

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO,  
APLICADO A ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE PEÇAS E/OU MÁQUINAS DE  
PRECISÃO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA**

**LUIS FRANCISCO MARCON RIBEIRO**

**FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO 1994**

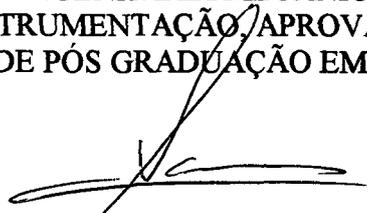
**“DESENVOLVIMENTO DE UMA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO,  
APLICADO À ENSAIOS GEOMÉTRICOS DE PEÇAS E/OU MÁQUINAS DE  
PRECISÃO”.**

**LUIS FRANCISCO MARCON RIBEIRO**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

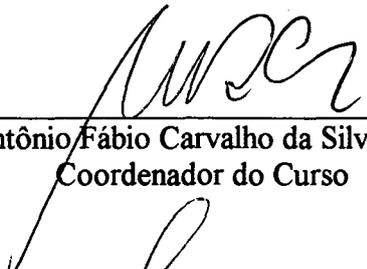
**MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
METROLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



---

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.  
Orientador



---

Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.  
Orientador



---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.



---

Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr. Ing



---

Eng. Marcelo Ferreira Guimarães, M. Eng.

## AGRADECIMENTOS

- À Fundação CERTI e LABMETRO pelo apoio prestado através de seu suporte financeiro e sua infra-estrutura de pessoal e laboratórios;
- Ao CNPq/RHAE (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento) pelo apoio financeiro;
- Ao professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação e incentivo durante a realização deste trabalho;
- Ao professor Günter Höhne, pela sua coorientação nos trabalhos de projeto, durante o período em que esteve no Brasil;
- Aos engenheiros Antônio Carlos Zimmermann e Marcelo Ferreira Guimarães, pelo imenso suporte técnico e incentivo no desenvolvimento do trabalho;
- À Albert Milla e Élder Stringari, pelo auxílio durante os trabalhos experimentais.
- E, por fim, um agradecimento aos colegas da pós-graduação pelo companheirismo e amizade, e a todos os colaboradores da Fundação CERTI que de forma direta ou indireta contribuíram para que este trabalho tivesse êxito.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 IMPORTÂNCIA DA ESTABILIDADE DA RETA PADRÃO.....	4
1.2 DIRETRIZES DO TRABALHO.....	6
<b>2 A GERAÇÃO DA RETA PADRÃO.....</b>	<b>7</b>
2.1 A UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO.....	7
2.1.1 Características Desejáveis para uma Unidade Geradora da Reta Padrão.....	8
2.1.2 Estrutura Funcional Básica.....	10
2.1.3 O Gerador do Feixe Laser.....	11
2.1.4 O Perfil Energético do Feixe Laser.....	13
2.2 FONTES DE INSTABILIDADE DA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO.....	16
2.2.1 Fontes de Natureza Mecânica.....	18
2.2.2 Fontes de Natureza Térmica.....	18
2.2.3 Fontes de Natureza Física.....	19
2.2.4 Fontes de Natureza Elétrica.....	20
2.3 ESTRUTURA FUNCIONAL DO PROTÓTIPO.....	21

<b>3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DA UNIDADE GERADORA DA</b>	
<b>RETA PADRÃO.....</b>	<b>24</b>
3.1 CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	24
3.1.1 O Módulo de Geração do Laser.....	25
3.1.2 Módulo de Colimação.....	28
3.1.3 Módulo de Suporte.....	35
3.1.4 Módulo de Proteção Térmica.....	47
3.1.5 Módulo de Ajustes e Fixação.....	52
3.1.6 Módulo de Proteção Mecânica.....	57
3.1.7 Integração dos Módulos.....	60
3.2 ANÁLISE TEÓRICA DE ERROS.....	61
3.2.1 Avaliação de Erros Sistemáticos.....	61
3.2.2 Avaliação de Erros Aleatórios.....	68
3.3 PLANOS DE AJUSTAGEM.....	71
3.3.1 Ajuste de Alinhamento do Conjunto Laser-Telescópio.....	71
3.3.2 Ajuste de Alinhamento da Reta Padrão.....	74
<b>4 INSTRUMENTAÇÃO PARA QUALIFICAÇÃO DA UNIDADE GERADORA</b>	
<b>DA RETA PADRÃO.....</b>	<b>77</b>
4.1 MÉTODO PARA MEDIÇÃO DA INSTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE	
LASER.....	77
4.1.1 Definição do Modelo Ideal para Medição.....	77
4.1.2 Definição do Modelo Adotado.....	81
4.2 INFRA-ESTRUTURA PARA ENSAIOS.....	82

4.2.1 A Bancada.....	82
4.2.2 Componentes Mecânicos e Ópticos.....	84
4.2.3 O Sistema de Medição de Deslocamentos.....	87
4.2.4 O Sistema de Medição de Temperatura.....	92
4.2.5 O Computador.....	95
<b>4.3 AUTOMAÇÃO DA MEDIÇÃO.....</b>	<b>96</b>
4.3.1 O <i>Software</i> de Medição da Instabilidade Espacial do Feixe.....	97
4.3.2 O <i>Software</i> de Medição de Temperaturas.....	101
<b>5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>102</b>
5.1 ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO.....	102
5.1.1 Influência dos Transladadores.....	104
5.1.2 Influência da Carcaça.....	104
5.1.3 Influência da Ventilação Forçada.....	108
5.1.4 Influência do Gerador Laser e Elementos Mecânicos Associados.....	109
5.1.5 Influência da Posição Radial de Fixação do Gerador Laser no Suporte.....	109
5.2 ESTABILIZAÇÃO DA POTÊNCIA EMITIDA.....	116
5.3 ESTABILIZAÇÃO ESPACIAL DO FEIXE.....	117
5.3.1 Influência da Ventilação Forçada.....	117
5.3.2 Influência da Carcaça.....	124
5.3.3 Influência de Vibrações Mecânicas.....	125
5.3.4 Comportamento do Protótipo com Fixação na Posição Vertical.....	126
5.3.5 Ensaio de Aplicação do Protótipo.....	129

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>133</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>139</b>

## RESUMO

O constante desenvolvimento tecnológico tem ditado a necessidade de máquinas e instrumentos de medição e inspeção mais eficientes e inteligentes, orientados a objetivos de elevada produtividade e qualidade, com baixos custos. Mais especificamente na metrologia, a instrumentação mecaoptoeletrônica tem sido largamente utilizada, principalmente nas aplicações em processamento de imagens, ensaios geométricos e medição de deslocamentos.

O denominado "laser de alinhamento" é um sistema de medição que pertence a um grupo de sistemas a laser onde se utiliza a característica energética e de propagação do feixe laser como uma reta padrão, e tem sua principal aplicação voltada aos ensaios geométricos de peças e máquinas de precisão.

Apesar de sua versatilidade, sabe-se que grande parte da dispersão das medidas em ensaios geométricos, tem origem na incerteza de medição do laser de alinhamento, função da instabilidade espacial do feixe laser causado por fatores associados à qualidade dos elementos que compõem a unidade geradora do feixe e também às condições operacionais durante a medição.

Neste trabalho é apresentado um estudo de vários aspectos que envolvem a unidade geradora da reta padrão, a qual é constituída fundamentalmente por um laser de He-Ne, elementos ópticos de expansão e colimação do feixe, e dispositivos mecânicos com diferentes funções, tais como: fixação,

acoplamento, apoio e ajuste.

Um estudo das fontes de instabilidades da unidade geradora da reta padrão bem como os meios possíveis de solução são discutidos, e servem de subsídios para a definição de requisitos de uma unidade geradora da reta padrão genérica.

Um protótipo laboratorial foi projetado e construído, à partir do estudo detalhado dos requisitos metrológicos e operacionais previamente definidos, considerando a sua aplicação em ensaios geométricos. As diferentes soluções desenvolvidas para os subsistemas que configuram o conjunto do protótipo são apresentadas e discutidas.

Desenvolveu-se uma bancada de ensaios automatizada para a qualificação do protótipo, com especial atenção para a medição da variação de posição do feixe. A medição é feita por meio de um fotodetector, associado a um sistema de aquisição de dados, que por sua vez é controlado por um microcomputador que também realiza o processamento e documentação dos resultados.

Diferentes formas de montagem do protótipo foram testadas e diferentes condições operacionais foram simuladas, visando uma completa avaliação do seu comportamento. A variação de posição do feixe, medida sob as melhores condições operacionais, ficou na ordem de  $\pm 1 \mu\text{rad}$  durante um período de 30 minutos. Este e outros resultados são apresentados e comentados neste trabalho.

## ABSTRACT

Nowadays, the necessity for high quality and productivity in the industry makes activities like the production inspection and industrial measurement very important.

Measuring machines and instruments are required to be more efficient and intelligent at low costs.

To attend those needs, the mecaoptoelectronics instrumentation, which integrates precision mechanics, optics and electronics, has been largely used in the industry, specially in the applications in image processing, geometrical evaluations of precision machines and displacement measurements.

A mecaoptoelectronics instrument called "alignment laser system", is a measurement system where a spatial stabilized collimated laser beam is used as a standard for straightness measurement. Its principal application is in precision machine assembly and qualification.

Although its versatility, it is very well known that the major part of the error sources in the alignment laser system, is caused by the laser beam spatial instability, associated to the quality of the elements, which compose the beam generating unit, and also due to the change of the environmental conditions during the measurement process.

In this work, we present a study of the several project aspects of the beam generating unit, which is fundamentally composed by a He-Ne-laser, optical elements of expansion and collimation of the beam and mechanical devices with different functions, such as: fixture, coupling, support and adjustment.

A study of the instability sources of the beam generating unit and the possible means of solution are analysed and discussed.

A laboratorial prototype was designed and built, starting from a detailed study of the metrological and operational requirements, previously defined, considering the application in machine tool geometrical evaluations. The different solutions, developed for the parts of the prototype, are presented and discussed.

An automatic testing bench was developed for the prototype qualification, with special attention for the measurement of the laser beam spatial deviations.

The measurements are made by the means of the fotodetector associated to a data acquisition system, which is controlled by a PC computer. The PC also realizes the data processing and the result documentation.

Different forms of the prototype assembly were tested and different operational conditions were simulated in order to evaluate its performance. The angular laser beam deviation, measured with the best operational conditions at the laboratory, was in the order of  $\pm 1 \mu\text{rad}$  during a period of thirty minutes. These and other results are presented and commented in this work.

**GLOSSÁRIO**  
**DAS SIGLAS E ACROGRAFIAS ADOTADAS NO TEXTO**

SIGLA	INGLÊS	PORTUGUÊS
AC	Alternating Current	corrente alternada
A/D	Analog-to-Digital Converter	conversor analógico-digital
ASCII	American National Standard Code for Information Interchange	padrão nacional americano de código para intercâmbio de informação
CPU	Central Processing Unit	unidade central de processamento
DAS	Data Acquisition System	sistema de aquisição de dados
DC	Direct Current	corrente contínua
GPIB	General-Purpose Interface Bus	interface de barramento para usos gerais
MS	Measurement System	sistema de medição
MUX	Multiplexer	multiplexador
PC	Personal Computer	computador pessoal
PCI	Personal Computer Instrumentation	instrumentação para computador pessoal
S/H	Sample-and-Hold	-
SC	Signal Conditioner	condicionador de sinal ou unidade de tratamento de sinal

## 1 INTRODUÇÃO

No desenvolvimento tecnológico moderno, tem havido uma tendência de integração de elementos de diversos campos do conhecimento humano. Mais especificamente na metrologia, no domínio da instrumentação e na construção de sistemas físicos avançados, isso se faz sentir com a integração de elementos mecânicos, ópticos, elétricos, eletrônicos, associados ao *software*. Dai o surgimento de um novo termo dentro da engenharia - a mecaoptoeletrônica - que integra essas tecnologias.

O desenvolvimento da mecaoptoeletrônica tem sido consequência da necessidade de máquinas e instrumentos de medição e inspeção mais eficientes e inteligentes, orientados à objetivos de elevada produtividade e qualidade com baixos custos, ditados pelo desenvolvimento industrial. Componentes optoeletrônicos são usados hoje na maioria dos ramos da indústria e da vida cotidiana, e entre os grupos de aplicação está a medição.

Em particular, o termo optoeletrônica, é hoje compreendido como geração e captação de radiação eletromagnética na faixa do comprimento de onda óptico (ultravioleta, infravermelho e visível) e sua conversão em sinais elétricos. Dois componentes básicos são necessários - uma fonte de radiação como emissor e um conversor fotoelétrico como receptor. Componentes que emitem ou são detectores de radiação nesta faixa do espectro são definidos como "componentes optoeletrônicos" /1/.

Dentro deste contexto, a instrumentação mecaoptoeletrônica é largamente utilizada na indústria, principalmente, devido às suas características de sensoriar sem contato mecânico e rapidez, por exemplo, em processamento de imagens, ensaios geométricos e medição de deslocamentos.

Dentre os ensaios geométricos, o ensaio de retilineidade e seus conjugados (ortogonalidade, paralelismo, alinhamento, planicidade, etc.), têm importância fundamental na qualificação do desempenho geométrico de máquinas-ferramenta /2,3/.

Sistemas a laser para aplicações na metrologia têm sido constantemente estudados e desenvolvidos para a indústria /2,4-26/. Este grande interesse na tecnologia de lasers se deve fundamentalmente às suas características de direcionalidade, monocromaticidade, coerência temporal e espacial, as quais garantem uma grande versatilidade e aplicabilidade.

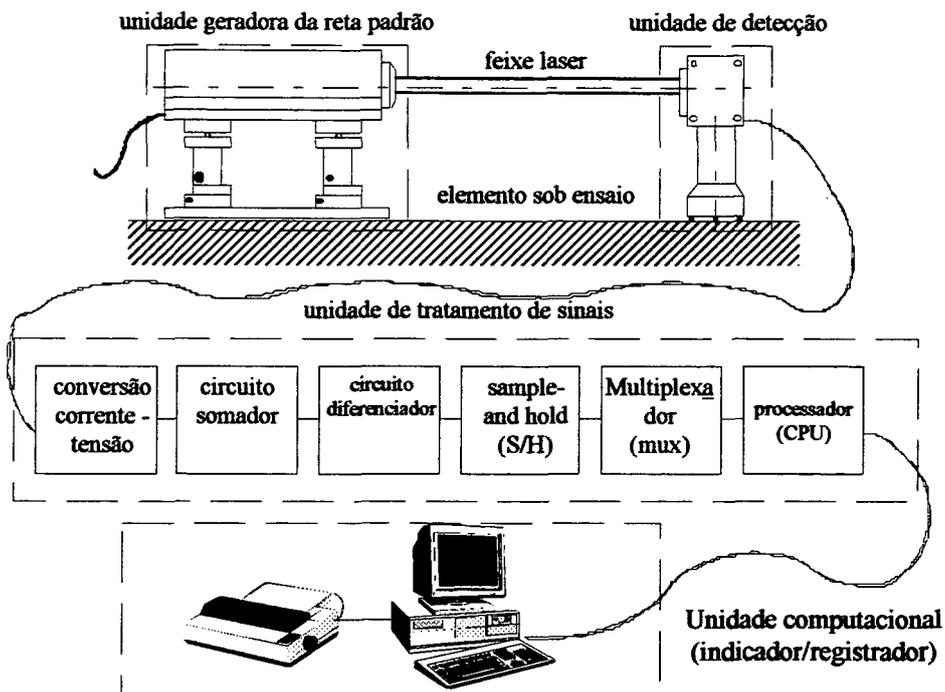
O denominado "laser de alinhamento" /7/ é um sistema de medição que pertence ao grupo dos sistemas a laser onde se utiliza a característica energética e de propagação do feixe laser (o outro grupo é o dos instrumentos que operam com o princípio da interferometria), e tem sua principal aplicação voltada aos ensaios geométricos de máquinas-ferramenta.

O laser de alinhamento estabelece uma reta padrão (feixe laser) e possui um transdutor de deslocamentos (fotodetector bidirecional de posição) para determinar os afastamentos relativos entre a reta padrão e o elemento sob ensaio (fig. 1.1). Esta reta é estabelecida utilizando-se uma unidade geradora constituída de um laser a gás, de baixa potência, que gera um feixe com diâmetro da ordem de 1 mm /2,21-23/, que, por sua vez, é ampliado e colimado. Ao incidir no fotodetector, são gerados sinais elétricos que permitem determinar a posição de incidência do feixe em relação aos eixos coordenados do plano do fotodetector. Os sinais elétricos são, após uma pré-amplificação, somados e

subtraídos respectivamente para cada eixo do fotodetector. Obtém-se então um sinal para cada eixo que é proporcional à posição do feixe incidente, relativamente ao centro do fotodetector.

O laser de alinhamento pode ser dividido em quatro unidades, que são (fig. 1.1):

- Unidade geradora da reta padrão e feixe laser (padrão de referência);
- Unidade de detecção (transdutor);
- Unidade de tratamento de sinais;
- Unidade computacional (indicador/registrator).



