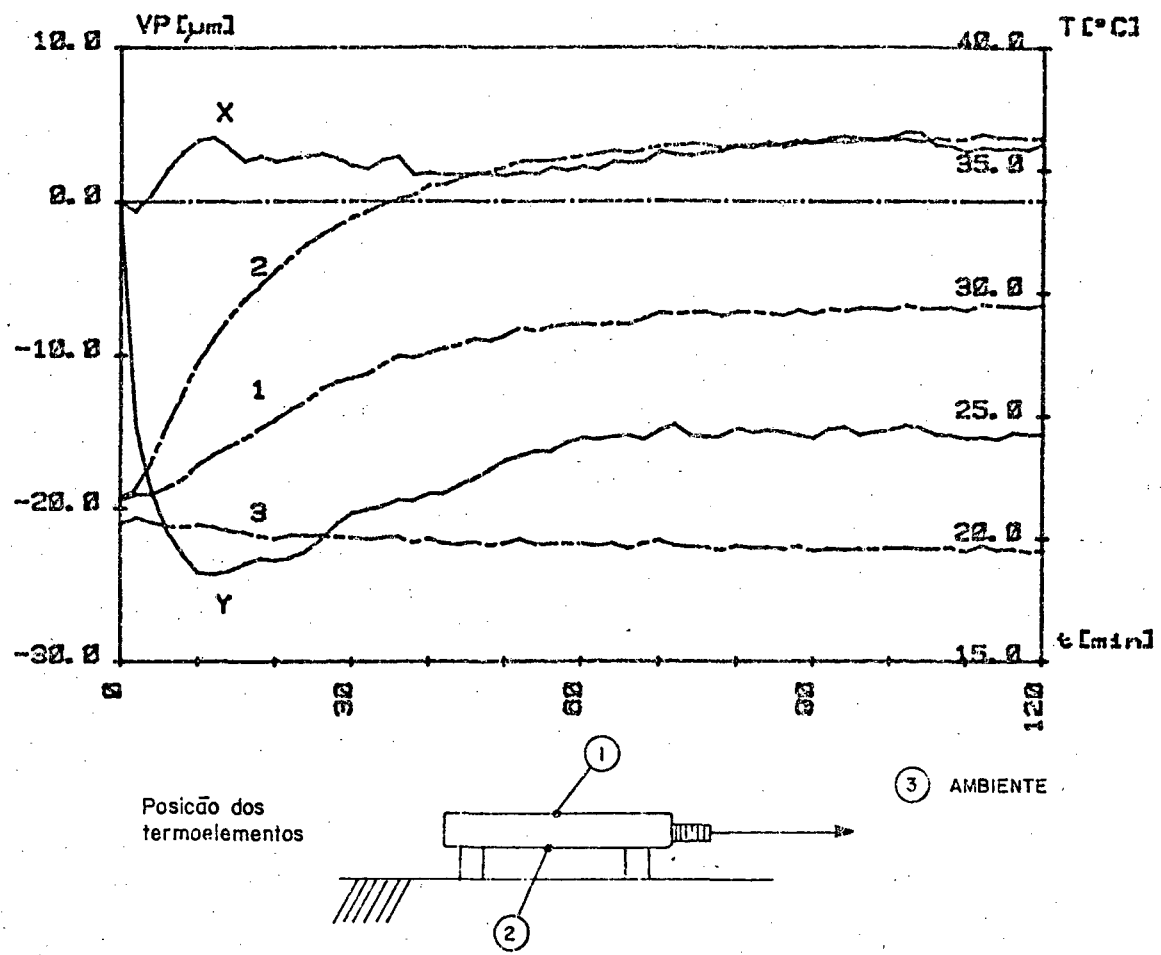


FIG. 6.6 - Instabilidade do laser B, durante o período de estabilização.