**Figura 1.1- O Laser de Alinhamento.**

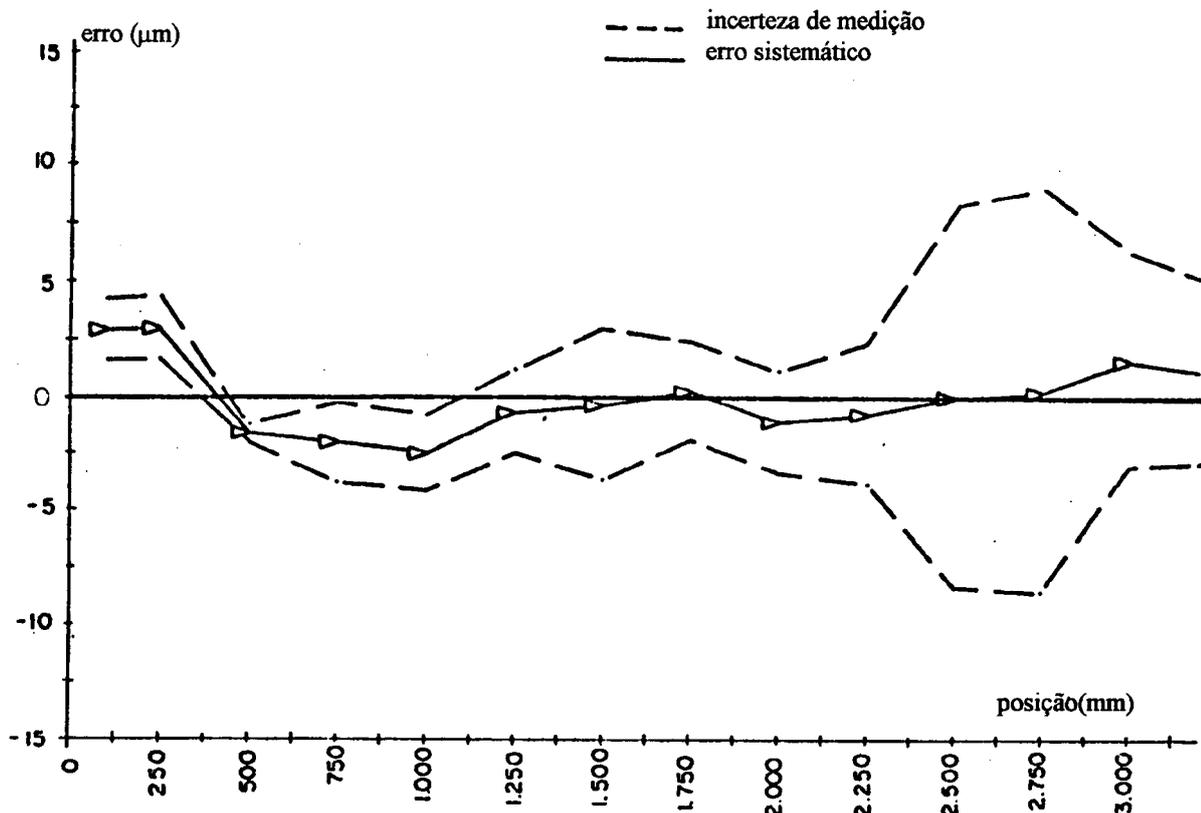
Fazendo-se uma comparação entre o laser de alinhamento e os sistemas de medição convencionais para ensaios geométricos, pode-se verificar várias características favoráveis ao laser de alinhamento /2,4,6-10,14,20,23-25/. Entre estas características pode-se destacar: uma reta de referência imaterial; medição simultânea dos desvios nas duas componentes ortogonais; a possibilidade de formar um padrão para medição de ortogonalidade; facilmente automatizável.

## 1.1 IMPORTÂNCIA DA ESTABILIDADE DA RETA PADRÃO

Em instrumentos cujo eixo energético do feixe laser é tido como um padrão físico de retilineidade, o parâmetro essencial de qualidade, consiste da estabilidade do eixo de direcionalidade da radiação /7,13,14,19/. Esta estabilidade depende das condições operacionais durante a aplicação e de fatores associados à qualidade dos elementos que compõem a unidade geradora do feixe /2,7,13-15/.

Sabe-se que a instabilidade do laser de alinhamento contribui com grande parte da dispersão das medidas em ensaios geométricos, por sua vez estas instabilidades têm origem, principalmente, na instabilidade espacial do feixe laser. Na figura 1.2 tem-se a curva de erros de retilineidade de trajetória do carro de uma máquina de medir comprimentos, ensaiada com um laser de alinhamento em condições ambientais de laboratório. Devido às suas características construtivas, a máquina ensaiada em condições ambientais rigorosamente controladas, apresenta uma estabilidade dimensional que pode servir como uma referência. Nestas circunstâncias, a dispersão das medidas registradas, podem ser atribuídas, basicamente, ao laser de alinhamento. No gráfico é visível o aumento da dispersão da medição com a posição, caracterizando a existência de uma componente angular de instabilidade do feixe, que provoca um aumento dos erros na medição à medida que se aumenta a distância de medição.

Em função da influência destas instabilidades nas medições, torna-se importante desenvolver meios adequados de otimização da estabilidade espacial do feixe, que diminuam a incerteza de medição do sistema e permitam a aplicação deste a ensaios de elementos geométricos com tolerâncias da ordem de milésimos de milímetro, comuns em máquinas modernas.



**Figura 1.2-** Ensaio de retilidade de uma máquina de Abbé em ambiente laboratorial /23/.

A figura 1.3 apresenta uma tabela com os requisitos metroológicos exigidos de um laser de alinhamento para aplicações em ensaios geométricos de peças e máquinas de precisão, em diferentes faixas de operação /27/.

Faixa de Operação Longitudinal [m]	Faixa de Operação Transversal [ $\mu\text{m}$ ]	Resolução [ $\mu\text{m}$ ]	Incerteza de Medição [ $\mu\text{m}$ ]
0...2	$\pm 200$	0,1	$\pm(0,5+L/2000)$
0...5	$\pm 500$	0,2	$\pm(1+L/1000)$
0...30	$\pm 2000$	1	$\pm(3+2,5L/1000)$

*L ... é a distância entre a unidade geradora da reta padrão e a posição de medição, em mm.*

**Figura 1.3-** Requisitos metroológicos do laser de alinhamento, para ensaios geométricos de peças e/ou máquinas de precisão /27/.

## 1.2 DIRETRIZES DO TRABALHO

No contexto deste trabalho definiu-se a unidade geradora da reta padrão como o objeto principal de estudo, onde se localizam as principais causas da instabilidade espacial do feixe laser, conforme sustenta a literatura apontada /2,7,13-15,21,23,24/.

Os objetivos definidos envolvem os seguintes pontos: o estabelecimento de uma metodologia de estabilização do gerador da reta padrão; desenvolvimento de um protótipo laboratorial da unidade geradora da reta padrão que atenda, no entanto, requisitos desejáveis para aplicação industrial; desenvolvimento de um banco de ensaios da estabilidade do feixe laser; organização de conclusões e recomendações técnico-científicas relevantes.

Na busca de tais objetivos, estabeleceu-se as seguintes etapas:

- Estudo detalhado da unidade geradora da reta padrão com identificação das principais fontes de instabilidade.
- Análise teórica de erros e projeto do protótipo.
- Fabricação e montagem de um protótipo.
- Estudo e implementação de uma bancada automatizada para avaliação experimental do protótipo.
- Ensaios de avaliação do protótipo em ambiente laboratorial.

## **2 A GERAÇÃO DA RETA PADRÃO**

O estudo detalhado dos aspectos que envolvem a geração do feixe laser é o primeiro passo no encaminhamento do trabalho, e como complemento deste, pode ser feito o levantamento das fontes de instabilidade do gerador da reta padrão. Este estudo fornecerá subsídios para a definição dos requisitos do protótipo da unidade geradora da reta padrão a ser desenvolvido.

### **2.1 A UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO**

A unidade geradora da reta padrão pode ser caracterizada através das suas funções principais: gerar um feixe laser estável espacialmente, feixe colimado e limpo na faixa de operação longitudinal, e promover o acoplamento e o ajuste deste feixe em relação ao objeto sob teste. A constituição fundamental de uma unidade geradora da reta padrão, semelhante à mostrada na figura 2.1, é:

- Gerador laser de He-Ne;
- Elementos ópticos de expansão e colimação do feixe;
- Dispositivos e elementos mecânicos com diferentes funções, tais como: suporte, fixação, acoplamento, apoio e ajuste.

A literatura /2,4,5,14,19,21,23,28-34/ sempre relaciona o bom desempenho de uma unidade geradora

da reta padrão a um projeto cuidadoso dos dispositivos mecânicos e ópticos e montagem rígida do conjunto, com requisitos de precisão elevados, além de baixo custo e funcionamento confiável em ambiente hostil. É salientado ainda, que a reta padrão, quando da sua aplicação em ensaios de trajetória, deve ser posicionada de forma a permitir a simulação do processo, sendo fundamental para isso elementos apropriados de adaptação ao elemento sob ensaio e que garantam versatilidade na preparação dos ensaios.

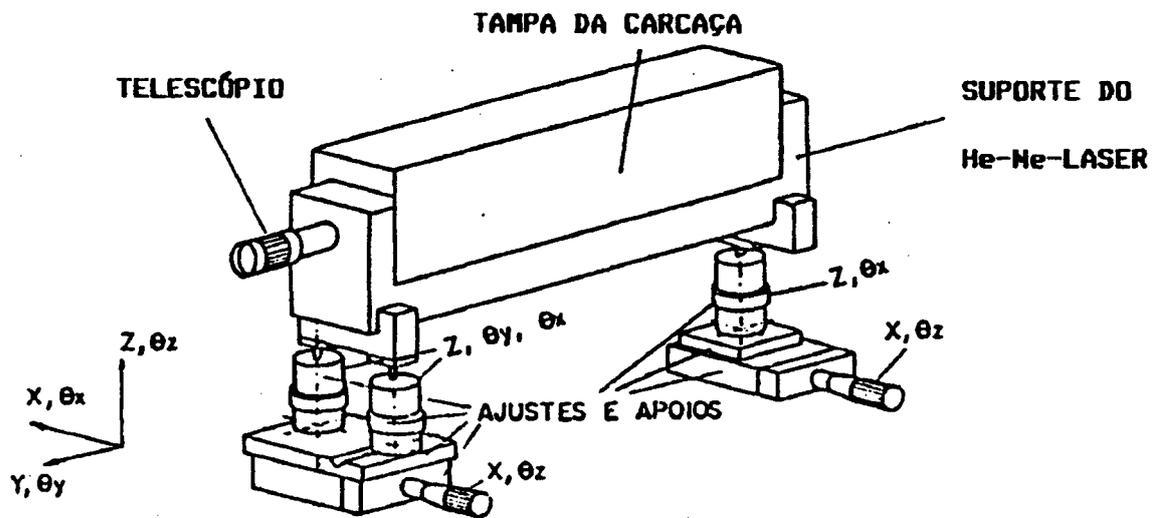


Figura 2.1- Exemplo de uma unidade geradora da reta padrão /2/.

### 2.1.1 Características Desejáveis para uma Unidade Geradora da Reta Padrão

Considerando a aplicação voltada à ensaios geométricos de máquinas-ferramenta alguns requisitos gerais podem ser citados:

- Gerar um feixe espacialmente estável de forma a atender os requisitos metroológicos das aplicações em ensaios de elementos de precisão. Nesse caso o sistema de medição deve ter uma incerteza de

medição dada por /2,21/:

$$Im = \pm \left( 0,5 + \frac{L}{1000} \right) \quad (2.1)$$

onde  $Im$  é a incerteza de medição em  $\mu\text{m}$ , e  $L$  é a distância entre a unidade geradora da reta padrão e a posição de medição, em mm.

- b) É desejável a utilização do feixe numa faixa longitudinal de 0 a 30 metros, com as suas características energéticas e de propagação otimizadas para esta faixa, mediante um projeto óptico adequado. Diâmetro, perfil do feixe e potência constante ao longo dessa distância.
- c) O ajuste de alinhamento inicial do feixe deve convergir para dentro de um campo igual a  $\pm 20\%$  da faixa de operação transversal, para que se utilize a região mais central do fotodetector, que possui características melhores de linearidade.
- d) Como o desenvolvimento de uma unidade geradora da reta padrão está intimamente relacionada às suas aplicações, é importante a consideração da versatilidade de montagem dos elementos funcionais do conjunto bem como a sua funcionalidade e conforto no uso.
- e) É desejável pequenas dimensões e peso, características também relacionadas com a sua versatilidade na aplicação.
- f) Deve considerar aspectos de segurança, uma vez que já existem normas internacionais específicas direcionadas à esses sistemas /35/.
- g) Facilidade de manutenção pode representar uma característica fundamental quando o sistema incorpora elementos ópticos que necessitam troca ou limpezas regulares, ou até mesmo uma possível troca da fonte de laser.
- h) Ser insensível às variações ambientais de temperatura, pressão, vibrações, sujeiras, etc.

### 2.1.2 Estrutura Funcional Básica

Partindo-se do conhecimento do princípio de funcionamento da unidade geradora da reta padrão e de funções principais, desenvolve-se um primeiro nível de abstração da estrutura funcional básica, representada de forma esquemática na figura 2.2, e define-se os seus módulos da seguinte forma:

- Módulo de geração do laser
- Módulo de colimação
- Módulo de suporte
- Módulo de proteção térmica
- Módulo de ajustes e fixação
- Módulo de proteção mecânica

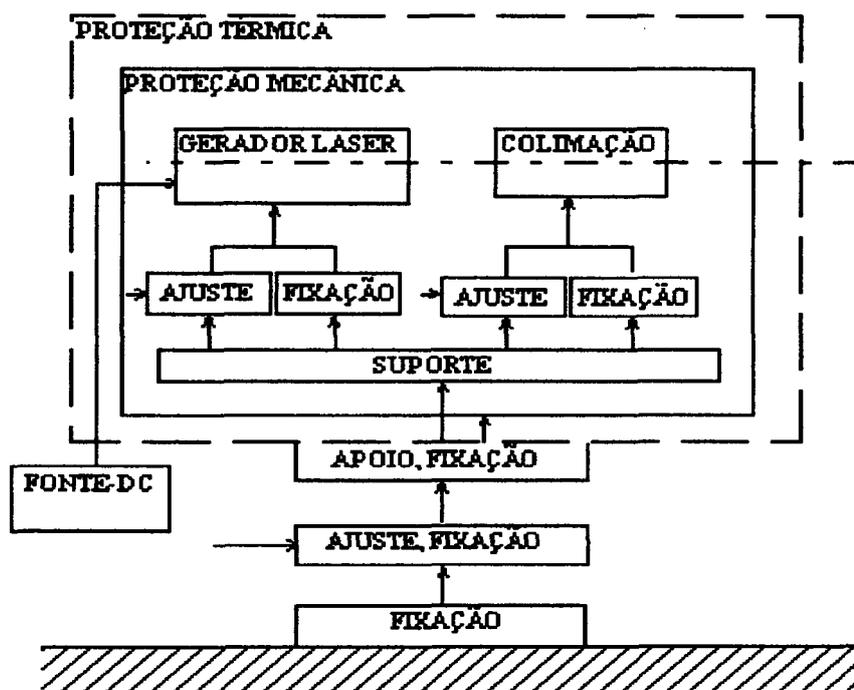


Figura 2.2- Estrutura funcional básica.

### 2.1.3 O Gerador do Feixe Laser

Muitos critérios podem ser usados para a classificação de um laser, mas existem dois que são baseados na sua operação: tipo do meio ativo e método de excitação /36/.

Seguindo o critério do tipo do meio ativo, classificam-se os lasers como: lasers a gás, lasers do estado-sólido, lasers semicondutores e lasers a líquido. Devido ao grande número de lasers a gás, é comum classificá-los ainda pelo mecanismo de excitação. Para lasers com outros tipos de meio ativo (diferentes gases, por exemplo), é a natureza do meio que geralmente dita a escolha do método de excitação /36/.

A figura 2.3 mostra uma configuração típica de um laser a gás de He-Ne.

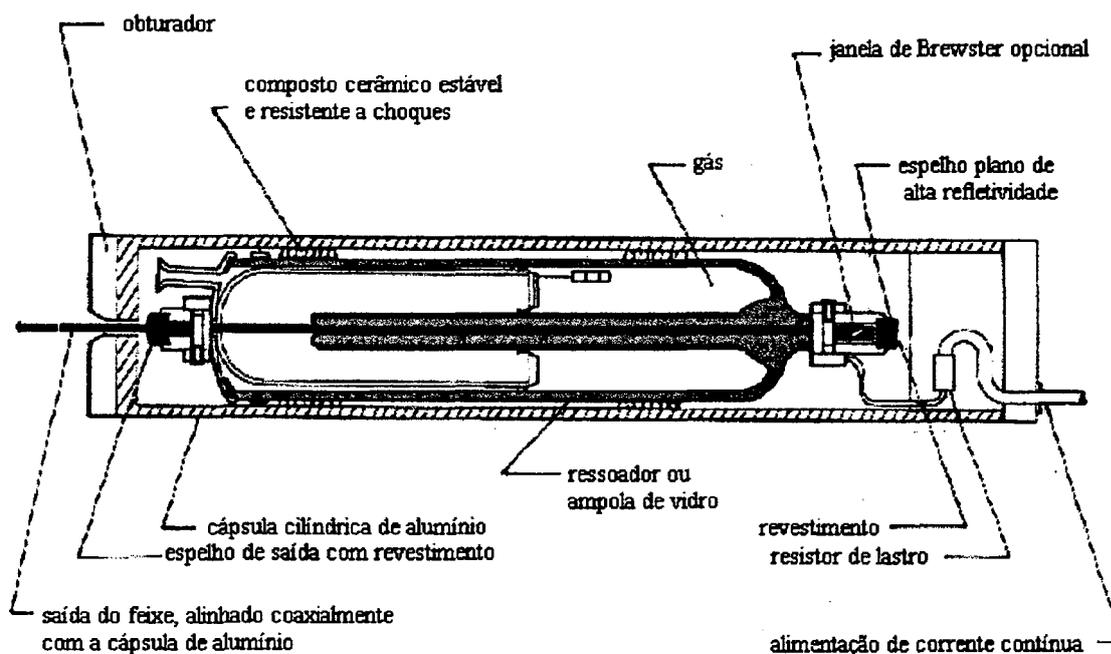


Figura 2.3- Configuração típica de um laser de He-Ne /37/.

Um laser de He-Ne possui dimensões maiores e consome mais potência que um diodo laser de preço comparável. Por outro lado, permite um fácil manuseio; tem uma boa qualidade de feixe, com melhores propriedades de coerência e colimação natural; existem comercialmente com diferentes comprimentos de onda; é igualmente resistente, e dentre os geradores laser é provavelmente o que possui a tecnologia melhor dominada /12,23,36,38/. Existem ainda outras vantagens, que são: a facilidade de aquisição no mercado e a grande variedade de apresentações e acessórios complementares /23/.

O diodo laser, apresenta como principal vantagem as suas pequenas dimensões; e, a nova geração dos diodo lasers já opera no visível (aproximam 630nm de comprimento de onda) e alcançam mais que 20 miliwatts de potência /38/. Mas para que esses lasers possam encontrar um nicho no mercado, dependerão largamente de seu custo de produção comparativo (não estão correntemente disponíveis ao mesmo preço e potência que os de He-Ne) e, naturalmente, de promover melhores características do feixe pois são astigmáticos e naturalmente não colimados /12,38/.

Como a tecnologia dos lasers de He-Ne continua sendo aperfeiçoada, um crescimento é esperado em diversas aplicações, e os maiores crescimentos são esperados na instrumentação, alinhamento, artes gráficas, e aplicações em impressão /38/, e por todas as vantagens citadas é que se manteve a opção pelo laser de He-Ne na concepção do protótipo.

Comparando-se um laser de He-Ne com um diodo laser, verificou-se distinções consideradas fundamentais e decisivas na opção por um deles. No entanto, com o rápido avanço da tecnologia dos diodo lasers, passado três anos da especificação do laser, algumas das justificativas apresentadas não se aplicam nos dias de hoje.

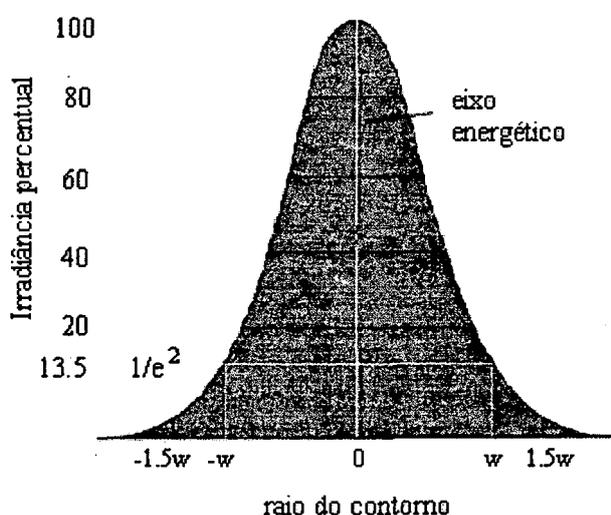
### 2.1.4 O Perfil Energético do Feixe Laser

Como a posição do feixe laser é definida pelo seu centro energético, e a instabilidade do feixe é caracterizada pelo deslocamento desse centro energético ao longo do tempo, torna-se fundamental o estudo desse perfil do feixe laser.

Lasers usados para alinhamento são projetados para operar no modo transversal fundamental (fig. 2.4), caracterizado idealmente por uma distribuição de irradiância (potência óptica por unidade de área) gaussiana, transversalmente ao feixe, tendo uma forma contínua e simétrica como a curva de distribuição normal dos erros em observações repetidas /10/. Desta forma uma distribuição é descrita por:

$$I(r) = I_o \times e^{-2 \times \left(\frac{r}{w}\right)^2} \quad (2.2)$$

onde:  $r$  é o raio do contorno circular da secção transversal do feixe;  $I_o$  é a irradiância máxima ( $r = 0$ );  $I$  é a irradiância a uma distância  $r$  radialmente ao eixo energético; e  $w$  é o raio do contorno circular da secção transversal do feixe onde a irradiância é 13,5% de  $I_o$ .



**Figura 2.4-**Distribuição gaussiana da irradiância do modo fundamental (TEM00) /37/.

A figura 2.5 ilustra alguns dos parâmetros de propagação do feixe no espaço. Na prática a distribuição é próxima à gaussiana possuindo uma configuração menos distorcida na região onde o contorno do perfil de energia se aproxima das assíntotas e onde a irradiância é baixa /10/.

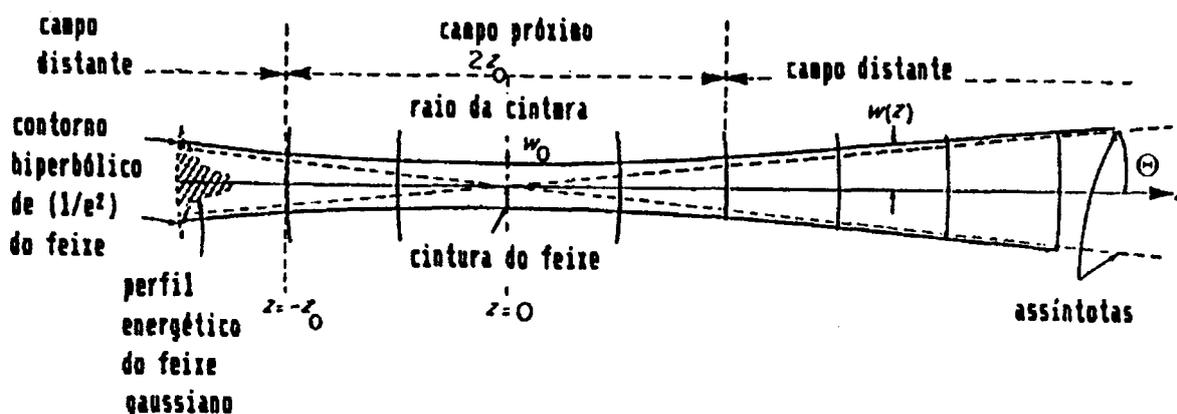


Figura 2.5- Parâmetros de propagação de um feixe gaussiano plotados no plano yz /39/.

Enquanto o feixe laser propaga, ele converge a um mínimo raio  $w_0$ , e então expande simetricamente, e a posição onde a dimensão é mínima é conhecida como cintura do feixe (*beam waist*) /10,29,30,37,39/.

O feixe apresenta também uma divergência natural (espalhamento da luz), causada pela difração da onda de luz expandindo transversalmente à sua propagação, sendo portanto impossível ter um feixe perfeitamente colimado. Detalhes sobre essa teoria são apresentados por Kogelnik /29/, e Kogelnik e Li /30/, e em muitos textos sobre lasers /10,37,39/.

O perfil energético do feixe observado a várias distâncias do gerador laser, apresenta-se como mostrado na figura 2.6, onde constata-se a expansão do feixe e a diminuição das distorções do perfil.

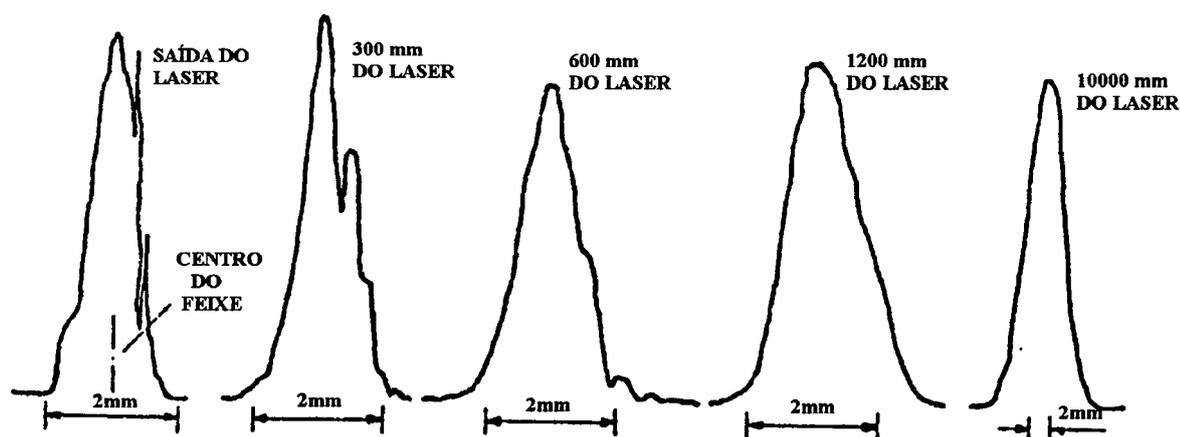


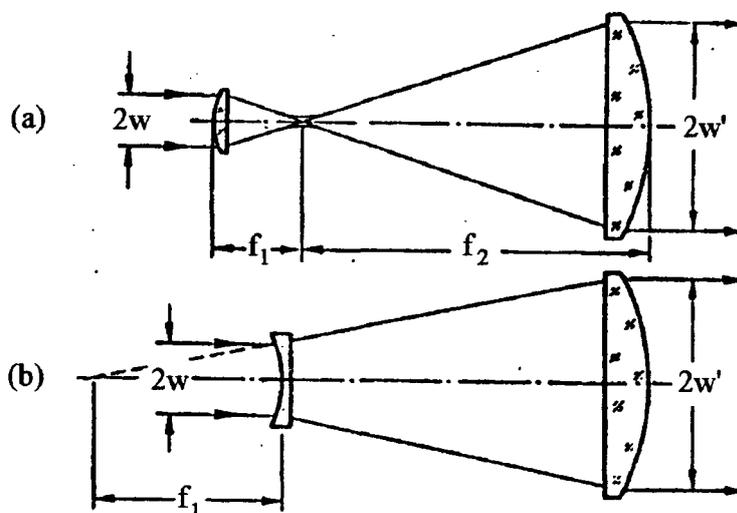
Figura 2.6- Variação do perfil energético do feixe, normalizado, em função da distância ao gerador laser /23/.

As irregularidades do perfil energético são comumente melhoradas por meio de conjuntos de lentes colocados no caminho óptico do feixe, prática bastante comum em sistemas de medição a laser /13,14,19/. As lentes atuam como transformadores da radiação original influenciando na localização espacial do eixo padrão de direcionalidade /19/.

A expansão do feixe laser, ou ampliação do diâmetro do feixe, revela muitas propriedades úteis. Dentre elas a mais útil propriedade de um feixe colimado e expandido é a sua baixa divergência. A proporção da divergência de um feixe expandido na saída em relação ao feixe de entrada é inversamente proporcional ao fator de expansão. Para isso são comumente usados expansores de feixe laser, que essencialmente são telescópios usados invertidos, e podem ser classificados dentro de duas categorias - kepleriano ou galileano /37/, os quais são mostrados na figura 2.7.

Os expansores de feixe galileanos são montados com uma lente divergente de entrada seguida por um grupo de lentes ou elemento colimador. Esse projeto tem algumas vantagens sobre o kepleriano, entre elas: o segundo grupo de lentes pode efetivamente cancelar aberrações esféricas induzidas pelo

primeiro; a configuração galileana conduz a um projeto do conjunto mais compacto, vantagem bastante significativa em aplicações onde tamanho e peso são requisitos importantes /37/.



**Figura 2.7-** Transformação provocada no feixe por: a) expansor kepleriano; b) expansor galileano /40/.

Expansores de feixe keplerianos empregam dois jogos de lentes convergentes. Esse projeto cria um ponto focal dentro do expansor. Essa configuração é apropriada para a utilização de um filtro espacial no ponto focal, útil em situações onde é desejável um feixe excepcionalmente "limpo" /37/.

## 2.2 FONTES DE INSTABILIDADE DA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO

Pode-se caracterizar o comportamento do feixe laser através da decomposição da sua variação espacial (ou variação de posição) em duas componentes, segundo dois planos ortogonais (fig. 2.8): a variação paralela ( $D$ ) e variação angular ( $\varphi$ ). Essa forma de caracterização é mais objetiva /2,13,14,21,23/.

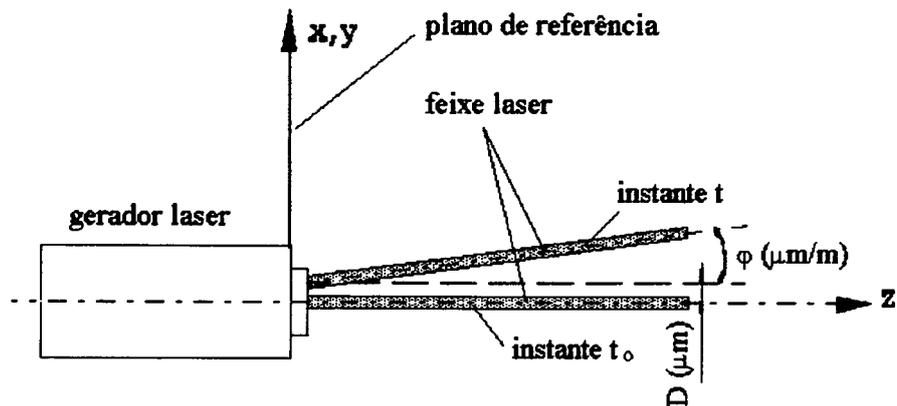


Figura 2.8- Componentes da instabilidade do feixe laser.

Uma outra forma de caracterizar a instabilidade, sendo essa mais comum em especificações técnicas de fabricantes de lasers, é através da caracterização da componente angular do deslocamento, em radianos, em um determinado instante, o *Beam Pointing Stability*, conforme ilustra a figura 2.9 ( $1\mu\text{m}/\text{m} \cong 1\mu\text{rad}$ ).

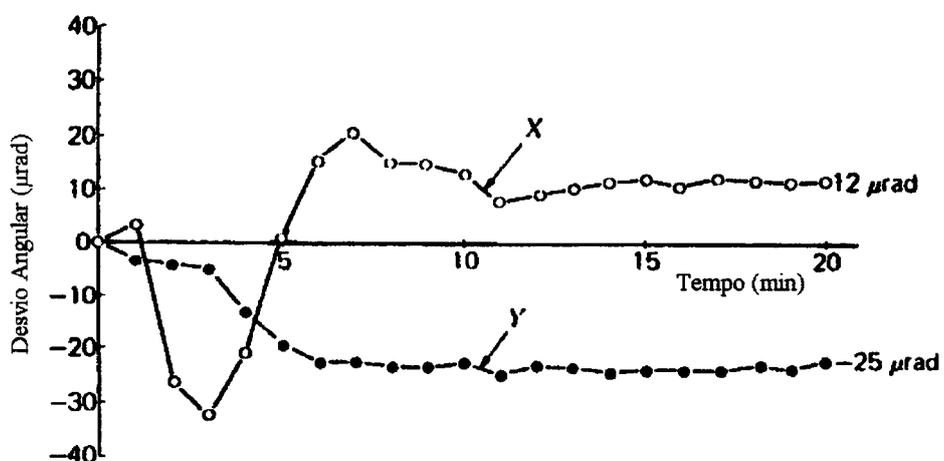


Figura 2.9- Desvio angular do feixe laser em função do tempo de operação /1/.

### 2.2.1 Fontes de Natureza Mecânica

As fontes de instabilidade de natureza mecânica estão de certa forma relacionadas à estabilidade espacial dos espelhos do ressoador (fig. 2.3), ou seja, a instabilidade tem origem nos deslocamentos dos espelhos, que podem ser causados por:

- falta de rigidez fixação dos espelhos /11-13,23,41,42/;
- instabilidade das bases de apoio, devido a esforços mecânicos e deformações /15,23,42/;
- choques mecânicos e/ou vibrações transmitidos aos espelhos /5,14,23/;
- deformações da estrutura transmitindo esforços à ampola de vidro (ressoador) - devido à massa, rigidez e fixações inadequadas /5,11,14,15,23/;
- erros de fabricação e montagem provocando erros de alinhamento /5,11,12,14,15,28/;
- deformações do encapsulamento do gerador laser e ampola de vidro /6,11,13,14,23/.

### 2.2.2 Fontes de Natureza Térmica

A maior parcela das instabilidades é de origem térmica, e está relacionada com a energia dissipada no ressoador do laser, que pode originar deformações diferenciadas na estrutura (dilatações), originando tensões mecânicas e deformações à toda a estrutura física /11,13,14,23,24,42/. A figura 2.10 ilustra essa influência.

Uma segunda parcela relaciona-se a mudanças bruscas na temperatura ambiente, que refrigeram o ressoador deformando-o e conseqüentemente originando tensões mecânicas indesejáveis. Essas mudanças bruscas podem ser provocadas por fluxos aleatórios de ar /6,13,14,23,24/.

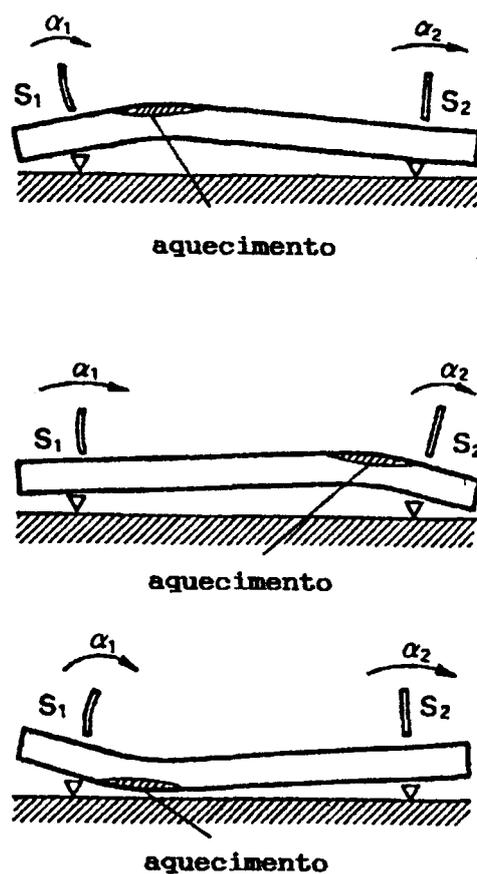


Figura 2.10- Influência do aquecimento diferenciado, provocando deformações também diferenciadas no suporte /42/.

### 2.2.3 Fontes de Natureza Física

As instabilidades dessa natureza estão relacionadas principalmente com a variação do perfil energético do feixe e variação de potência, as quais podem ter as seguintes causas /2,23/:

- variação da potência óptica do feixe em função de deslocamentos dos espelhos;
- difração da luz provocada por interferências do ambiente (poeira, etc.) sobre a superfície dos espelhos ou outras superfícies ópticas;
- absorção e dispersão da luz ao longo do caminho óptico por poeira dispersa, vapor, etc.

## 2.2.4 Fontes de Natureza Elétrica

As fontes de instabilidade de origem elétrica são principalmente originadas nas variações da tensão elétrica da rede, que por sua vez alimenta a fonte de corrente. São também originadas a partir de ruídos elétricos da fonte de alimentação de corrente contínua. No caso específico da variação da tensão de alimentação, podem surgir as seguintes perturbações /12,23,43-45/:

- variação da potência (fig. 2.11);
- variação da energia térmica com uma conseqüente variação de temperatura e dilatações indesejadas;
- expansão térmica do ressonador (fig. 2.12).

Os ruídos elétricos da fonte de alimentação, podem ser chamados de ruídos de descarga, e são transmitidos ao ressonador com conseqüentes perturbações de potência /23,45/.