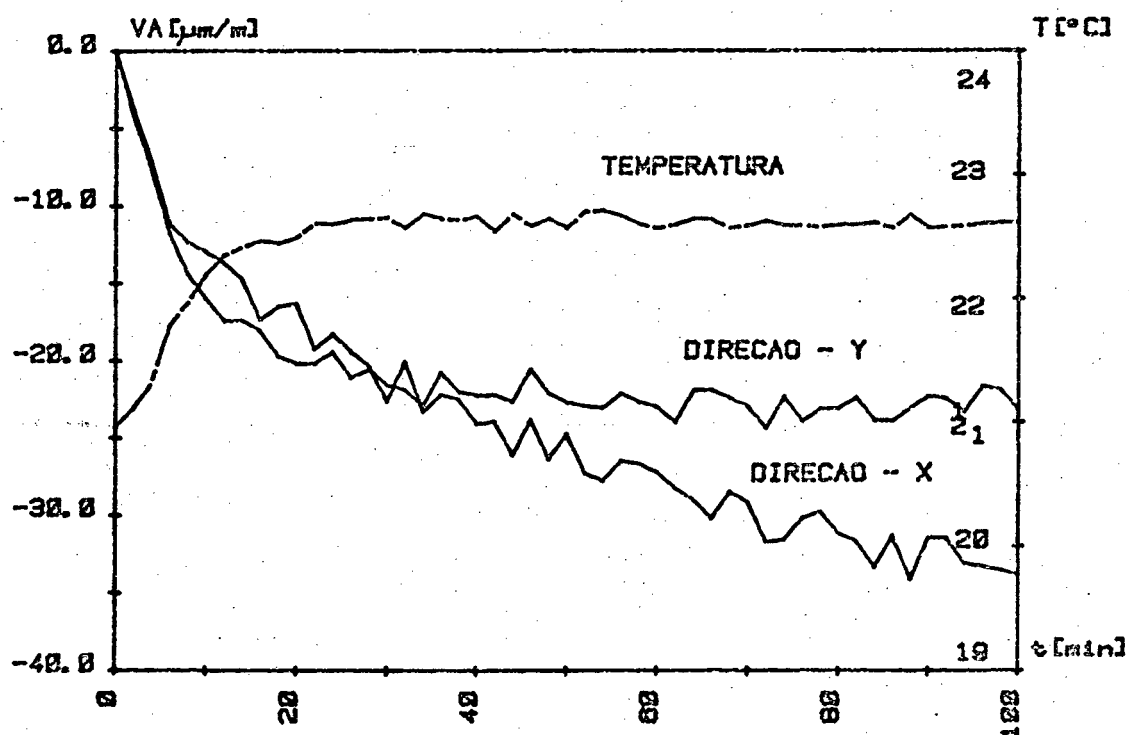
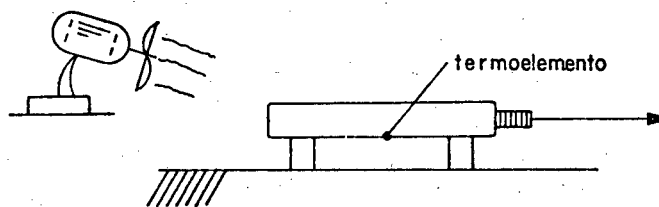
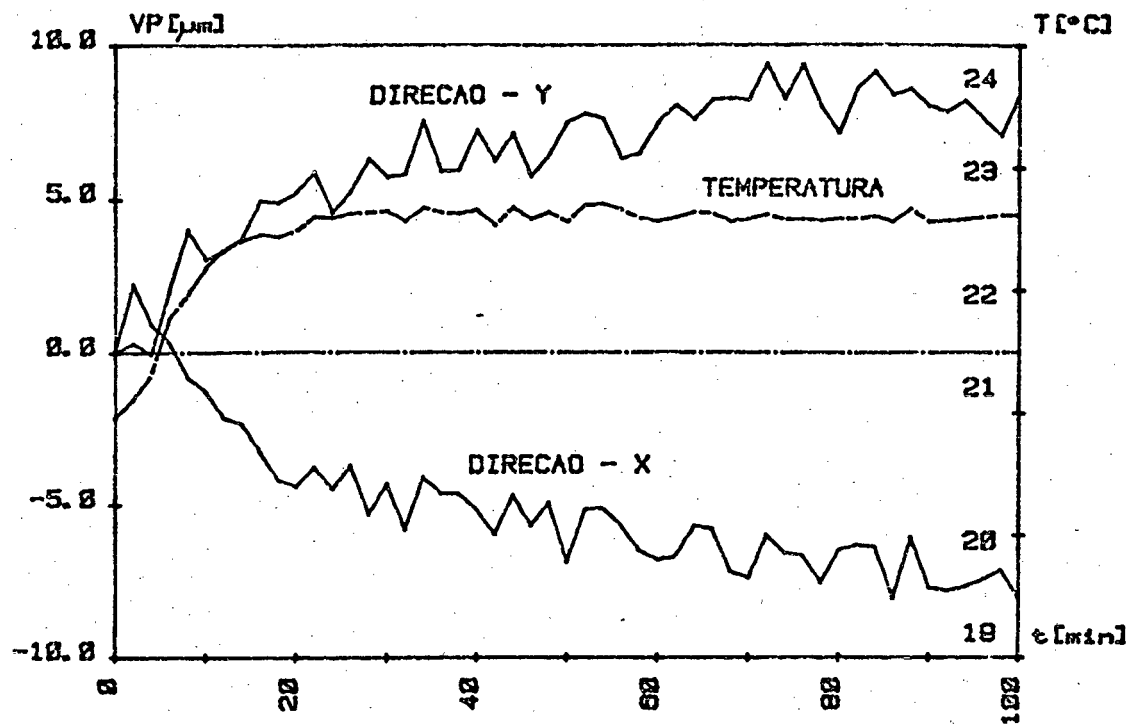


FIG. 6.7 - Instabilidade do laser C, durante o período de estabilização, com uso de um ventilador.

6.8) a imediata resposta nas temperaturas do suporte, conseqüentemente na posição do feixe. As temperaturas nesse caso, não variaram consideravelmente após ter sido ligado o ventilador, em comparação às temperaturas iniciais.

### 6.3 INFLUÊNCIAS EXTERNAS NA INSTABILIDADE

#### 6.3.1 Comportamento do Suporte Mecânico

A influência de vibrações mecânicas na instabilidade do feixe foi nitidamente observada em experimentos específicos. Com o laser A, por exemplo, em sua configuração original, suportada por 4 apoios de borracha, pequenas batidas (com a mão) no banco óptico, causaram uma variação imediata de  $50 \mu\text{m/m}$ , devido à flexibilidade dos apoios de borracha. Com os apoios de borracha removidos, montando-se 3 semi-esferas na base da estrutura do mesmo laser, e então posicionado sobre os dispositivos de apoio isostático, batidas idênticas causaram uma variação angular na ordem de apenas  $5 \mu\text{m/m}$ .

Outro fator observado, foi com relação à fixação do laser. O laser B por exemplo, fixo com braçadeiras em forma de arco, rigidamente parafusadas no banco óptico (fixação hiperestática), apresentou uma variação maior, que com fixação isostática, por causa das tensões causadas sobre a estrutura, devido às dilatações térmicas diferenciais entre suporte do ressoador e banco óptico.

#### 6.3.2 Fluxos de Ar

A influência de fluxos de ar na instabilidade, já foram nitidamente comprovadas pelo experimento relativo à figura 6.8, quando ligado um ventilador durante um ensaio. No entanto, fluxos menos intensos, tais como lufadas causadas por sopros ou por uma