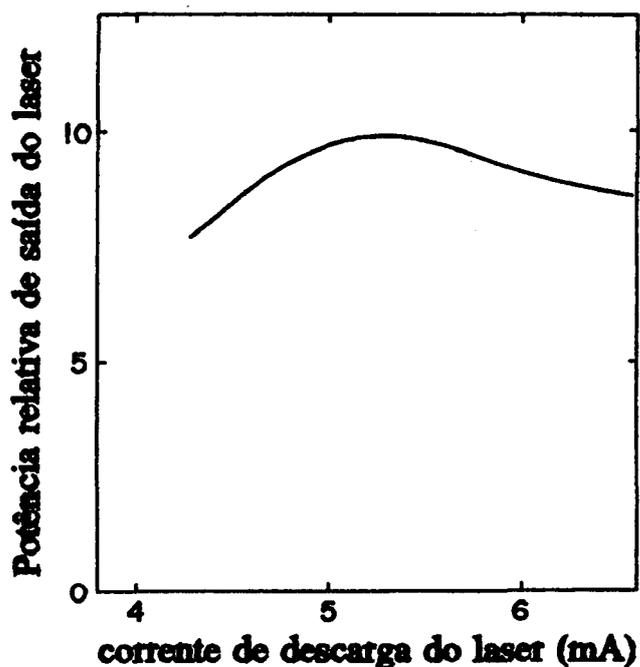


Figura 2.11- Variação da potência relativa de saída do laser em função da corrente de descarga /44/.

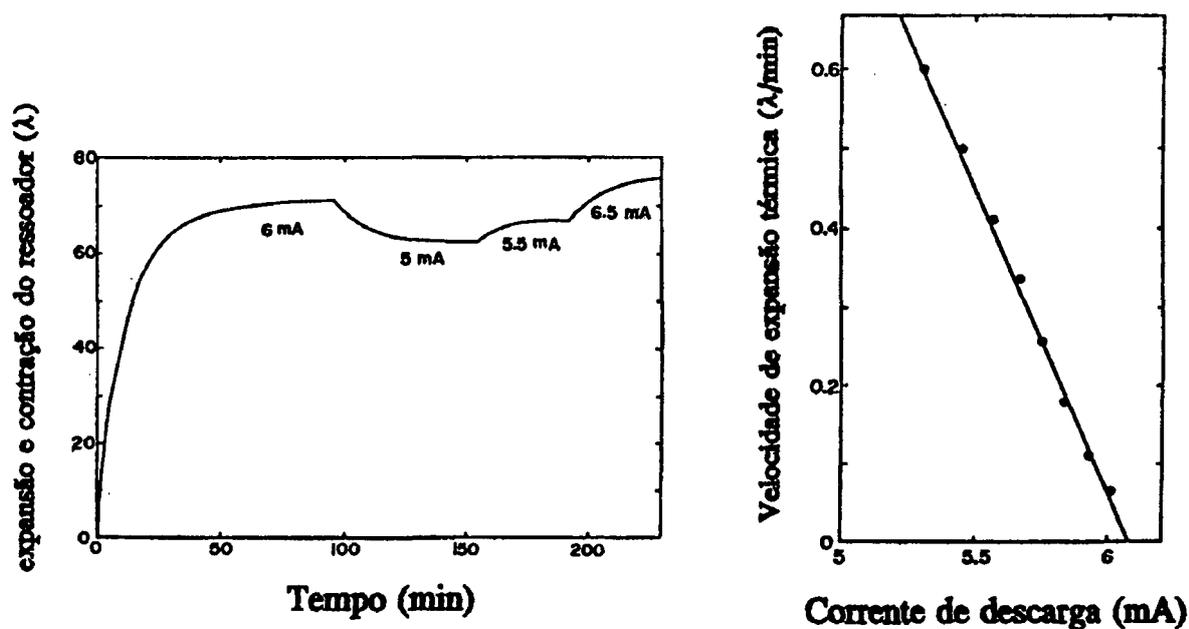


Figura 2.12- Influência da corrente de descarga do laser sobre o ressoador: a) expansão e contração; b) velocidade de expansão térmica /44/.

### 2.3 ESTRUTURA FUNCIONAL DO PROTÓTIPO

Antes de partir-se para a elaboração da estrutura funcional do protótipo, existe a etapa de definição dos requisitos individuais de cada módulo, requisitos estes que servem de subsídios para a definição da estrutura funcional.

Os requisitos relacionados baseiam-se no depoimento de usuários do laser de alinhamento e engenheiros envolvidos no projeto de um “laser de alinhamento”.

A figura 2.13 apresenta o levantamento dos requisitos de cada um dos módulos da unidade geradora da reta padrão, bem como a definição das possíveis soluções.

• REQUISITOS DOS MÓDULOS	• SOLUÇÕES PRINCIPAIS
<p><u>MÓDULO DE GERAÇÃO DO LASER:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• pequena divergência do feixe</li> <li>• potência compatível com fotodetector</li> <li>• boas características de estabilidade espacial do feixe (&lt;10<math>\mu</math>rad)</li> <li>• rigidez na fixação do ressoador (ampola de vidro)</li> <li>• intercambiabilidade de componentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• potência óptica 2 a 4mW</li> <li>• ressoador otimizado para estabilização térmica</li> <li>• fixação do ressoador através de elementos rígidos</li> <li>• modelo comercial</li> </ul>
<p><u>MÓDULO DE COLIMAÇÃO:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• expandir o feixe até um diâmetro de 2 a 5mm, adequado à área ativa do medidor de deslocamentos</li> <li>• manter a colimação do feixe dentro de limites adequados às aplicações (faixa de operação longitudinal de 30m)</li> <li>• diminuir a variação angular e a divergência</li> <li>• ter boa proteção contra interferências do ambiente</li> <li>• é desejável facilidade de limpeza</li> <li>• é desejável pequenas dimensões e massa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• usar um expansor de feixe (telescópio)</li> <li>• focalização ajustável</li> <li>• fácil acesso às lentes</li> <li>• evitar uso de filtro espacial</li> </ul>
<p><u>MÓDULO DE SUPORTE:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ser pouco sensível a variações térmicas</li> <li>• acoplar rigidamente o conjunto laser-telescópio</li> <li>• não transmitir esforços ao gerador laser</li> <li>• fonte de alimentação deve estar suficientemente longe do suporte</li> <li>• é desejável pequena massa para facilitar o <i>warm-up</i></li> <li>• prever ajuste de posição para o gerador laser</li> <li>• não permitir movimentos angulares do gerador laser em relação à superfície de medição</li> <li>• apoio isostático, com acoplamento cinemático</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• material com boa dissipação térmica</li> <li>• estrutura rígida e sem folgas</li> <li>• fixar o gerador laser conforme recomendações do fabricante</li> <li>• peças de alumínio e se possível com simetria</li> </ul>
<p><u>MÓDULO DE PROTEÇÃO TÉRMICA:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• estabilizar campo de temperaturas em torno do gerador laser</li> <li>• não deve transmitir ruídos à unidade geradora da reta padrão</li> <li>• reduzir o máximo possível o tempo de <i>warm-up</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ventilação forçada</li> <li>• fixar os dispositivos adequadamente</li> </ul>
<p><u>MÓDULO DE AJUSTES E FIXAÇÃO:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ter sensibilidade suficiente para atender os requisitos de alinhamento</li> <li>• a fixação não deve provocar esforços sobre o suporte e sobre o gerador laser</li> <li>• prever fixação em posições diferentes da horizontal</li> <li>• sistema de ajustes confortáveis</li> <li>• ter ajustes de translação e angulares independentes</li> <li>• ter travamentos adequados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• projeto adequado de dispositivos de ajuste e boa qualidade de fabricação</li> <li>• fixação com ímãs</li> <li>• um dispositivo de ajuste para cada grau de liberdade</li> </ul>
<p><u>MÓDULO DE PROTEÇÃO MECÂNICA:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• proteger contra interferências do ambiente</li> <li>• atender normas de segurança</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• carcaça fechada e vedada</li> <li>• uso de janela óptica</li> </ul>

Figura 2.13- Requisitos e soluções principais para o protótipo.

Com base nestes requisitos e ainda na estrutura funcional básica definida no item 2.1.2 (fig. 2.2), desenvolveu-se finalmente este segundo nível de abstração da estrutura funcional que irá nortear a etapa de configuração do protótipo.

A figura 2.14 apresenta esta estrutura funcional desenvolvida para o protótipo da unidade geradora da reta padrão, e nela estão representados elementos físicos do sistema (gerador laser, telescópio, fonte dc) bem como elementos funcionais que deverão constituir os diferentes módulos do sistema. Existem alguns elementos funcionais identificados como mecanismo de ajuste e que possuem pontos de acionamento (acionamentos de entrada  $S_x$  e  $S_y$ ). Esses acionamentos de entrada, resultam na saída do sistema, em deslocamentos angulares do feixe, que na figura 2.14 são identificados pelas variáveis  $\varphi_x$  e  $\varphi_y$ .

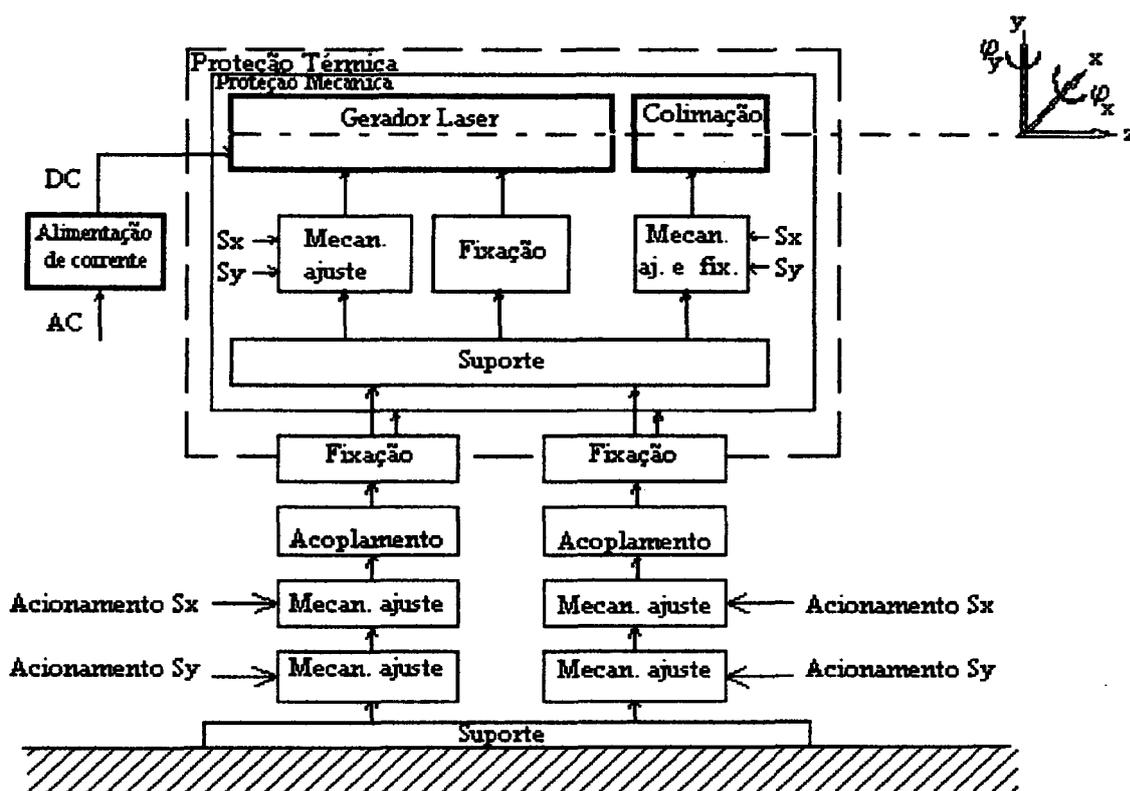


Figura 2.14- Estrutura funcional da unidade geradora da reta padrão.

### **3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DA UNIDADE GERADORA**

#### **DA RETA PADRÃO**

Sabe-se que no campo da engenharia muitas metodologias de projeto foram desenvolvidas no sentido de sistematizar a solução de problemas, sendo em muitos casos estruturados para problemas particulares /46-50/. Neste trabalho foi adotada uma metodologia de projeto de instrumentos /51/, orientando logicamente as etapas do processo de projeto, sem que existisse uma rigidez no seguimento destas.

As etapas de definição da tarefa de projeto e detalhamento da tarefa, já foram completadas no capítulo 2, com a caracterização do ambiente, determinação da função técnica do sistema e a definição dos requisitos.

#### **3.1 CONFIGURAÇÃO DO PROTÓTIPO**

A estrutura funcional do protótipo, também definida no capítulo 2 (fig. 2.14), constitui o ponto de partida para a definição dos princípios técnicos e a configuração do conjunto.

No entanto, é importante, antes da seqüência, uma descrição de detalhes da especificação do gerador

laser, e um esclarecimento de suas características fundamentais, uma vez que ele desempenha o papel de um componente cujas características construtivas não deveriam ser modificadas, pois trata-se de um componente de mercado e com características otimizadas pelo fabricante. Quando necessita-se de uma característica diferente, normalmente faz-se um novo estudo e uma nova especificação.

### **3.1.1 O Módulo de Geração do Laser**

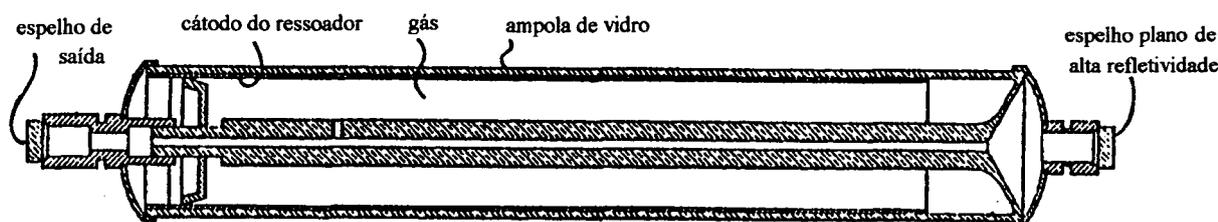
A especificação baseou-se nas seguintes características:

- potência mínima de 2 a 4mW;
- estabilidade espacial do feixe menor que  $10\mu\text{rad}$ ;
- polarização linear - apresenta características mais favoráveis à estabilização espacial do laser;
- divergência do feixe menor que  $1\text{mrad}$  - facilita a colimação do feixe;
- fonte de alimentação - estável e segura;
- características construtivas (dimensões, encapsulamento, rigidez de fixação do ressoador, no caso do laser encapsulado).

Entre os geradores laser de He-Ne com uma potência luminosa mínima na saída de 2mW a 4mW, especificou-se aquele que apresentava as melhores características de estabilidade espacial e de potência, com polarização linear, e com tubo metálico encapsulando o ressoador, compatível com as aplicações industriais e combinando pequenas dimensões físicas com um bom alinhamento estático e rigidez suficiente para a aplicação. E ainda, como parte integrante, uma fonte de alimentação de corrente contínua com um circuito que ajusta automaticamente a tensão de saída dentro de uma faixa especificada para manter a corrente de saída fixa, com proteções adequadas e interconexões elétricas

simples /52/.

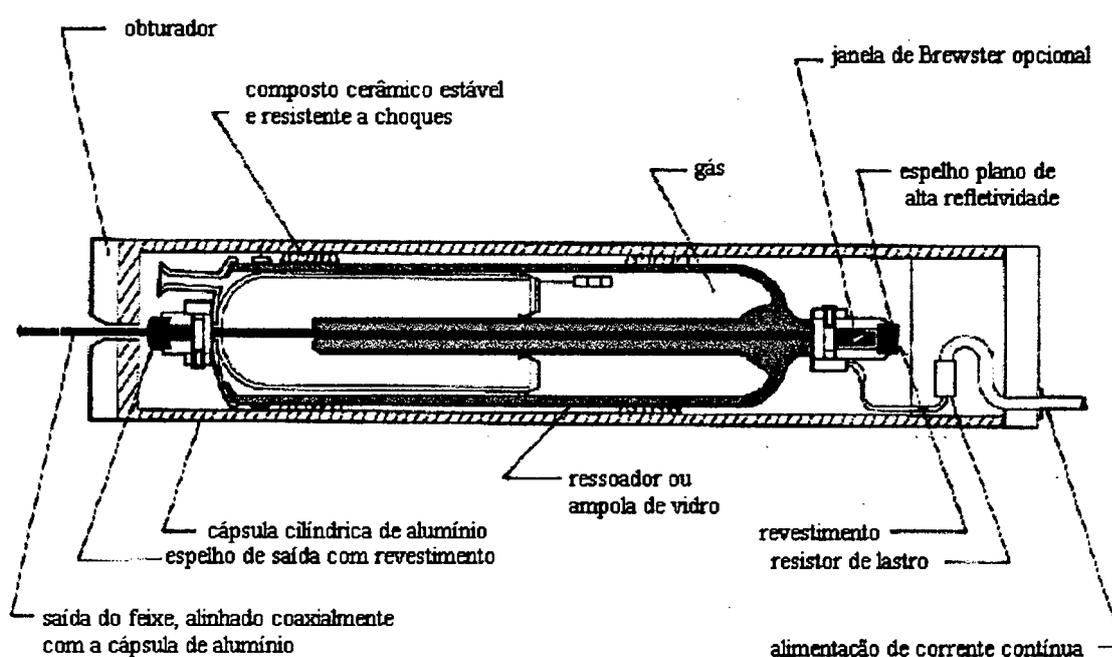
O ressoador do gerador laser especificado (fig. 3.1), foi otimizado pelo fabricante com o objetivo principal de melhorar as características de estabilidade espacial do feixe e estabilidade de potência, através de uma solução que minimiza os efeitos térmicos que produzem distorções no alinhamento dos espelhos. Essa solução /53/ combina em um elemento funções de condução térmica e condução elétrica (cátodo do ressoador) em contato com a superfície interna da parede de vidro do ressoador ao longo de uma maior porção do comprimento deste, servindo não somente como um eletrodo, do qual se origina a descarga de plasma, mas também como uma maneira efetiva de equalizar a temperatura ao longo de uma maior extensão do ressoador (ampola de vidro). Desta maneira, expansões térmicas diferenciadas de várias partes da parede do ressoador, que desalinhariam os espelhos, podem ser evitadas em uma larga extensão durante a operação em ambientes de temperaturas anisotrópicas.



**Figura 3.1-** Configuração do ressoador especificado para a unidade geradora da reta padrão /53/.

A estabilidade espacial do gerador laser especificado fica dentro de uma faixa menor que  $10\mu\text{rad}$  ( $\pm 5\mu\text{m/m}$ ) após um período de estabilização térmica (*warm-up*) de 15 minutos /52/, enquanto que tipicamente nos demais lasers existentes no mercado internacional está dentro de uma faixa de 10 a  $100\mu\text{rad}$  /28/.

Referente à fixação do gerador laser, por recomendação do próprio fabricante, optou-se pela utilização de um ressoador encapsulado no desenvolvimento do protótipo, com uma configuração similar à representada na figura 3.2. A fixação do ressoador internamente à cápsula é feita através de um composto cerâmico, com condições otimizadas pelo fabricante, resultando em características de rigidez, alinhamento estático e força de fixação suficientemente garantidas.



**Figura 3.2-** Configuração de um gerador laser com o ressoador encapsulado /37/.

Quando se utiliza um ressoador não encapsulado, existe uma preocupação muito grande com relação à carga que se exerce sobre a ampola de vidro devido aos próprios elementos de fixação e vibrações, e com relação também à forma e a posição ótimas para se executar a fixação sem provocar tensões excessivas e prejudiciais. Em função disso, é comum o uso de elementos elásticos como meios de fixação, no entanto esta solução não é rígida suficientemente para atingir os resultados requeridos.

O encapsulamento do ressoador traz outras vantagens significativas com relação aos aspectos de segurança, uma vez que esse encapsulamento obedece rigidamente as normas de segurança /35/, e além disso, as interconexões elétricas do ressoador à fonte-DC são bastante simples, enquanto no não encapsulado estas interconexões precisariam ser preparadas e o gerador como um todo deveria passar por um trabalho de adequá-lo às conformidades das normas de segurança antes de colocá-lo em operação.

A especificação das características de estabilidade espacial do feixe são iguais para o mesmo modelo de ressoador encapsulado e não encapsulado, e em função disso e das vantagens já comentadas, fez-se a escolha do ressoador encapsulado, no entanto o projeto mecânico do suporte do gerador laser deverá permitir a utilização das duas configurações, necessitando apenas de ajustes de adaptação às novas dimensões.

### **3.1.2 Módulo de Colimação**

A função principal do módulo de colimação é a transformação dos parâmetros de propagação do feixe gaussiano (fig. 2.5), colimando-o na faixa de operação transversal, e entre as soluções conhecidas para essa função estão os expansores de feixe.

Entre as configurações possíveis, tem-se duas opções, classificadas quanto ao tipo de expensor - kepleriano ou galileano; e, ainda duas outras opções, classificadas quanto à sua posição relativa ao laser - acoplado ou desacoplado.

A influência dos expansores sobre os parâmetros de propagação do feixe está equacionada e representada esquematicamente na figura 3.3. Destaca-se uma ampliação na componente paralela da instabilidade, e uma diminuição na componente angular. Além disso, há também uma diminuição da divergência natural do feixe, na mesma proporção, dependendo do ajuste de focalização no expansor.

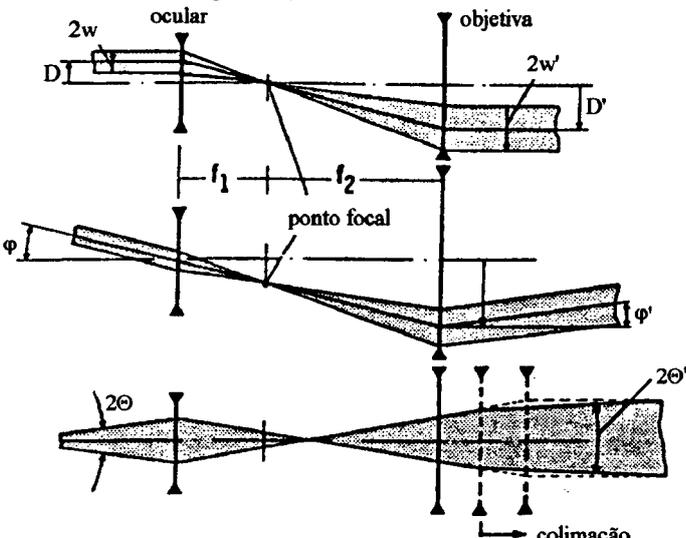
FUNÇÃO PRINCIPAL	KEPLERIANO	GALILEANO
<div style="text-align: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>feixe entrada</span> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Transformar radiação</div> <span>feixe saída</span> </div> <p>Transformar parâmetros de radiação do feixe gaussiano</p> <p>Parâmetros:  <math>2w</math> ... diâmetro do feixe  <math>2\Theta</math> ... ângulo de divergência  <math>\varphi</math> ... variação angular  <math>D</math> ... variação paralela  <math>A</math> ... fator de amplificação</p>  </div>	$A = \frac{f_2}{f_1}$ $D' = -A \times D$ $\varphi' = -\frac{\varphi}{A}$ $2w' = A \times 2w$ $2\Theta' = \frac{2\Theta}{A}$	$A = \frac{f_2}{ f_1 }$ $D' = A \times D$ $\varphi' = \frac{\varphi}{A}$ $2w' = A \times 2w$ $2\Theta' = \frac{2\Theta}{A}$

Figura 3.3- Tipos de expansores e sua influência sobre os parâmetros de propagação do feixe.

Na figura 3.4 está representada a influência do posicionamento relativo entre laser e telescópio na instabilidade do feixe e também no alinhamento. Supondo a existência de deformações mecânicas no suporte provocando desvios de posição do feixe, o telescópio acoplado acompanha esses desvios na mesma proporção e direção que eles ocorrem, enquanto que o desacoplado aumentará a componente paralela do desvio proporcionalmente ao fator de ampliação ( $A$ ) do telescópio, e diminuirá a componente angular proporcionalmente ao mesmo fator.

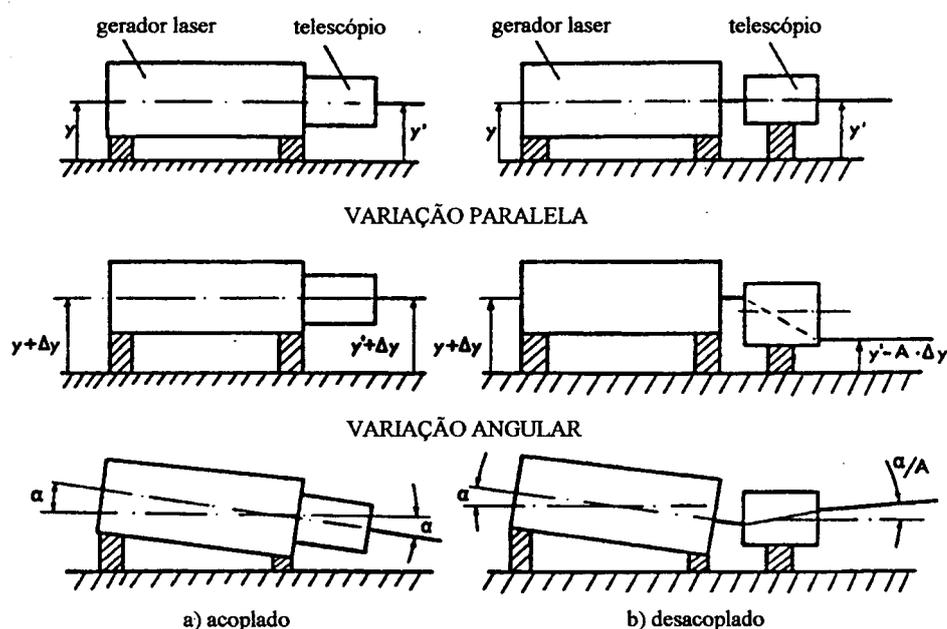
Na escolha da solução a ser adotada para configuração do módulo de colimação, foram considerados os seguintes critérios:

- capacidade de expansão do feixe até um diâmetro adequado ao transdutor do medidor de deslocamentos;
- capacidade de manter a colimação do feixe dentro de limites adequados, ao longo do caminho óptico útil;
- dimensões e peso reduzidos;
- facilidade de montagem e ajustes de focalização;
- baixa atenuação da potência do feixe;
- facilidade de manutenção (limpeza).

Já foram discutidas as vantagens e desvantagens dos dois tipos de expansores, e em função disso e dos critérios listados, optou-se por uma solução com um expansor tipo galileo, e desacoplado.

A característica de diminuição dos desvios angulares provenientes do gerador laser, em determinadas situações é bastante vantajosa. Como um dos requisitos do sistema cita a aplicação à longas distâncias de caminho óptico (até 30m), e nessa situação existe um aumento da componente do desvio angular

diretamente proporcional ao comprimento do caminho, tornando esta componente angular bem mais significativa que a componente paralela, então o efeito de redução passa a ser interessante, caracterizando uma forte justificativa para se optar por uma configuração desacoplada.



**Figura 3.4-** Posição relativa do telescópio ao gerador laser e a influência sobre o feixe /21/.

Por questões de qualidade das lentes e qualidade de fabricação e montagem do dispositivo, optou-se pela especificação de um expensor de mercado com um fator de ampliação calculado para atender aos requisitos de aplicação.

O cálculo deste fator de ampliação do telescópio requer um estudo teórico cuidadoso da propagação do feixe laser, especificamente para o gerador laser em questão, considerando-se requisitos previamente definidos.

Foi visto no capítulo 2 (item 2.1.4) que o feixe não é perfeitamente colimado, ou seja, existe um espalhamento da luz transversalmente à sua propagação. As fórmulas que se seguem, descrevem este espalhamento, e através delas pode-se perceber as capacidades e limitações do feixe laser.

Através da figura 2.5 pode-se verificar quais são as variáveis envolvidas e que fazem parte do equacionamento do fenômeno /29,30,36,37,39/.

Portanto este espalhamento está de acordo com:

$$R(z) = z \times \left[ 1 + \left( \frac{\pi \times w_o^2}{\lambda \times z} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

e

$$w(z) = w_o \times \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \times z}{\pi \times w_o^2} \right)^2} \quad (3.2)$$

onde:

$z$  ... é a distância de propagação do feixe de luz referenciada ao plano onde a frente de onda é plana ( $z=0$ , cintura do feixe);

$\lambda$  ... é o comprimento de onda da luz;

$w_o$  ... é o raio de contorno circular de  $1/e^2$  da irradiância no plano onde a frente de onda é plana;

$w(z)$  ... é o raio do contorno circular de  $1/e^2$  da irradiância a uma distância  $z$  de propagação da onda;

$R(z)$  ... é o raio de curvatura da frente de onda a uma distância de propagação  $z$ .

O plano  $z = 0$  marca a posição onde a frente de onda é plana.

Como  $R(z)$  assintoticamente se aproxima a  $z$  para grandes  $z$ ,  $w(z)$  assintoticamente se aproxima ao valor

$$w(z) \cong \frac{\lambda \times z}{\pi \times w_o} \quad (3.3)$$

e

$$\Theta = \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \times w_o} \quad (3.4)$$

onde  $\Theta$  é o ângulo de divergência do feixe.

Como dados iniciais para o cálculo do fator de amplificação ótimo ( $A_{ot}$ ), tem-se as características do feixe do gerador laser especificadas /52/, que são:  $\lambda = 0,6328 \times 10^{-3}$  mm,  $w_o = 0,315$  mm e  $\Theta = 0,65$  mrad. Além disso, sabe-se que a transformação do feixe deve, na situação ótima, manter o feixe colimado ao longo de uma distância máxima ( $z$ ) igual a 30 metros, cuidando para que o diâmetro do feixe expandido ( $2w'$ ) fique dentro de uma faixa de 2 a 5 mm, ao longo dos 30 metros.

Existe uma condição ótima, em que  $w(z)$  não varia mais que um fator  $\sqrt{2}$  em um intervalo de comprimento ( $2z_R$ ) calculado por:

$$2z_R = 2 \times \frac{\pi \times w_o'^2}{\lambda} \quad (3.5)$$

onde,  $w_o'$  é o raio da cintura do feixe no meio do intervalo,  $z_R$  é chamado de faixa de Rayleigh, e a relação entre o raio nas extremidades da faixa e na cintura é:

$$w(\pm z_R) = w_o' \times \sqrt{2} \quad (3.6)$$

Partindo-se de  $z_R = 15000\text{mm}$ , aplicado à equação (3.5), tem-se  $w_o' = 1,7\text{mm}$ , que por sua vez, na equação (3.6), nos fornece  $w(\pm z_R) \cong 2,5\text{mm}$ .

Portanto o diâmetro da cintura do feixe ampliado ( $2w_o'$ ) no centro da faixa é aproximadamente 3,4mm e o diâmetro nas extremidades da faixa é aproximadamente 5mm, estando dentro dos limites especificados nos requisitos. O fator de ampliação ótimo pode ser especificado então:

$$A_{ot} = \frac{w(z)}{w_o'} = \frac{2,5}{0,315} \cong 8 \quad (3.7)$$

Entretanto entre os expansores de feixe padrão disponíveis e compatíveis com os demais requisitos do módulo de colimação, encontrou-se modelos com fator de ampliação de 5 vezes e 10 vezes. Com  $A = 10$ , o diâmetro do feixe extrapolaria o limite máximo do diâmetro, e portanto não serve. Recalculando-se para  $A = 5$ , obtém-se:

$$\Theta' = \frac{\Theta}{5} = \frac{0,65}{5} \cong 0,13 \text{ mrad}$$

e

$$w(\pm z_R) = 5 \times w_o = 5 \times 0,315 \text{ mm} \cong 1,6 \text{ mm}$$

Através das equações (3.6) e (3.5), respectivamente, obtém-se  $w_o' \cong 1,13\text{mm}$  e  $2z_R \cong 12680\text{mm}$ . Ou seja, com  $A = 5$  a faixa de operação ótima do sistema é de aproximadamente 12,7m com o diâmetro variando entre 2,3 e 3,2mm. Se for posicionado a cintura do feixe ( $w_o'$ ) no centro da faixa de  $z = 30\text{m}$ , pela equação (3.4), o diâmetro iria variar entre 2,3 e 3,9mm, ou seja, uma variação maior que na

condição ótima ( $z = 12,7\text{m}$ ), no entanto ainda dentro dos limites especificados nos requisitos.

Nessas condições, selecionou-se um expansor com um fator de ampliação igual a 5, provido de ajuste de focalização para uma distância de 3 metros até infinito /37/. A montagem mecânica das lentes é compacta e de boa qualidade, sendo o material de alumínio anodizado, e todas as superfícies ópticas com *coating*, cuja função é minimizar as perdas de potência por reflexão.

### **3.1.3 Módulo de Suporte**

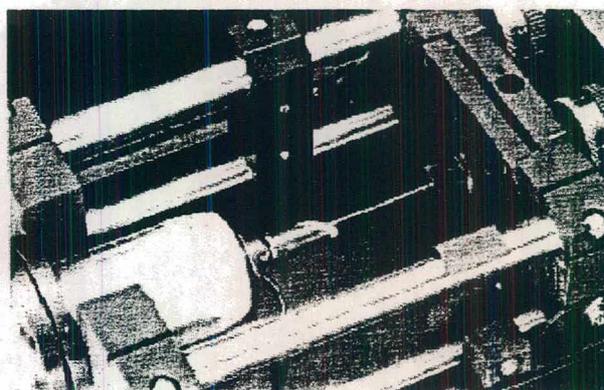
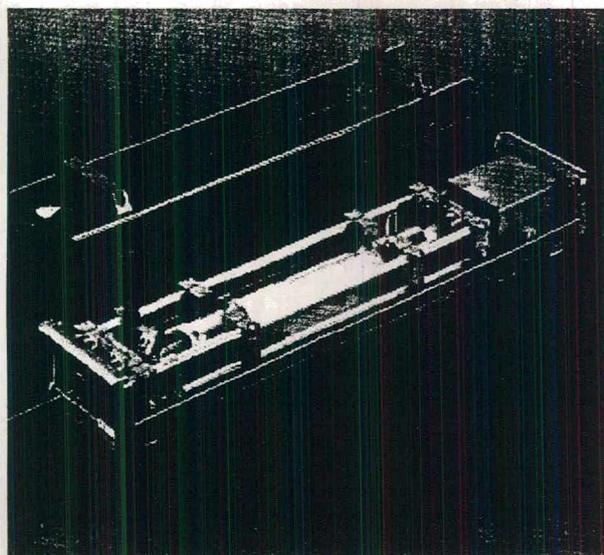
A função principal do módulo de suporte é a fixação dos componentes do conjunto laser-telescópio e acoplamento destes ao módulo de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão.

A metodologia de desenvolvimento desse módulo parte da análise de soluções conhecidas e através de um projeto adaptativo, desenvolve-se diferentes variantes, dentre as quais seleciona-se uma solução.

Como o módulo de suporte envolve muitos elementos com diferentes funções, o desenvolvimento está separado por itens.