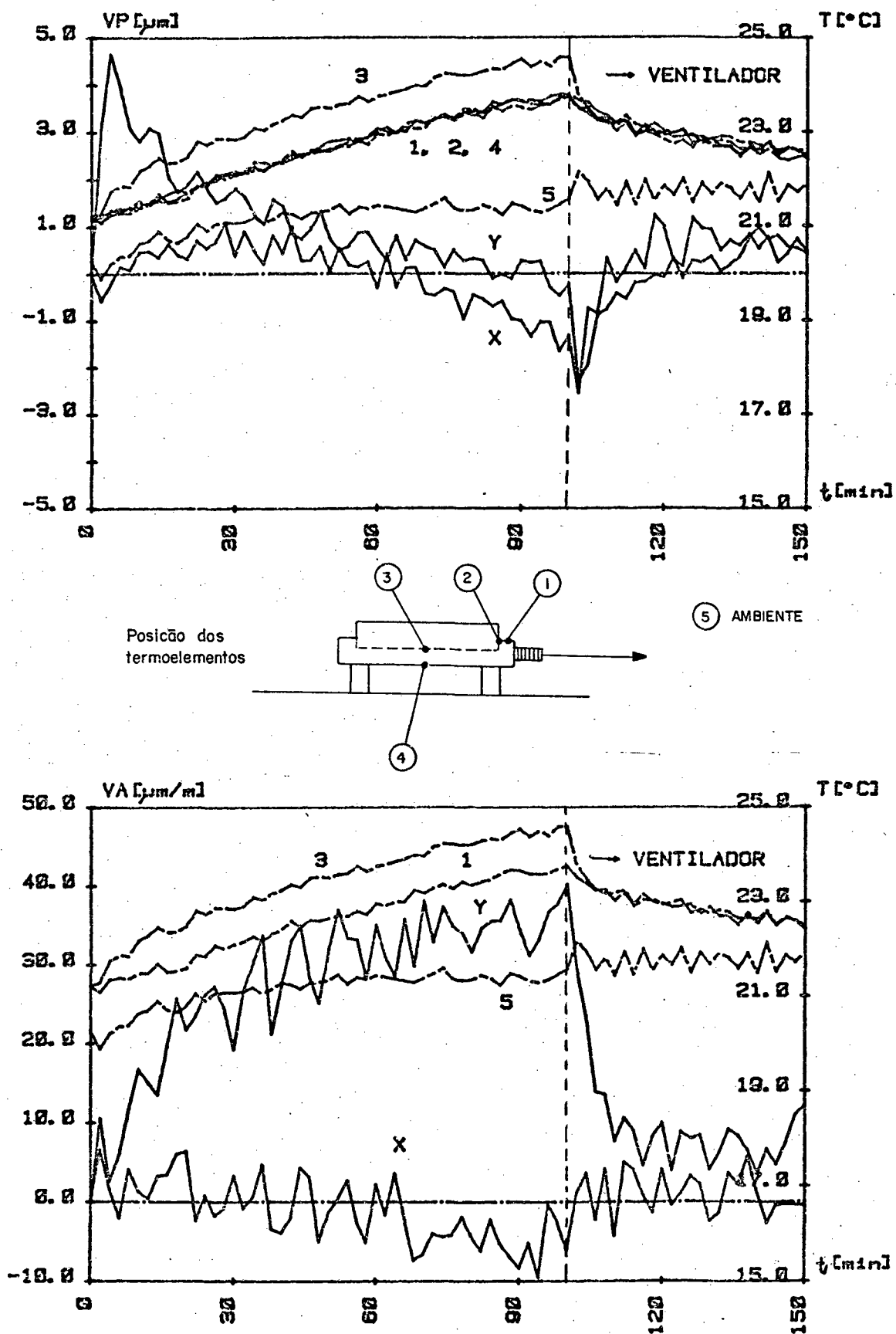


FIG. 6.8 - Instabilidade do laser "LAB-1", durante o período de estabilização, sem e com uso de um ventilador.

prancheta de mão, ou mesmo pelo andar de uma pessoa próxima ao laser, causam também variações imediatas na posição do feixe. Observa-se a influência de lufadas provocadas pelos movimentos de uma prancheta de mão sobre o laser A, após o instante 330 s, sendo no primeiro ensaio (fig. 6.9) sem o uso de um ventilador de refrigeração, e no segundo caso (fig. 6.10), a variação ocorrida com o ventilador ligado. Nesse segundo caso, a influência é bem menor, pois com o fluxo de ar do ventilador não se forma um gradiente de temperatura como no caso sem ventilador, além do fluxo causado pela prancheta ser menor que o fluxo causado pelo ventilador, praticamente não interferindo neste.

O laser D, com lufadas idênticas e sem ventilador, apresentou uma variação angular imediata de  $5 \mu\text{m}/\text{m}$  e, com lufadas causadas pelo lado direito da estrutura por exemplo, observou-se uma variação paralela de  $1 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Os lasers B e C, se mostraram menos sensíveis que o laser A, porém bem mais sensíveis que o laser D.

### 6.3.3 Tensão da Rede

Realizou-se uma experiência, ligando um laser a uma fonte de tensão variável, submetendo-o a uma tensão de alimentação entre 205 e 220 V observando-se que a variação na instabilidade foi pouco significativa. Isso porque a fonte do laser possui um estabilizador de tensão. No entanto com tensão inferior a 205 V, o laser apresentou uma emissão intermitente e, valores acima de 220 V foram evitados por motivos de segurança.

## 6.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Uma análise comparativa entre os lasers analisados, permite concluir basicamente que:

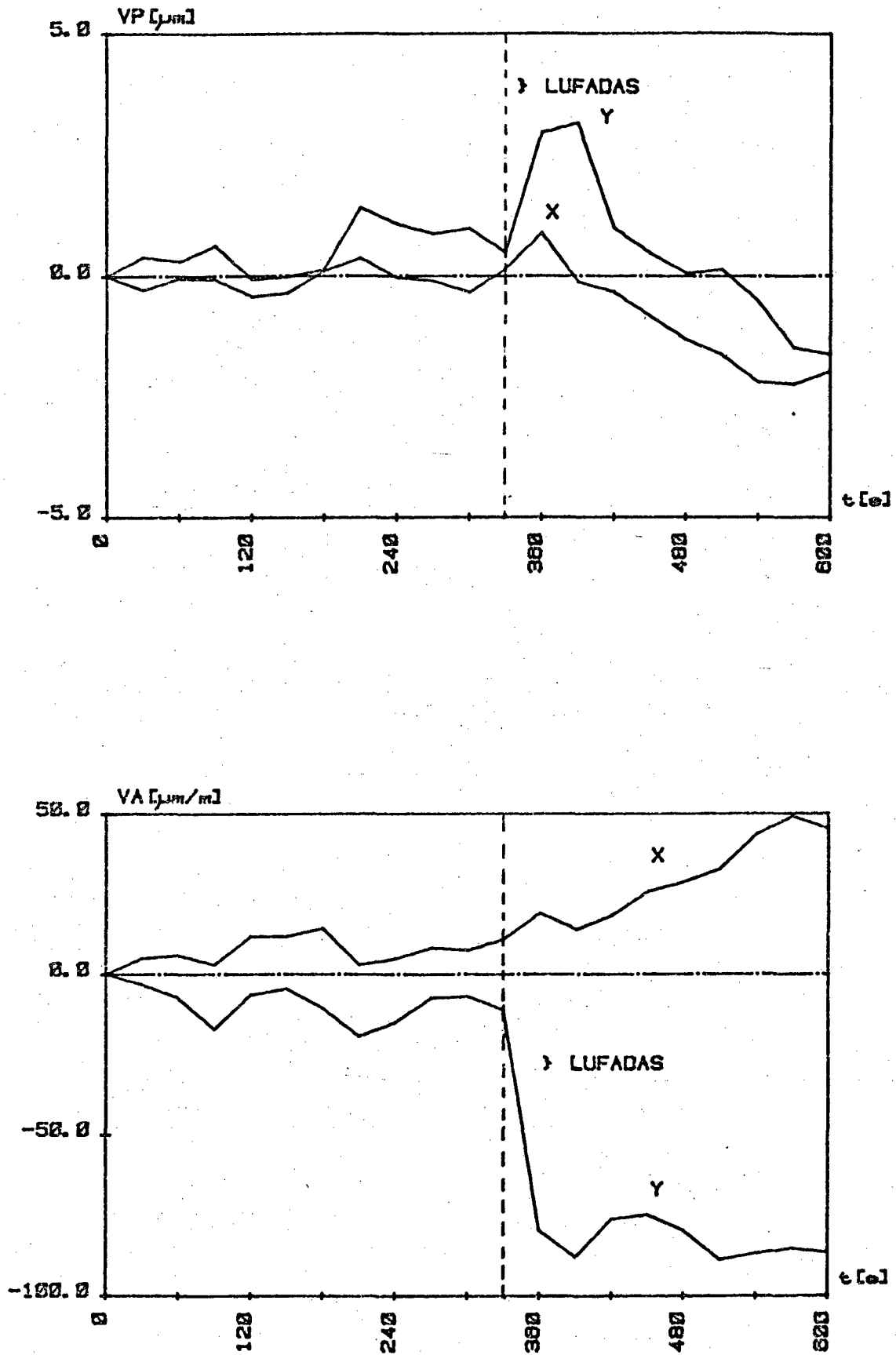


FIG. 6.9 -- Influências de lufadas sobre o laser A, sem Ventilador.



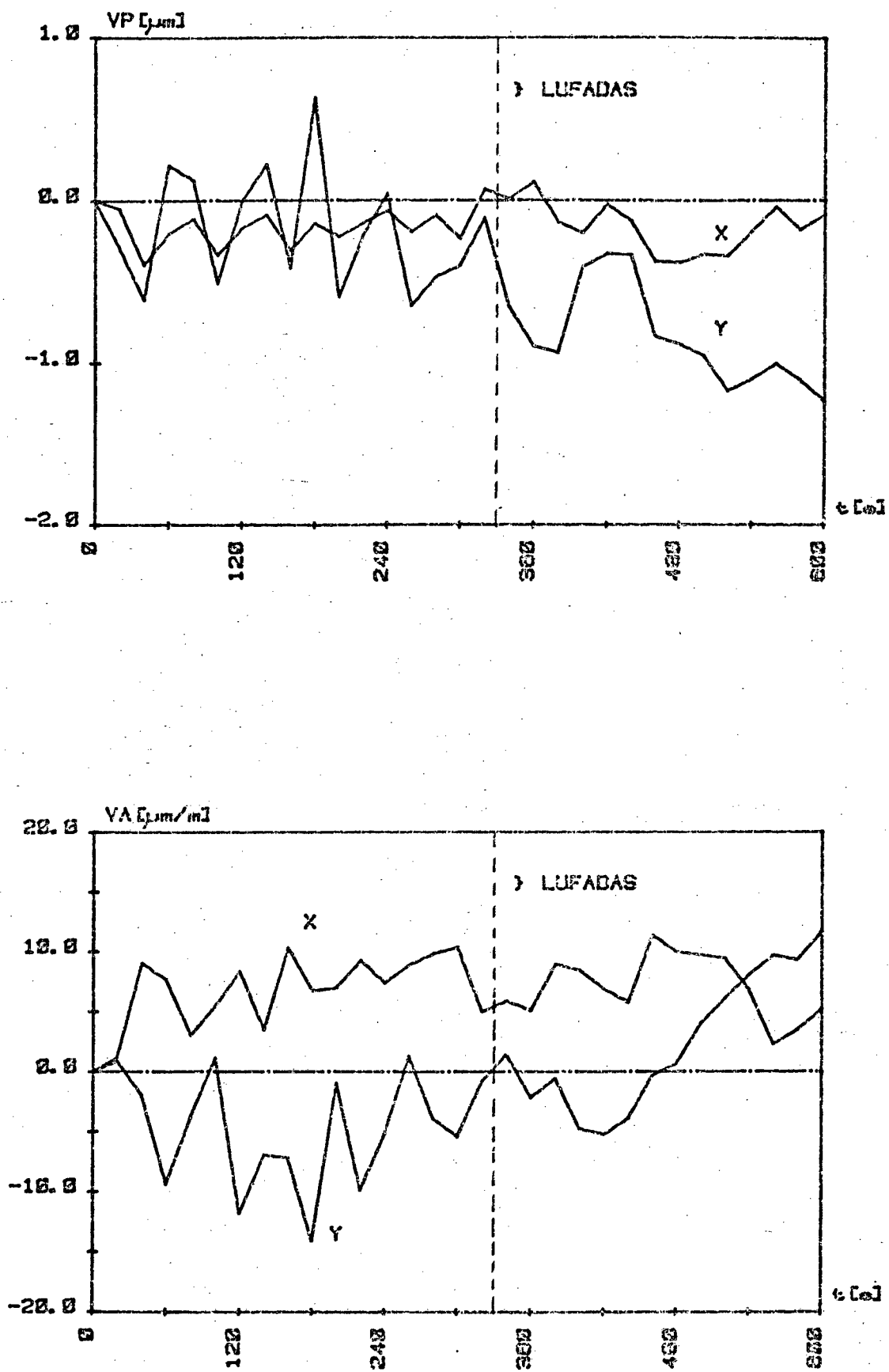


FIG. 6.10 - Influências de lufadas sobre o laser A, com ventilador.

a) Quanto ao tempo de estabilização.

O laser que apresentou maior tempo de estabilização, foi o laser A, sem ventilador, por apresentar estrutura desfavorável à dissipação de calor e sofrer relativamente grande variação de temperatura. O tempo de estabilização do laser D, foi pouco menor, por dissipar melhor o calor, devido à estrutura, e a proteção do tubo ter perfurações que permitem uma melhor ventilação em torno do tubo. O laser que apresentou menor tempo de estabilização, foi o laser B, por ter menores dimensões (cilíndrico), entrando mais rapidamente em regime de temperatura constante. Observou-se também que o uso do ventilador reduz sensivelmente o tempo de estabilização, de todos os lasers analisados.

b) Quanto à variação de posição do feixe, durante a fase de estabilização.