### a) Estrutura de Suporte

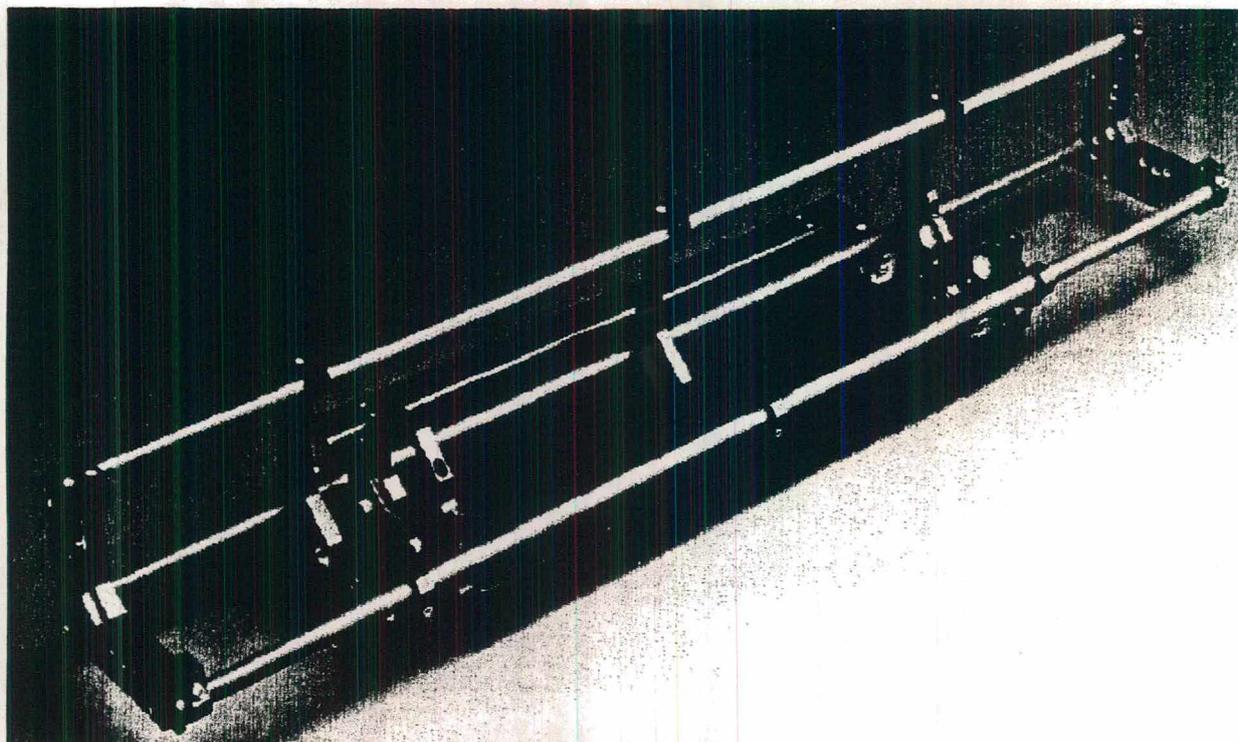
Através de uma análise de sistemas similares, identificou-se basicamente três configurações diferentes para uma estrutura de suporte: estrutura com quatro barras de aço e placas para apoio e fixação do gerador laser (fig. 3.5); estrutura de suporte com três barras de um composto de grafite (ou barras de aço) e perfis em "L" para os apoios e fixação do gerador laser (fig. 3.6); e estrutura cilíndrica com abraçadeiras com a função de fixação do gerador laser (fig. 3.7).



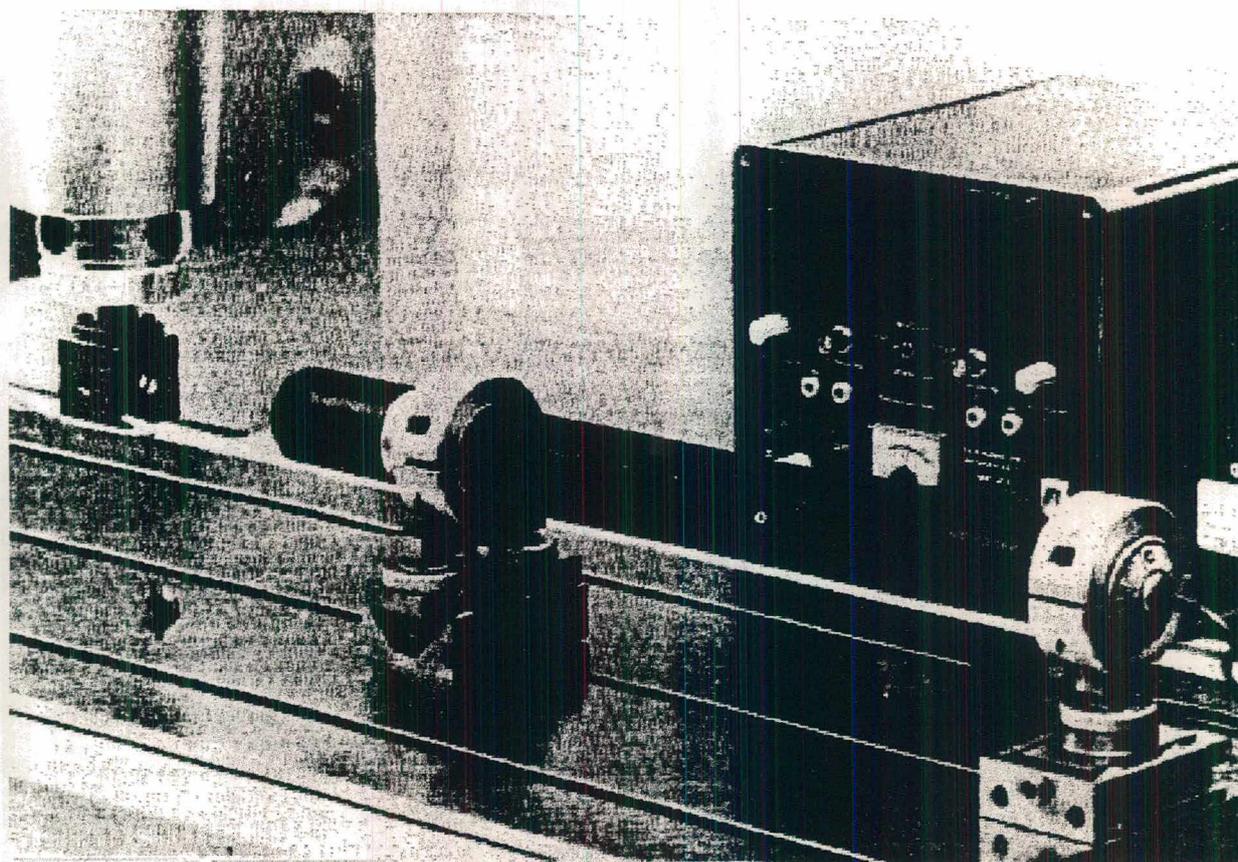
**Figura 3.5-** Exemplo de um sistema a laser com uma estrutura de suporte com quatro barras /54/.

Existem alguns requisitos definidos como fundamentais e que devem ser considerados na escolha de uma solução. Esses requisitos são os seguintes:

- a estrutura deve permitir apoio do gerador laser em duas regiões ao longo da cápsula cilíndrica de alumínio, sendo um na parte dianteira, com ajustes sobre os eixos ortogonais x e y transversais ao laser (plano xy), e um na parte traseira, também com os mesmos ajustes;
- telescópio desacoplado com fixação roscada e procedimento de alinhamento telescópio-laser;
- peças unidas rigidamente sem folgas.

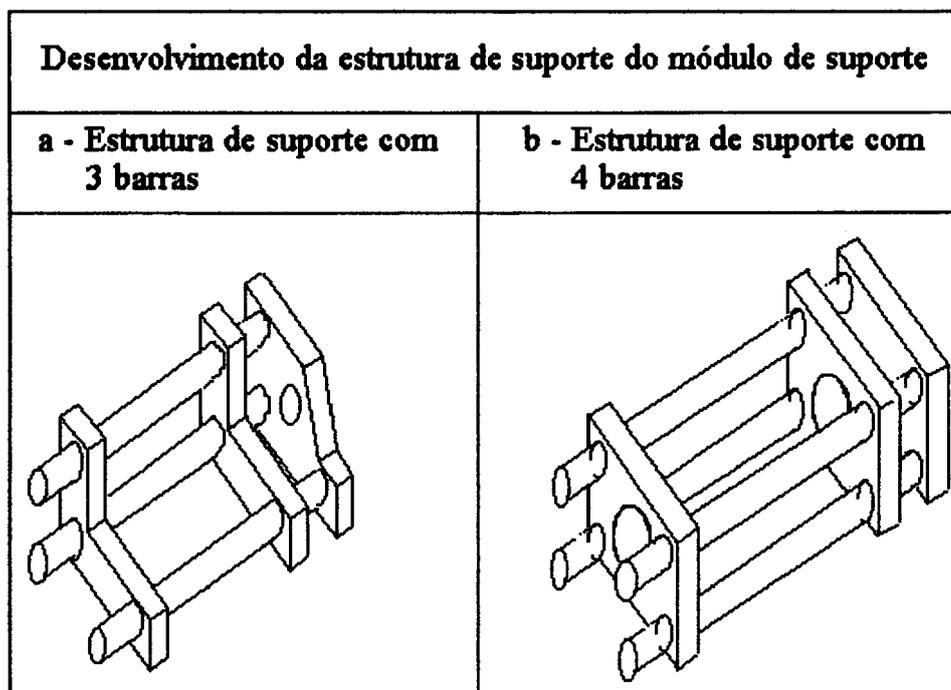


**Figura 3.6-** Estrutura de suporte de um gerador laser /55/.



**Figura 3.7-** Suporte de um gerador laser com abraçadeiras /26/.

Pode-se identificar entre as soluções conhecidas, dois tipos diferentes de configuração, representadas na figura 3.8: estrutura com perfis em "L" para apoios do gerador laser, e três barras para conferir rigidez à montagem; e, estrutura com placas para apoiar o gerador laser, e quatro barras.



**Figura 3.8-** Variação da estrutura de suporte.

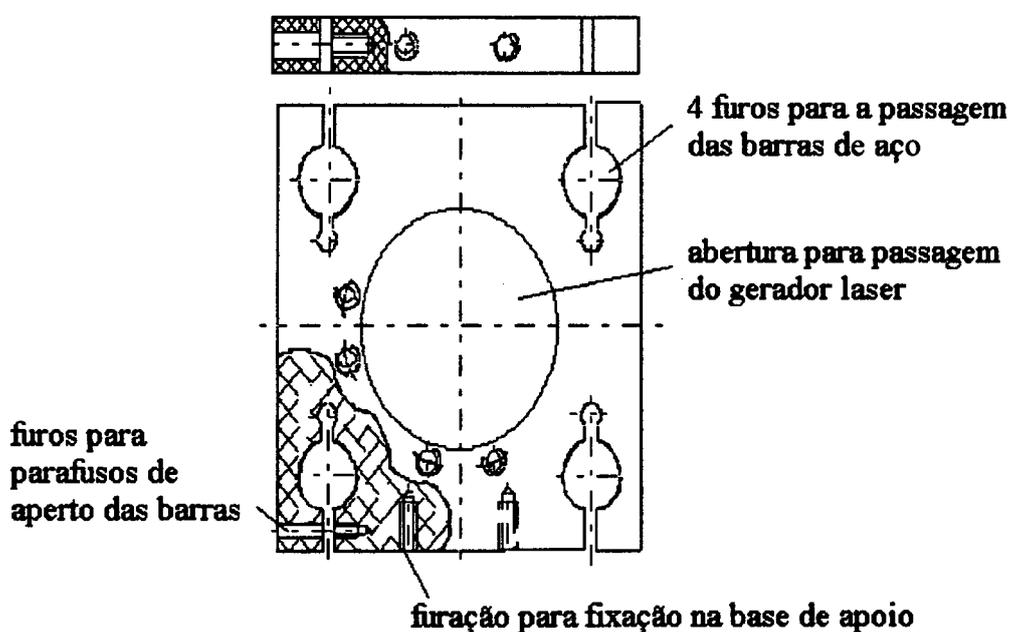
Na seleção de uma solução, entre uma das configurações identificadas acima, considerou-se os seguintes critérios:

- menor sensibilidade a variações térmicas;
- menor massa para facilitar *warm-up*;
- não transmitir esforços ao gerador laser;
- acoplamento rígido do conjunto laser-telescópio;
- menor custo de fabricação (menor complexidade para fabricação);

- simetria da geometria e possíveis benefícios;
- facilidade de montagem do conjunto;
- possibilidade de fixar geradores laser de dimensões diferentes com ajuste simples.

Em função desses critérios, selecionou-se uma configuração composta de três placas de idêntica geometria, onde duas delas têm a função de suportar o gerador laser e uma terceira suportar o telescópio, e como elementos de ligação rígida entre elas, quatro barras de aço (fig. 3.8.b).

A figura 3.9 detalha a configuração de uma das placas. O material é alumínio (anodizado) para uma boa dissipação de calor e pequeno peso. Na mesma figura pode-se observar o detalhe de configuração dos furos de passagem das barras e o sistema de eliminação da folga entre barra e furo, similar ao exemplo da figura 3.5; e, um outro detalhe ainda, é o furo central de passagem do gerador laser, que deve ter diâmetro maior que o gerador para permitir uma boa convecção do calor gerado no interior deste.



**Figura 3.9-** Configuração de uma placa da estrutura de suporte.

As barras devem ser de aço, sendo importante as características de cilindridade, retilidade e acabamento superficial. Em função dessas características, somadas a um bom aspecto visual, especificou-se um aço inox, no entanto, poderia ter sido especificado um aço trefilado de menor custo. Na configuração do conjunto elas têm a função de conferir rigidez à montagem, mantendo a característica de simetria do conjunto.

#### b) Dispositivo de Ajuste e Fixação do Gerador Laser

A função principal deste dispositivo é o alinhamento do gerador laser com o telescópio.

Com base nos requisitos previamente definidos (fig. 2.13) e análise de dispositivos similares e suas variações, partiu-se inicialmente para a concepção de diferentes princípios técnicos, os quais estão representados na figura 3.10.

Entre eles, selecionou-se o primeiro (fig.3.10.a.2) para o desenvolvimento da configuração final, sendo essa escolha função unicamente do menor custo de fabricação que representa (menor complexidade da geometria) e da adequação à configuração simétrica com quatro barras. No entanto, essa solução apresenta algumas desvantagens, que são: a maior dificuldade de ajuste, muito embora esse ajuste seja feito uma única vez durante a montagem do conjunto; e a menor sensibilidade de ajuste (ajuste grosseiro).

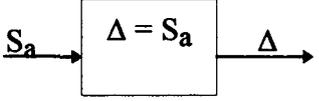
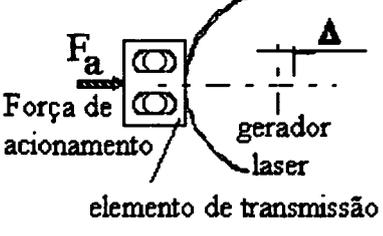
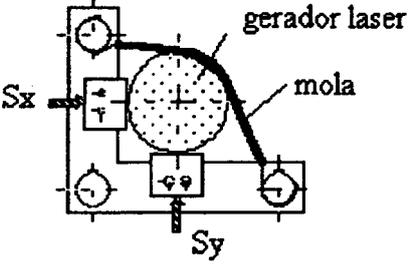
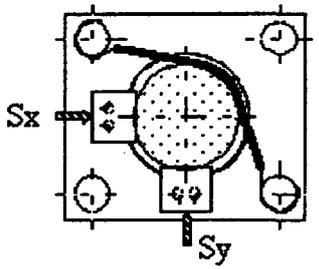
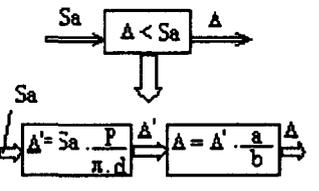
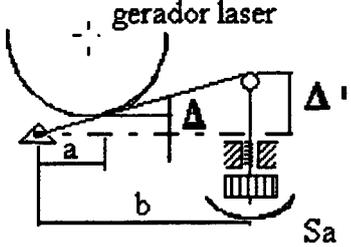
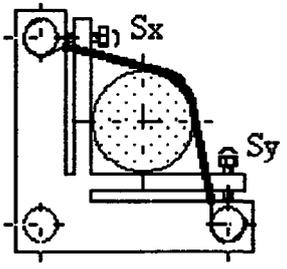
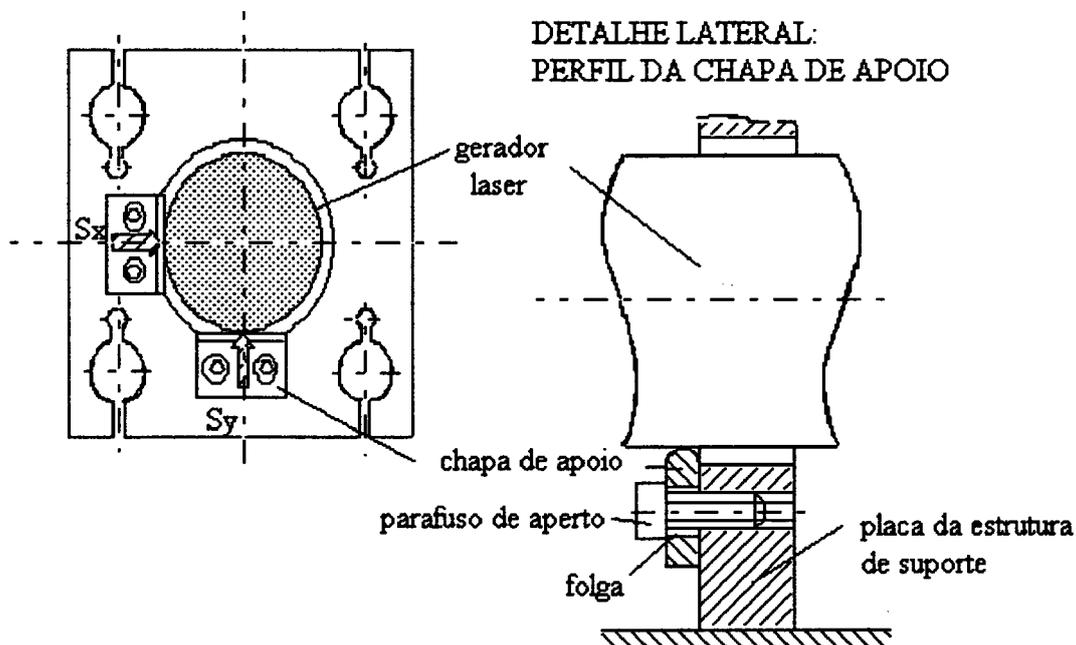
Estrutura Funcional	Princípio Técnico	Variação
<p>a)</p>  <p>dispositivo com acionamento manual e transmissão direta</p>	 <p>Força de acionamento <math>F_a</math></p> <p>gerador laser</p> <p>elemento de transmissão</p>	<p>a.1)</p>  <p>gerador laser</p> <p>mola</p> <p><math>S_x</math></p> <p><math>S_y</math></p> <p>a.2)</p>  <p><math>S_x</math></p> <p><math>S_y</math></p>
<p>b)</p>  <p>dispositivo de alavanca</p>	<p>acionamento por parafuso</p>  <p>gerador laser</p> <p><math>\Delta'</math></p> <p><math>a</math></p> <p><math>b</math></p> <p><math>S_a</math></p>	<p>b.1)</p>  <p><math>S_x</math></p> <p><math>S_y</math></p>

Figura 3.10- Variação do dispositivo de ajuste e fixação do gerador laser.

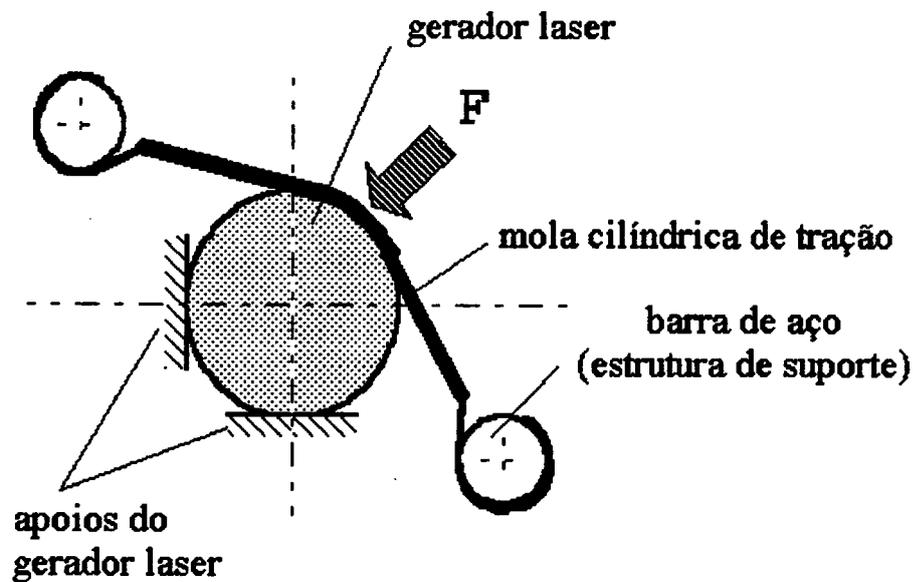
A figura 3.11 detalha a configuração desse dispositivo de ajuste do gerador laser, valendo comentar-se que o material é alumínio, que existe uma folga entre parafuso de aperto e furo da chapa de apoio, e que existe um pequeno raio de curvatura na superfície de contato da chapa de apoio com o gerador

laser, para garantir que esse contato seja caracterizado por um ponto.



**Figura 3.11-** Configuração do dispositivo de ajuste do gerador laser.

A fixação do gerador laser é feita através de duas molas cilíndricas de tração, posicionadas dentro das regiões recomendadas pelo fabricante do gerador e presas ao suporte em duas das barras da estrutura formando uma diagonal, e quando solicitadas criam uma força radial ao gerador e a  $45^\circ$  dos pontos de apoio deste, conforme representação na figura 3.12. O impedimento do giro e do deslocamento axial do gerador laser é garantido através de cola, em apenas um dos pontos de contato do gerador com a chapa de apoio dianteira.



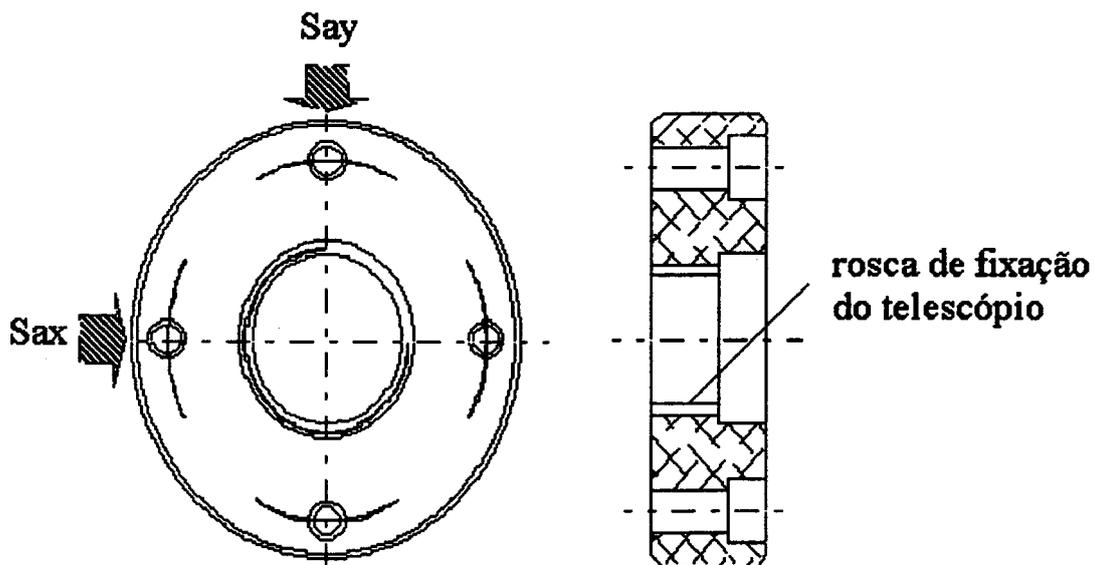
**Figura 3.12-** Fixação do gerador laser no suporte.

### c) Dispositivo de Ajuste e Fixação do Telescópio

A função principal deste dispositivo é garantir o alinhamento do telescópio com o gerador laser e fixação.

Na concepção deste dispositivo, verificou-se a existência de uma solução já bem definida, constante nas informações do próprio fabricante do telescópio /37/, e que atende às exigências do módulo de colimação e os requisitos, bastando apenas um dimensionamento para adequação à estrutura de suporte já desenvolvida.

A configuração desta solução está ilustrada na figura 3.13, e apresenta vantagens como facilidade de fabricação, o material é alumínio (anodizado), e permite uma fácil montagem e desmontagem do telescópio cuja fixação é roscada.

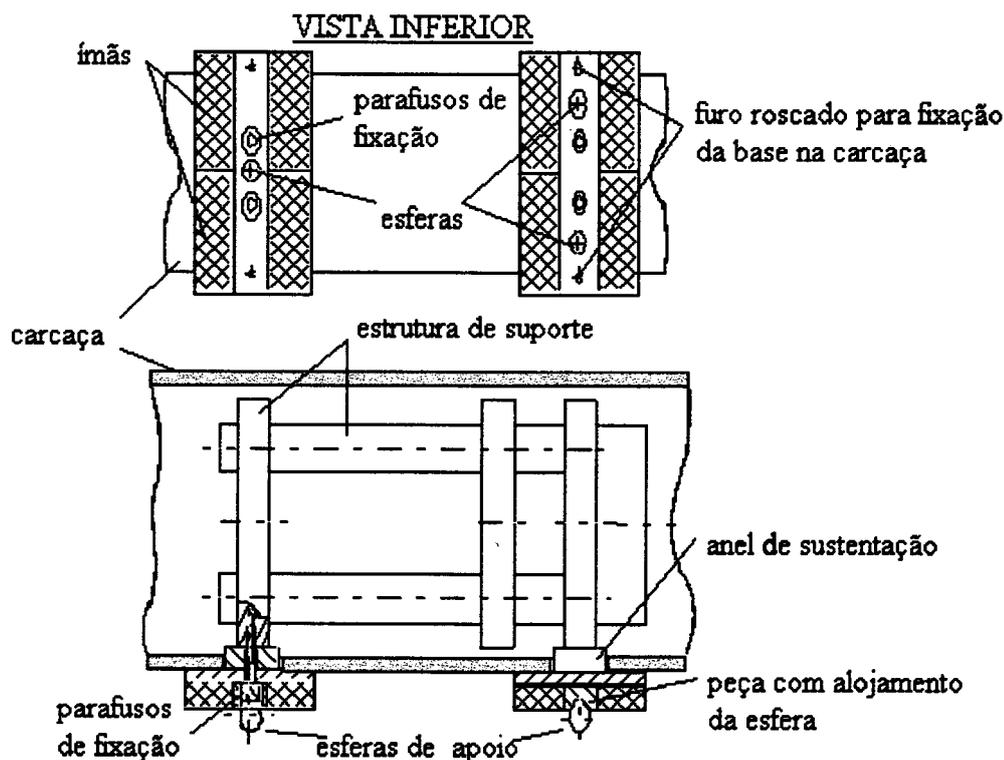


**os quatro furos devem ter folgas  
suficientes para possibilitarem  
os ajustes laterais**

#### d) Bases de Fixação e Apoio da Estrutura de Suporte

A função principal é o acoplamento da estrutura de suporte ao módulo de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão.

Para atender essa função principal definida, pesquisou-se algumas soluções clássicas, como, o apoio isostático e o acoplamento cinemático /31,32/, e ainda soluções que incorporam uma força magnética para o acoplamento, sendo que essas soluções já constavam na lista de requisitos definidos anteriormente. Portanto, durante a concepção desta solução, a preocupação maior concentrava-se na integração e adaptação dessas diversas soluções já conhecidas. A configuração resultante é apresentada na figura 3.14.



**Figura 3.14-** Configuração das bases de fixação e apoio

A solução desenvolvida possui características como:

- fixação rígida entre as bases da unidade geradora da reta padrão e a estrutura de suporte;
- folga entre carcaça e anel de sustentação, representado em detalhe na figura 3.15, permitindo dilatações da carcaça sem que haja interferência com a base de apoio;
- facilidade de montagem e desmontagem, e também de fabricação;
- circuito magnético que colabora no acoplamento com o módulo de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão.

O sistema possui três esferas de aço que desempenham a função de elementos de apoio (isostático). Duas das esferas são posicionadas logo abaixo da placa frontal da estrutura de suporte, região onde existe uma maior concentração de peso, e a outra, é posicionada na placa traseira. A preocupação maior é a de se manter um máximo afastamento entre os pontos de apoio, garantindo uma condição de

equilíbrio mais estável, e uma outra preocupação seria uma distribuição de carga igual entre os elementos de apoio. No entanto, na configuração desenvolvida, houve uma limitação da distância entre as esferas da frente em função das dimensões reduzidas que se desejava dar ao conjunto e às bases cinemáticas onde as esferas são apoiadas, contrastando com as dimensões dos ímãs especificados, tornando o conjunto dessas bases de fixação e apoio passível de uma otimização no dimensionamento do afastamento entre esferas. Entretanto a estabilidade referida não ficou prejudicada, pois a força magnética dos ímãs garante uma boa estabilidade.

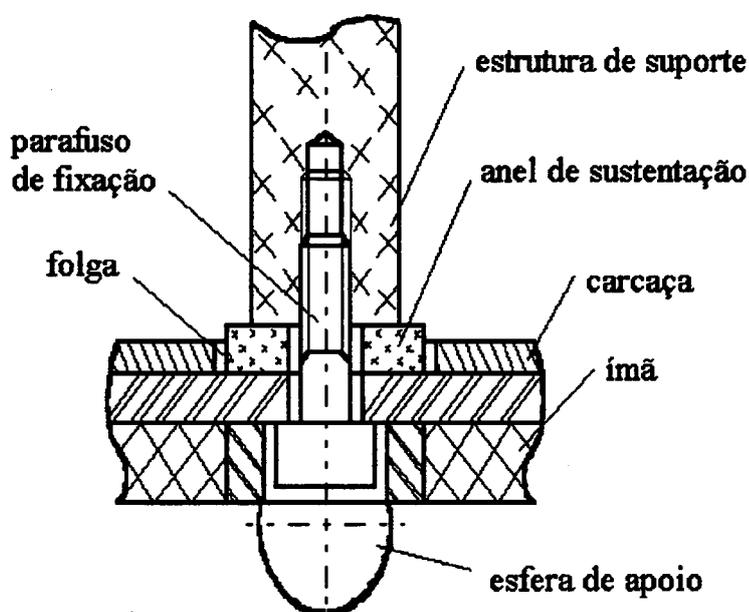


Figura 3.15- Detalhe de fixação da base à estrutura de suporte.

Os ímãs especificados são de ferrite, e têm a sua polarização e disposição na montagem representadas na figura 3.16, onde chama-se a atenção para a orientação dada aos polos na montagem, no sentido de criar-se dois circuitos magnéticos independentes, um para cada base de apoio. Na mesma figura procura-se detalhar a formação desses circuitos magnéticos.

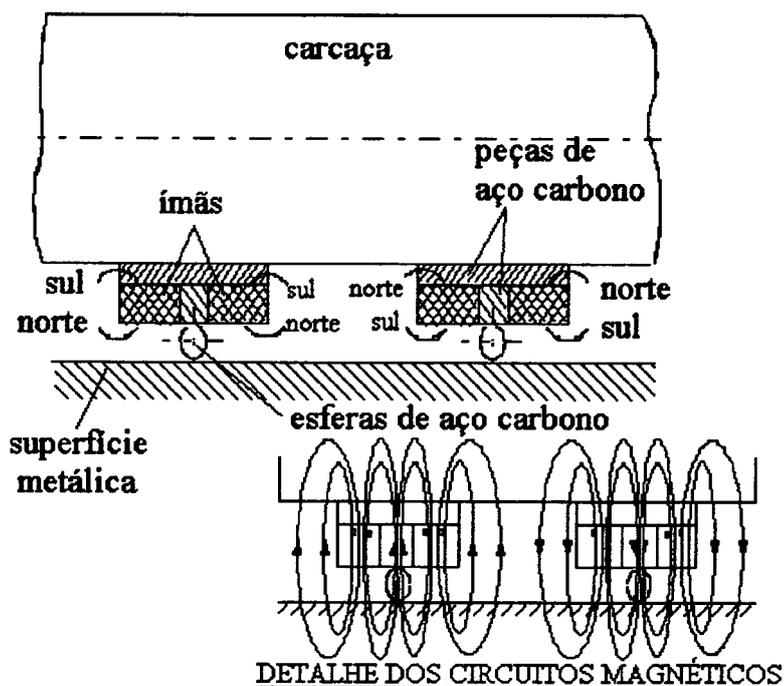


Figura 3.16- Esquema da disposição dos ímãs.

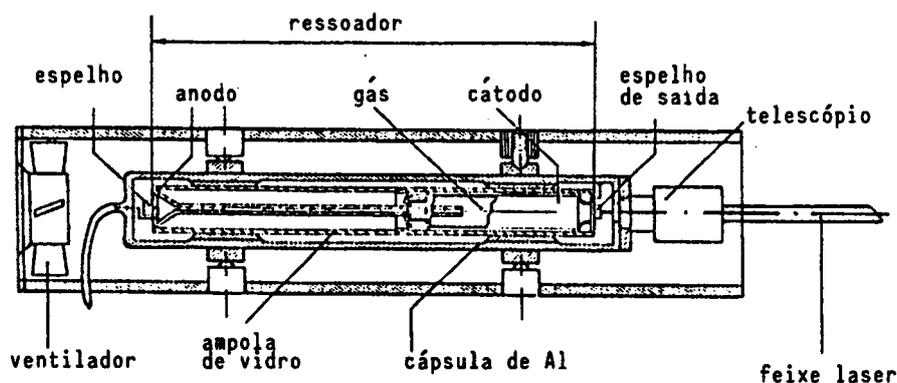
### 3.1.4 Módulo de Proteção Térmica

A função principal é estabilizar o campo de temperaturas em torno do gerador laser e isolar as perturbações térmicas externas.

Na literatura pesquisada, onde sistemas similares foram desenvolvidos, houve uma grande preocupação com a susceptibilidade do gerador laser a mudanças térmicas em torno dele, sendo considerada essa a principal causa da instabilidade espacial do feixe.

Uma solução que compatibiliza simplicidade e eficiência, é um sistema de resfriamento com ventilação forçada, cuja função é minimizar os efeitos térmicos no gerador laser /6,21,23/. A figura 3.17 mostra a configuração de uma unidade geradora da reta padrão com ventilação forçada. A grande eficiência

dessa solução pode ser observada na figura 3.18, onde gráficos com resultados experimentais do sistema da figura anterior revelam uma sensível diminuição dos desvios de posição do feixe comparado com a mesma configuração sem a ventilação.



**Figura 3.17-** Exemplo de uma configuração de uma unidade geradora da reta padrão com ventilação forçada /21/.

Tem sido aplicado, com sucesso, em alguns trabalhos /41,56,57/, um método de estabilização simultânea da amplitude e frequência de um laser de He-Ne através de uma estabilização do comprimento do ressoador, resultando ao mesmo tempo numa estabilização do desvio do feixe ( $\pm 3 \mu\text{rad/h}$  na direção vertical e  $\pm 5 \mu\text{rad/h}$  na direção horizontal, transversais ao feixe) /41/. Na figura 3.19 está esquematizado este método. A intensidade do feixe (parte traseira) é detectada com um fotodiodo de silício. A tensão elétrica do sinal, proporcional à intensidade, é aplicada a um servomotor-dc que roda um ventilador axial de refrigeração, e controla a mudança do comprimento do ressoador devido à expansão térmica /56,57/.

O ressoador é instalado em um tubo de alumínio com furos ( $\varnothing 10\text{mm}$ ) na sua parte superior e inferior. Esse tubo é inserido em uma caixa também de alumínio com um furo ( $\varnothing 100\text{mm}$ ) na parte central do lado superior e furos ( $\varnothing 10\text{mm}$ ) no lado inferior. O servomotor para o ventilador é montado em uma

chapa acrílica, e é fixado acima do furo central, com um composto vedante de silicone, para reduzir os efeitos de vibrações mecânicas do conjunto motor-ventilador. A temperatura do ressoador é monitorada com um componente termilinear, que produz uma tensão de saída linear com a temperatura /41,56,57/. Essa montagem é mostrada na figura 3.19.

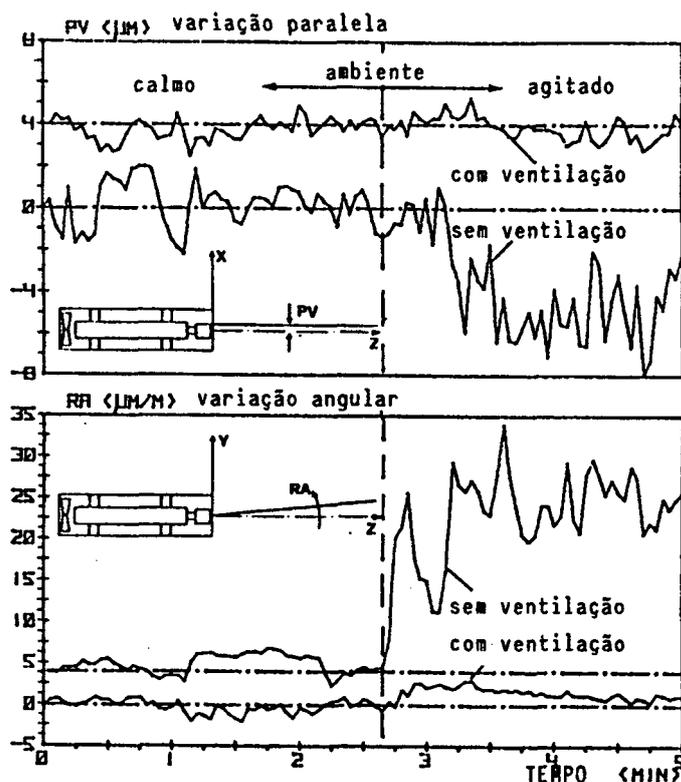


Figura 3.18- Resultados de ensaios de um sistema com ventilação forçada /21/.