O laser que apresentou maior variação de posição espacial do feixe durante o tempo de estabilização, foi o laser A, fato que se explica por ter os espelhos fixos à estrutura, e esta ser de maiores dimensões que nos lasers B e C, além de que estes últimos, possuíam os espelhos fixos diretamente ao tubo, e o vidro por apresentar coeficiente de dilatação bem menor que o alumínio, causa menor alteração geométrica do ressoador. O laser D, com ventilador, foi que apresentou menor variação durante a fase de estabilização, por sofrer menor deformação em sua estrutura.

c) Quanto ao comportamento em regime de temperatura.

Após a estabilização das temperaturas, foi o laser D que se mostrou mais estável, sofrendo menores variações paralela e angular, e isso, com uso do ventilador.

d) Quanto à perturbações externas.

Observou-se nitidamente, que os lasers de menor dimensão (B e C), apresentaram maior instabilidade do feixe, devido a perturbações externas, tais como lufadas de ar. Com ventilador, essas variações foram menores.

Um último ensaio a ser apresentado, teve por objetivo verificar a instabilidade do laser D, em condições ambientais desfavoráveis, ou seja, em condições reais de um ensaio de retilineidade, montado com os apoios isostáticos e com o ventilador ligado. Após um tempo de estabilização de 3 horas, mediu-se a instabilidade durante 10 min, sendo nesse período provocadas lufadas sobre o laser, dadas pequenas batidas sobre o banco óptico, ter aberto e fechado a porta do ambiente, além de evidentemente, ter caminhado na sala. O resultado desse ensaio, está apresentado na figura 6.11. Observa-se que as variações paralela e angular, são relativamente pequenas, considerando as condições operacionais do laser. Essas variações foram bem menores que as apresentadas pelos outros lasers.

Apesar desse laser ter-se mostrado o menos instável em condições ambientais reais, os resultados poderiam ter sido melhores, se devido ao tempo de uso, o mesmo não tivesse reduzido a sua potência para aproximadamente 60% do valor nominal, apresentando uma variação quase senoidal da mesma. Na figura 6.12 estão plotadas as variações das potências relativas (soma das tensões geradas nos 4 eletrodos de um dos fotodiodos), dos lasers D e A, respectivamente, observando-se o comportamento anormal do laser D, enquanto o B leva alguns minutos para operar em sua potência máxima, característica de todo laser, com funcionamento normal.

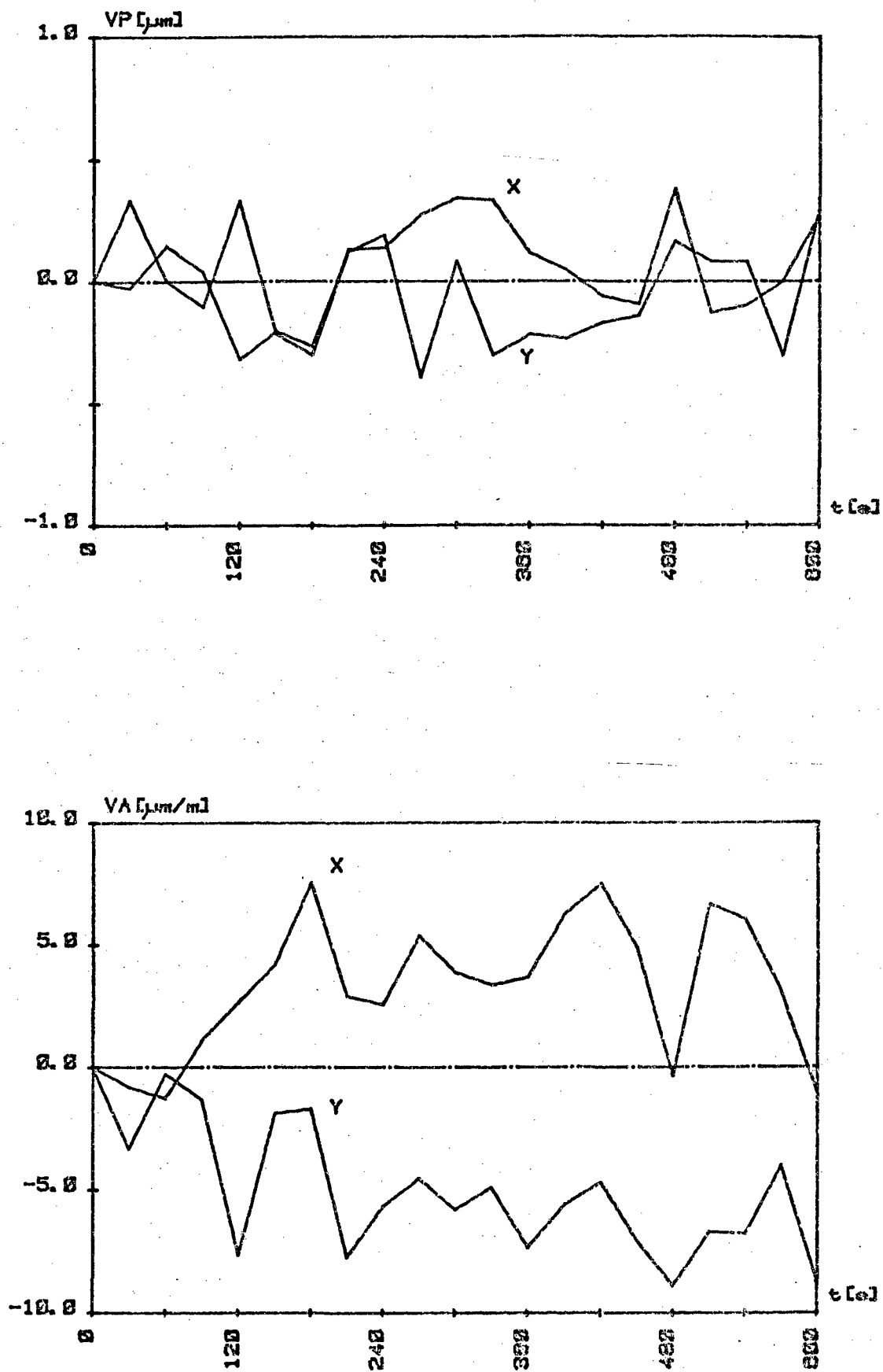


Fig. 6.11 - Instabilidade do laser "LAB-1", após 3h de estabilização, operando em condições ambientais reais.

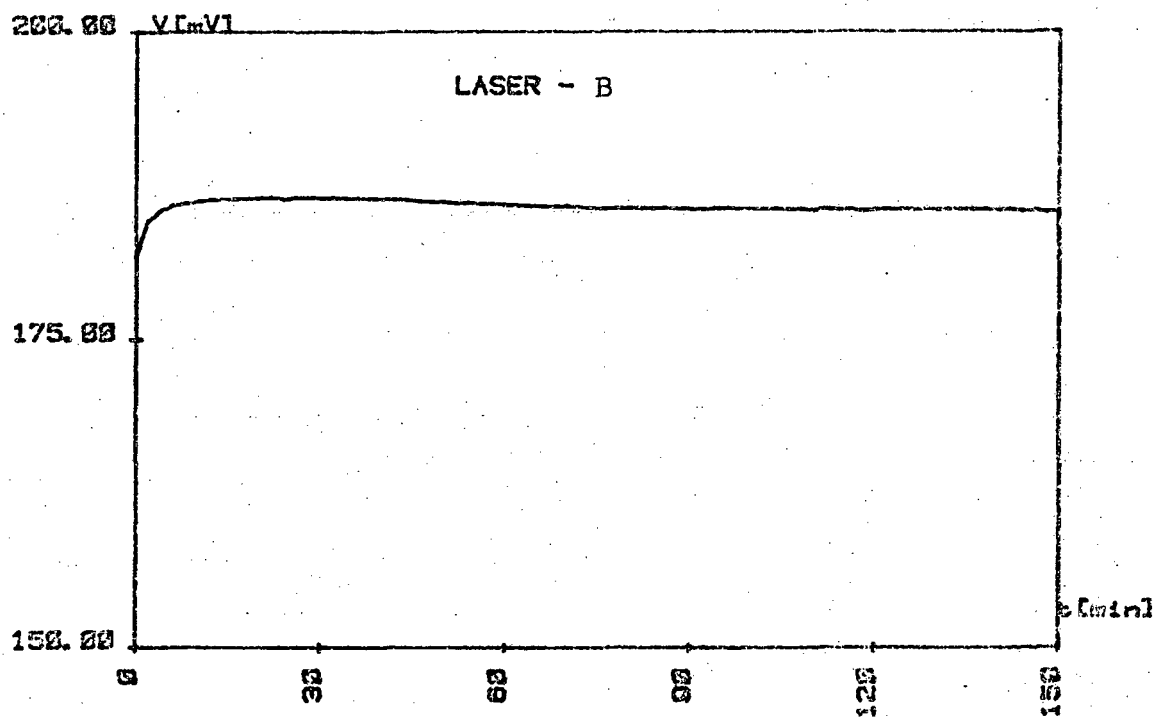
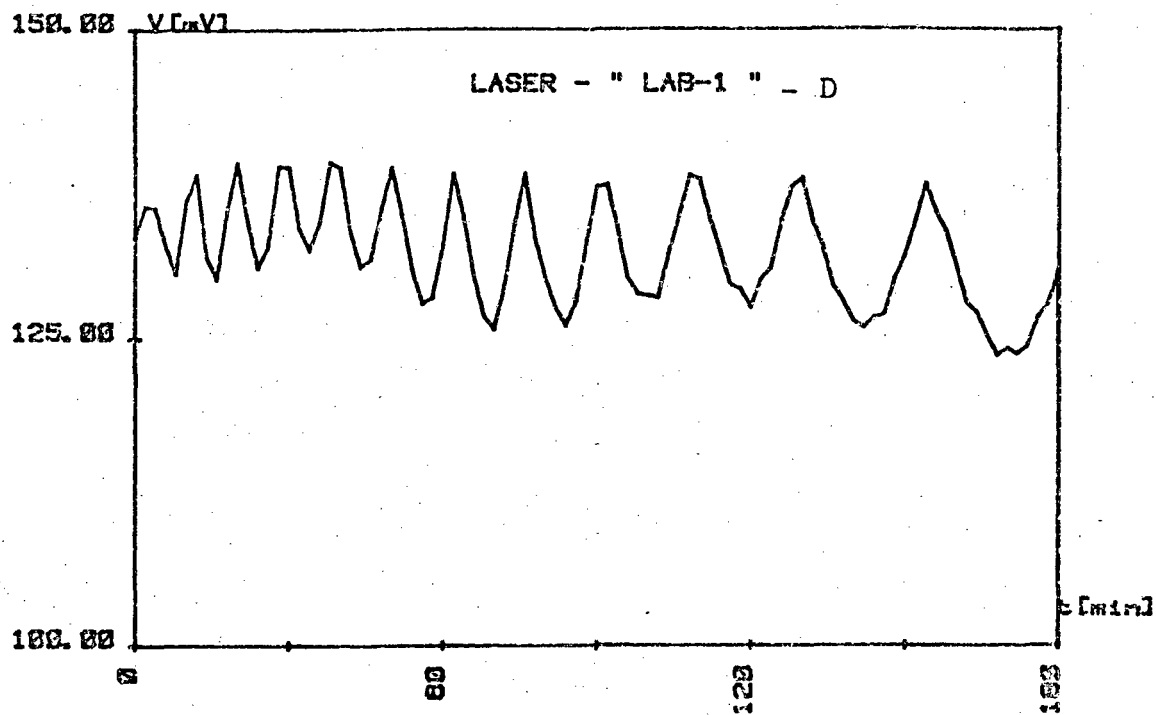


FIG. 6.12 - Variação da potência relativa dos lasers D e B, respectivamente.

## 7. OTIMIZAÇÃO DA ESTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE EMITIDO POR UM ----- LASER -----

Com base nos resultados obtidos na análise teórica e experimental, pode-se estabelecer uma série de recomendações construtivas e operacionais visando a otimização da estabilidade da posição espacial, do feixe de luz gerado na unidade laser. Estas são descritas nos itens que seguem.

### 7.1 QUANTO À ESTRUTURA DO RESSOADOR

O ressoador que apresenta melhor estabilidade além de ser o menos crítico quanto a alinhamentos, é o ressoador do tipo quase hemisférico, com espelhos acoplados diretamente ao tubo, para assim minimizar os efeitos das deformações térmicas, as quais causam maior influência na estrutura metálica, que no vidro (tubo). Mecanismos de ajuste nos espelhos também desempenham um papel importante, pois em caso de um maior desalinhamento ou mesmo substituição de um dos espelhos se necessário, proporcionam o devido alinhamento, garantindo que o laser opere no modo TEM<sub>00</sub>.

A estrutura maciça (fig. 6.2), apresentou melhores resultados, quanto à estabilidade, que as estruturas originais dos lasers, no entanto, um reestudo quanto às dimensões da mesma é sugerido, levando-se em consideração a dissipação do calor e o peso da mesma, que quando excessivo, pode causar uma maior deformação nos apoios. Ainda como sugestão para futuros estudos, pode ser considerado o caso de uma estrutura maciça, porém com perfuração na mesma, para proporcionar uma melhor dissipação do calor.

Quanto à fixação do tubo na estrutura, são requeridos para uma melhor estabilidade, componentes flexíveis, anti-choque e

que não causem esforços mecânicos sobre o tubo, quando ocorrem variações de temperatura. Esses componentes também devem ser feitos de material que absorve os ruídos acústicos.

Com relação ao material utilizado, um dos melhores para construção da estrutura é o alumínio, conforme justificado anteriormente.

## 7.2 QUANTO À VENTILAÇÃO

O uso de um ventilador, conforme mostrado, reduz grandemente a influência de lufadas de ar, por manter um fluxo de ar constante e, principalmente, dissipa o calor em torno do laser. Esse fluxo deve ser dirigido oblicuamente sobre o laser e na direção z, com uma velocidade não excessivamente alta, para evitar que vibrações sejam induzidas na estrutura.

Em ensaios de retilinearidade, realizados normalmente em ambientes mais hostis e normalmente com deslocamento de pessoas, o uso do ventilador é de extrema importância, para minimizar a dispersão da medida.

Observou-se no entanto que com essa prática, há um pequeno aumento na frequência das instabilidades, causado provavelmente pelos ruídos acústicos do ventilador.

## 7.3 QUANTO AO TELESCÓPIO

Em todos os lasers, observou-se que a variação angular (VA) é o maior responsável pelas instabilidades mesmo para curtas distâncias enquanto a variação paralela (VP), muitas vezes é irrelevante, levando em consideração a resolução do sistema de medição, de 1  $\mu\text{m}$ . Com o uso do telescópio, a VA é reduzida e a VP aumentada pelo fator de aumento A (fig. 2.9), no entanto deve-se otimizar esse fator, pois ampliando o feixe demasiadamente,

restringe-se a faixa de operação em função da área limitada dos fotodiodos.

#### 7.4 QUANTO AOS RUÍDOS ELÉTRICOS

Os ruídos elétricos causados pelos fotodiodos e instrumentos elétricos, induzem a erros, que podem ser minimizados com uso de filtros passa baixas. Quedas bruscas na tensão da rede elétrica, podem ser prejudiciais e até impedir o funcionamento do laser.

No caso do laser LAB-1, observou-se ser importante também um aterramento da estrutura, causando uma blindagem da mesma.

#### 7.5 QUANTO Á POTÊNCIA DO LASER

Como a energia dissipada no laser é proporcional a potência do feixe emitido, recomenda-se não utilizar lasers com potência elevada, que estão sujeitos a maiores variações de temperatura. Por outro lado, os laser de potência mais baixa, apresentam maior instabilidade em função do pequeno comprimento do ressoador. Portanto, lasers com uma potência entre 5 a 10 mW, são os mais indicados para uma melhor estabilidade.

#### 7.6 QUANTO AO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO

Para utilização do laser em melhores condições operacionais, visto o tempo de estabilização, recomenda-se que o mesmo seja ligado no mínimo 2 horas, ou até mais, antes de se realizar um ensaio de retilidade.



## 7.7 QUANTO AO AMBIENTE

Para melhores resultados de ensaio de retilineidade, deve-se manter um ambiente mais calmo possível, quanto ao deslocamento de pessoas, abrir ou fechar portas, fluxos aleatórios de ar, vibrações mecânicas, variações na temperatura, pressão e umidade do ar e outras eventuais perturbações.

## 8. CONCLUSÕES

-----

Considerando a excepcional versatilidade do laser de alinhamento como instrumento para ensaios de retilidade, é imprescindível que este também apresente resultados de alta confiabilidade, o que requer em primeiro plano uma ótima estabilidade espacial do feixe. Baseado em estudos teóricos, sabe-se que esta estabilidade depende de uma série de fatores construtivos e operacionais. Foi proposto então, desenvolver uma metodologia e instrumental de ensaio adequados à obtenção experimental dos parâmetros que caracterizam a instabilidade espacial do feixe, e, a partir dos resultados obtidos, estudar soluções de otimização do laser quanto ao fator estabilidade do feixe.

Para uma melhor compreensão do comportamento do feixe laser, fez-se também um estudo teórico preliminar e sucinto da teoria do laser de He-Ne (cap. 2), um estudo mais detalhado do ressoador óptico (cap. 3) e uma análise experimental do perfil energético do feixe (cap. 4). No capítulo 5, fez-se uma descrição da instrumentação utilizada e um estudo sucinto dos fotodetectors.

Analisando-se o trabalho desenvolvido, pode-se então concluir basicamente que:

a) Quanto ao sistema de ensaio da estabilidade.

Visto que para a obtenção da posição do feixe num instante considerado, utilizando-se 2 fotodetectors de posição é necessário realizar a leitura de 8 sinais elétricos de forma praticamente simultânea, ficou evidente que a leitura manual de indicadores seria impraticável. Optou-se portanto para um sistema automatizado de medição, processamento e documentação, que se mostrou versátil e eficiente, para a obtenção das instabilidades.

b) Quanto aos resultados obtidos.

Os resultados obtidos dos ensaios realizados sob diferentes

condições operacionais do laser, foram considerados satisfatórios e em concordância com as previsões feitas com base nos estudos teóricos. Foi constatado que a estabilidade é função da forma construtiva do laser, bem como das condições operacionais.

Com relação ao laser "LAB-1", os resultados foram relativamente prejudicados, em função do mesmo ter atingido praticamente o final do seu tempo de vida útil, fato demonstrado pela progressiva instabilidade da potência do feixe gerado.

c) Quanto à validade dos ensaios.

Considerando a importância da estabilidade do feixe no laser de alinhamento, considera-se de grande valia realizar ensaios de instabilidade no local e nas condições em que são feitos os ensaios de retilineidade, para avaliar quantitativamente a instabilidade do feixe e, a partir desses resultados, dimensionar o sistema óptico mais adequado e fixar as características metrológicas do sistema para efeito de validação dos ensaios de retilineidade.

d) Quanto à sugestão para futuros trabalhos.

Apesar dos resultados obtidos neste trabalho terem sido satisfatórios quanto aos objetivos propostos, algumas sugestões para um aprofundamento dos estudos tornaram-se evidentes:

- estudar a influência do banco óptico sobre os resultados de instabilidades do feixe, em função de deformações do mesmo, devido às variações de temperatura causadas pela irradiação do calor proveniente do laser, e por outros fatores, durante o transcorrer de um ensaio.
- estudo teórico-experimental mais aprofundado dos fotodiodos, considerando-se a incerteza de medição dos mesmos, bem como de seus erros de linearidade em função da distância do centro elétrico do fotodiodo à posição de incidência do feixe. Estes erros uma vez conhecidos dão

origem a fatores de correção das medidas e asseguram melhores resultados.

- estudo teórico-experimental do desempenho do laser operando em posições distintas da horizontal, como restringido neste estudo em função de sua aplicação usual.
- estudo detalhado das dimensões do suporte de alumínio, do tipo utilizado no "LAB-1", considerando-se a deformação, dispersão do calor e peso do mesmo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 
- |01| SVELTO, O. "Principles of Lasers". New York: Plenum Press, 1976.
  - |02| KALLARD, T. "Exploring Laser Light". Optosonic Press, 1977.
  - |03| KOCK, W. E. "Engineering Applications of Laser and Holography".
  - |04| HEWLETT PACKARD. "Laser Transducer System". Catálogo de fabricante, 1977.
  - |05| TSI INCORPORATED. "Laser Velocimetry Systems". 1979.
  - |06| BREITMEIER, U. "Anwendung der Lichtbeugung in der Längenmess<sub>u</sub>technik". Messen und Prüfen, jun/1983.
  - |07| TRAPET, E. "Curso sobre Laser". Apostila, LABMETRO - UFSC, 1982.
  - |08| GONÇALVES JR., A. A. "Automatização da Medição de Deslocamentos pela Holografia Interferométrica". Diss. Mestrado - UFSC, maio/1984.
  - |09| VALENTINA, L. D. "Ensaio Geométricos de Máquinas-Ferramenta com Laser de Alinhamento". Diss. Mestrado - UFSC, abr/1986
  - |10| SCHNEIDER, C. A. "Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems zur Durchführung Geometrischer Prüfungen in Maschinenbau". Doktor - Ingenieurs genehmige Dissertation, nov/1978
  - |11| SILVA, A. D. "Ensaio Geométricos de Peças e Máquinas - uma Metodologia Automatizada". Diss. Mestrado - UFSC, 1984.
  - |12| HERZIGER, G. e Weber, H. "Laser - Grundlagen und Anwendungen" Weinheim: Physik Verlag, 1978.
  - |13| FOWLES, G. R. "Introduction to Modern Optics". New York: Holt Rinehart and Winston, Inc., 1975.
  - |14| MELLES GRIOT. "Optics Guide 3". 1985
  - |15| WHITE, A. D. "Power Fluctuations in He-Ne Lasers". Laser Focus/Electro-Optics, ago/1985.
  - |16| TRAPET, E. "Ein Beitrag zur Verringerung der Messunsicherheit von Fluchtungsmesssystemen auf Laserbasis". Doktor - Ingenieurs genehmige Dissertation, fev/1982.

- [17] CHIBA, T. "Spot Dancing of Laser Beam Propagated Through the Turbulent Atmosphere". Applied Optics - volume 10, nº 11, nov/1971.
- [18] KURIGER, W. L. "Technique for Measuring Laser Beam Propagation Direction Fluctuations". Applied Optics - volume 10, nº 11, nov/1971.
- [19] KLAUMINZER, G. K. "Twenty Years of Commercial Laser - A Capsule History". Laser Focus/Electro-Optics - volume 20, nº 12, dez/1984.
- [20] SOUZA, A. R. "Estudo da Influência do Hidrogênio no Funcionamento de um Laser de He-Ne". Diss. Mestrado - UFSC, 1980.
- [21] PALECKI, S. "Helium-Neon Lasers - Reliability and Lifetime". Laser & Applications, set/1982.
- [22] PATEL, B. "The Helium-Neon Laser: What it is and how it works". Photonics Spectra - volume 17, nº1, jan/1983.
- [23] TRADOWSKI, K. "Laser - Technik: Kurz und Bündig". Würzburg : Vogel - Verlag, 1983.
- [24] SPECTRA PHYSICS. Manual de Instrução do Laser de He-Ne modelo SP 120.
- [25] NRC-NEWPORT RESEARCH CORPORATION. Catálogo de Componentes Ópticos, 1977-1978.
- [26] UDT-UNITED DETECTOR TECHNOLOGY. "Position Sensing Detectors"
- [27] HEIDENHAIN, J. Transdutor Deslocamento - MT-30, com indicação digital.
- [28] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK. Ponte Amplificadora e Transdutor Deslocamento.
- [29] SPINDLER & HOYER. "Optische Bänke aus Granit Feinstell - Elemente". Liste MCH, jul/1977.
- [30] SPINDLER & HOYER. "Feioptische Bauelemente". 1977.
- [31] HEWLETT-PACKARD. "Data Acquisition/Control Unit Operating and Service Manual". jun/1981.
- [32] HEWLETT-PACKARD. "HP IB - Interface/Instalation and Service Manual". 1981.

- |33| HEWLETT-PACKARD. "HP 9825A - Calculator Operating and Programming". 1977.
- |34| HEWLETT-PACKARD. "Printer; Operating and Service Manual".
- |35| HEWLETT-PACKARD. "Graphics Plotter; Operating and Service Manual". 1977.
- |36| INTEGRATED PHOTOMATRIX. "Handbook of Integrated Optoelectronic Devices and Systems".
- |37| INTRATOR, E. e MELLO, H. A. "Dispositivos e Semicondutores". Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. - 4ª edição, 1981.
- |38| MILMAN - HALKIAS. "Eletrônica - volume 1". Mc Graw-Hill, 1981
- |39| EG & G. "Electro-Optics Division". Application Notes B300B-1 maio/1973.
- |40| SCHNEIDER, C. A. "Sistemas de Medição". Apostila do Curso de PGEM - UFSC, 1982.
- |41| SCHNEIDER, C. A., LUCKE, H. A. H. e SCHOELER, N. "Calibração de Sistemas de Medição". Apostila ENATEM - LABMETRO - UFSC, 1982.
- |42| CW RADIATION, INC. "He-Ne Laser System. Model LSR5P". Instruction Manual.
- |43| SPECTRA PHYSICS. "He-Ne Laser Model 145". Instruction Manual
- |44| SCIENTIFICA AND COOK ELECTRONICS LTD. "He-Ne Laser System".
- |45| CENTRONIC. "Silicon Photodetectors PD/065-069/".1978.