Um método diferente em que o ressoador é aquecido por aquecedores elétricos serpenteados ao redor dele, também tem sido aplicado, entretanto, o método do ventilador de resfriamento (*cooling fan method*) é superior em resposta térmica ao método do aquecimento (*heating method*) /56/.

Os critérios considerados para a seleção de uma solução, foram os seguintes:

- estabilização do campo de temperaturas em torno do gerador laser;
- redução do tempo de *warm-up*;
- menor custo de desenvolvimento e implementação;
- resultados experimentais (realizados em laboratório e pesquisados na literatura);
- versatilidade na aplicação (ensaios geométricos);
- não deve transmitir ruídos elétricos ou vibrações ao gerador laser;
- cumprimento da função principal definida.

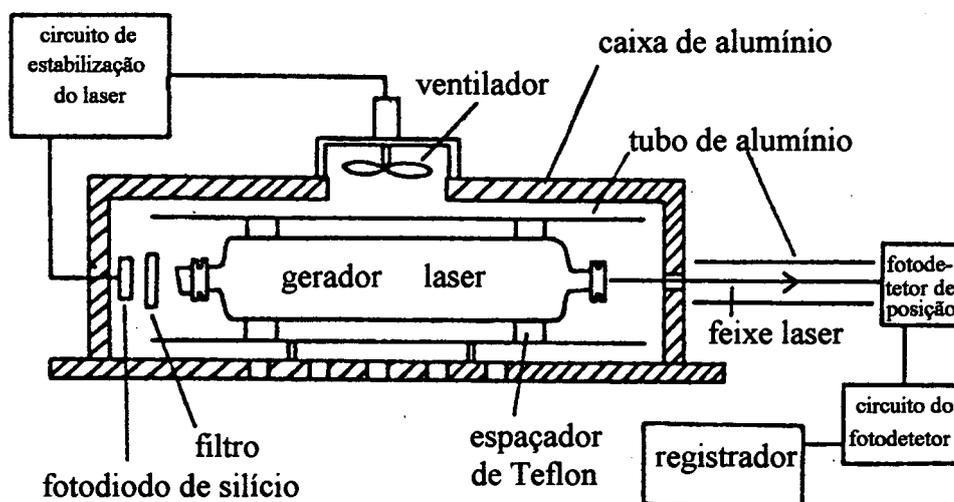


Figura 3.19- Sistema com circuito controlador para a estabilização do laser /41/.

Adotou-se portanto, uma solução com ventilação forçada, configurada com um ventilador axial, sem qualquer circuito de controle. A configuração final é mostrada na figura 3.20, e é composta pelo ventilador axial (componente comercial especificado) e por elementos mecânicos de fixação e adaptação desse ventilador à um dispositivo com base magnética e haste, dispositivo esse que pode ser acoplado à superfícies metálicas com relativa segurança. Essa configuração, mantém o módulo de proteção térmica desacoplado da estrutura da unidade geradora da reta padrão, evitando problemas de vibrações, podendo manter a carcaça vedada, o que não ocorreria com o ventilador acoplado, pois o

mesmo precisaria de uma abertura na carcaça para a circulação do ar. É característica também, a facilidade e a versatilidade de posicionamento do dispositivo magnético.



**Figura 3.20-** Sistema de ventilação forçada.

Na especificação do ventilador /58/, são considerados requisitos físicos, tais como limitações de espaço, e requisitos de desempenho, como menor ruído possível e motor ventilador mais eficiente.

O ventilador especificado /58/ para o módulo de proteção térmica da unidade geradora da reta padrão gera um fluxo de ar na faixa de 9 a 10 l/s, considerado suficiente para a circulação do ar, no entanto sua eficiência somente será comprovada experimentalmente. As demais características respeitam os requisitos de baixo ruído (modelo silencioso), pequenas dimensões e características elétricas para a instalação.

### 3.1.5 Módulo de Ajustes e Fixação

A função principal deste módulo consiste em ajustar a unidade geradora da reta padrão em quatro graus de liberdade, dois de translação ( $\Delta_x$  e  $\Delta_y$ ) e dois de giro ( $\delta_{xz}$  e  $\delta_{yz}$ ), de maneira que o alinhamento do feixe convirja para dentro de uma faixa igual a 20% da faixa de operação transversal do fotodetector.

Através da análise de sistemas similares, identificou-se duas soluções possíveis, que são: sistema com três parafusos de elevação (fig. 2.1); e, sistema com quatro ajustes independentes (fig 3.21).

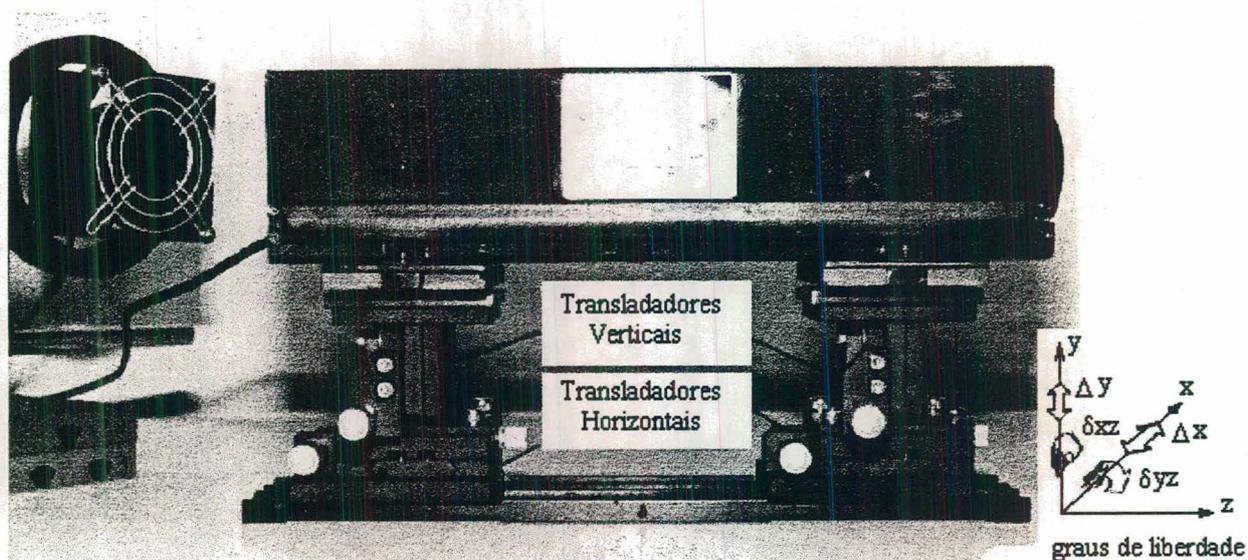


Figura 3.21- Sistema com quatro graus de liberdade e quatro ajustes independentes.

Na escolha da solução para a configuração do módulo de ajustes e fixação, foram considerados os seguintes critérios:

- independência dos ajustes angulares ( $\delta_{xz}$  e  $\delta_{yz}$ ) e os ajustes de translação ( $\Delta_x$  e  $\Delta_y$ ), ou seja, quatro ajustes independentes entre si;
- conforto e rapidez de alinhamento da unidade geradora da reta padrão;

- confiabilidade dos mecanismos de ajuste;
- possibilidade de fixar em posições diferentes da horizontal;
- travamentos adequados.

Selecionou-se, portanto a solução com os quatro ajustes independentes, composta por quatro transladores, sendo dois de ajuste horizontal (direção x) e dois de ajuste vertical (direção y), que com a combinação de seus deslocamentos, desempenham eficientemente a função principal deste módulo. Composto ainda esta solução, existem duas placas que permitem, juntas, a configuração do acoplamento cinemático, e uma placa base exclusivamente para cumprir uma função de fixação. Essa solução será melhor descrita em seguida.

Devido aos requisitos de confiabilidade dos ajustes e qualidade de fabricação, optou-se pela especificação de transladores disponíveis no mercado internacional.

Segundo requisitos /27/, o desalinhamento máximo permissível do feixe laser em relação à direção z é de  $\pm 20 \mu\text{rad}$  (inclinação). Na definição da distância entre os pontos de apoio dianteiro e traseiro (afastamento entre os transladores), procurou-se inicialmente identificar quais eram as áreas de fixação do gerador laser, recomendadas pelo fabricante, e procurou-se configurar um maior afastamento possível entre os apoios, no módulo de suporte, sem extrapolar os limites referidos. No entanto existia um terceiro apoio, referente ao telescópio, que precisava ser posicionado de forma a permitir a máxima proximidade possível entre gerador laser e telescópio. O posicionamento, então, das bases de apoio do módulo de suporte, seguiram a orientação dos eixos de dois dos três apoios comentados, mais especificamente os apoios extremos, escolhidos em função de se ter uma melhor distribuição de massa. A distância entre esses eixos é de 200mm e caracteriza a distância entre os

transladadores. De posse desses valores, pode-se calcular a resolução de deslocamento linear ( $s$ ) dos manípulos de ajuste dos transladores e definir a resolução angular de acionamento do translador ( $\theta$ ), da seguinte forma:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{s}{l} \quad (3.8)$$

Onde,  $l$  é a distância de afastamento entre os dois transladores (200mm). Considerando  $\theta$  igual a  $20\mu\text{rad}$  ( $4''$ ), e substituindo esses valores na equação 3.8, encontra-se o valor de  $s$  aproximadamente igual a  $4\mu\text{m}$ .

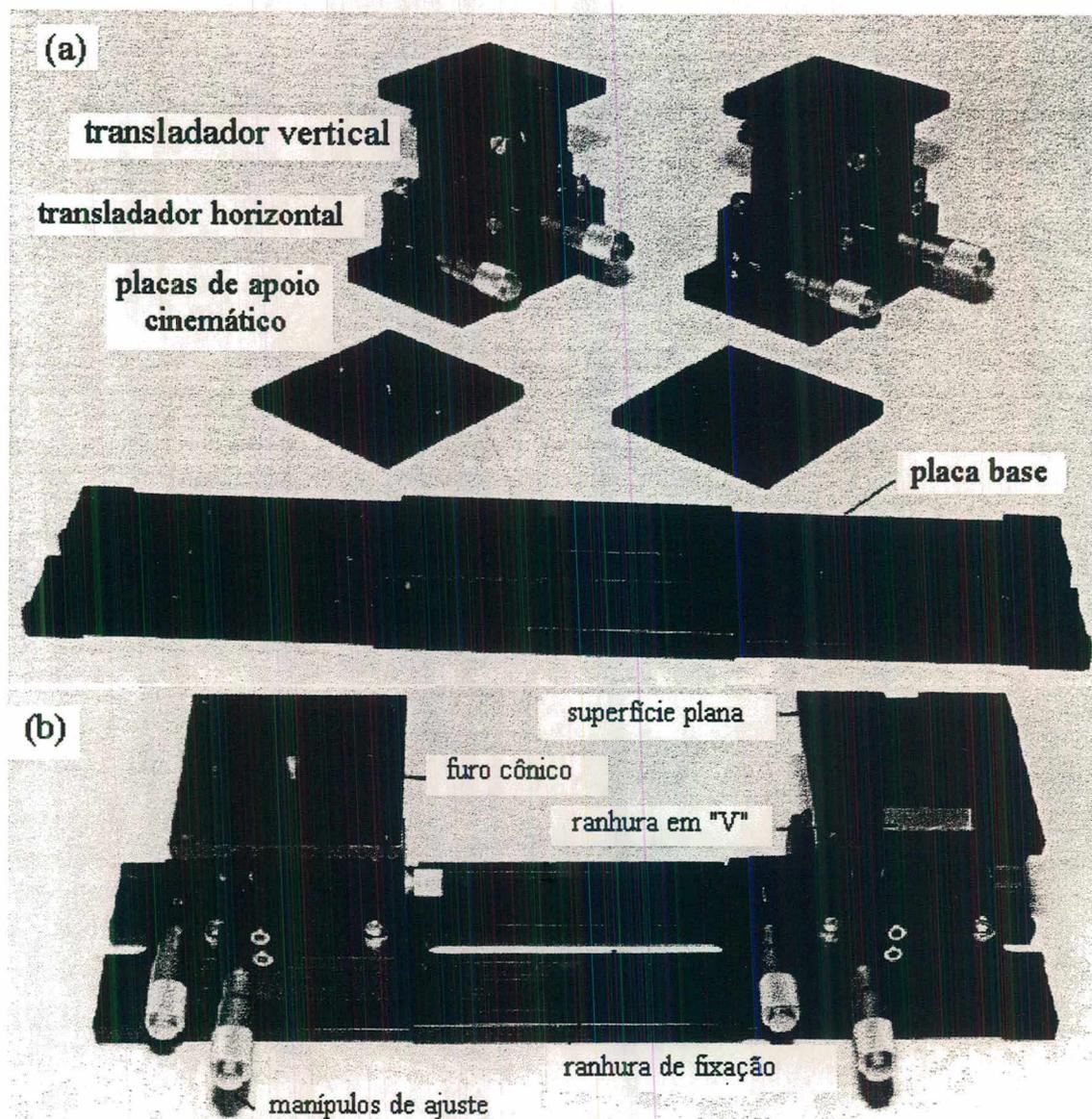
Portanto, a resolução mínima de deslocamento linear dos manípulos dos transladores deve ser de  $4\mu\text{m}$ .

Além disso, outros critérios foram considerados durante a especificação dos transladores /37/, tais como:

- folgas;
- rigidez;
- estabilidade mecânica;
- relação entre o curso de atuação e curso funcional de deslocamento (sensibilidade de acionamento);
- capacidade de carga;
- retilineidade de trajetória;
- curso de ajuste.

A figura 3.22 apresenta a configuração do módulo de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão. Essa configuração apresenta como principal vantagem, o conforto nas operações de ajustagem

com redução de tempos, porém traz como grande desvantagem a elevação do conjunto e os conseqüentes problemas que essa elevação traz na sua aplicação com a diminuição de sua versatilidade.



**Figura 3.22-** Configuração do módulo de ajustes e fixação.a) partes desmontadas; b) conjunto montado.

Na configuração deste módulo, houve ainda uma preocupação com um projeto cinemático adequado. De uma forma geral, um projeto cinemático de instrumentos deve demandar uma menor precisão de construção e montagem, a fim de obter os mesmos resultados que um projeto mais robusto,

apropriado para uso em oficina /32/. Um bom projeto cinemático baseia-se na premissa que um corpo no espaço (no caso específico, o módulo de suporte) tem seis graus de liberdade e que é requerido um vínculo para eliminar cada grau de liberdade.

Uma superdeterminação (vínculos redundantes) sobre o número mínimo de vínculos requeridos para um acoplamento cinemático, pode conduzir a concentração de tensões indesejáveis sobre o corpo (suporte do gerador laser), resultando em distorções e mal funcionamento. Os seis graus de liberdade consistem de um movimento de translação ao longo de cada um dos três eixos, não necessariamente mutuamente perpendiculares, e um movimento de rotação sobre cada um dos três eixos /31,32/.

O acoplamento Kelvin /31/, é um exemplo clássico de um verdadeiro projeto cinemático, que possibilita a dois componentes serem precisamente vinculados, um em relação ao outro, sem a necessidade de uma grande precisão na manufatura e sem a introdução de distorções entre os componentes, devido, por exemplo, a efeitos térmicos. O acoplamento pode ser configurado com um componente com três pés com extremidade esférica, apoiado no componente inferior. Este, por sua vez, consiste de uma superfície plana, uma ranhura em "V" e um furo com formato de uma pirâmide triangular (tetraedro). Há, portanto, seis vínculos, um no plano, dois na ranhura em "V" e três no furo tetraédrico, criando um verdadeiro acoplamento cinemático entre os componentes superior e inferior /31,32/.

Por questões de fabricação, na configuração desenvolvida para o protótipo, o furo tetraédrico foi substituído por um furo cônico, sem provocar grande detrimento da qualidade do acoplamento. As três semiesferas de apoio, são elementos integrantes do módulo de suporte, que já foi descrito no item 3.1.3.d. Na figura 3.22 pode-se ver as duas placas que, juntas, caracterizam o elemento inferior do

acoplamento cinemático.

Com a função de fixação dos transladores e fixação da unidade geradora da reta padrão à superfície de ensaio (na sua aplicação), construiu-se uma placa base, cuja configuração é mostrada também, na figura 3.22. Essa configuração não foi otimizada, no que se refere à fabricação, ou seja, sua fabricação requer um custo elevado de usinagem se comparada às demais peças da unidade geradora da reta padrão. O material é alumínio, no entanto o aço traria a vantagem de menores deformações e maior rigidez..

### **3.1.6 Módulo de Proteção Mecânica**

Este módulo tem como função principal, garantir a proteção do sistema contra interferências do meio ambiente, tais como poeira e umidade além de colaborar com a proteção térmica.

No desenvolvimento desse módulo, também foram analisados diversos sistemas similares, e, baseado nos requisitos definidos previamente, configurou-se uma solução (fig.3.23), com especial atenção para algumas características, tais como:

- facilidade de montagem e desmontagem;
- material: alumínio, com pequena espessura de parede, para uma boa dissipação de calor;
- folga entre a carcaça de proteção e a estrutura de suporte do conjunto laser-telescópio, conforme descrito no item 3.1.3.d (fig.3.15);
- a fixação da carcaça é feita por meio de quatro parafusos e molas prato, presos às bases de fixação e apoio do módulo de suporte. A função das molas prato é de dosar a protensão dos parafusos para

permitir deslocamentos da carcaça no sentido transversal à direção de protensão, devido à expansões e contrações térmicas, garantindo ao mesmo tempo a qualidade de fixação.

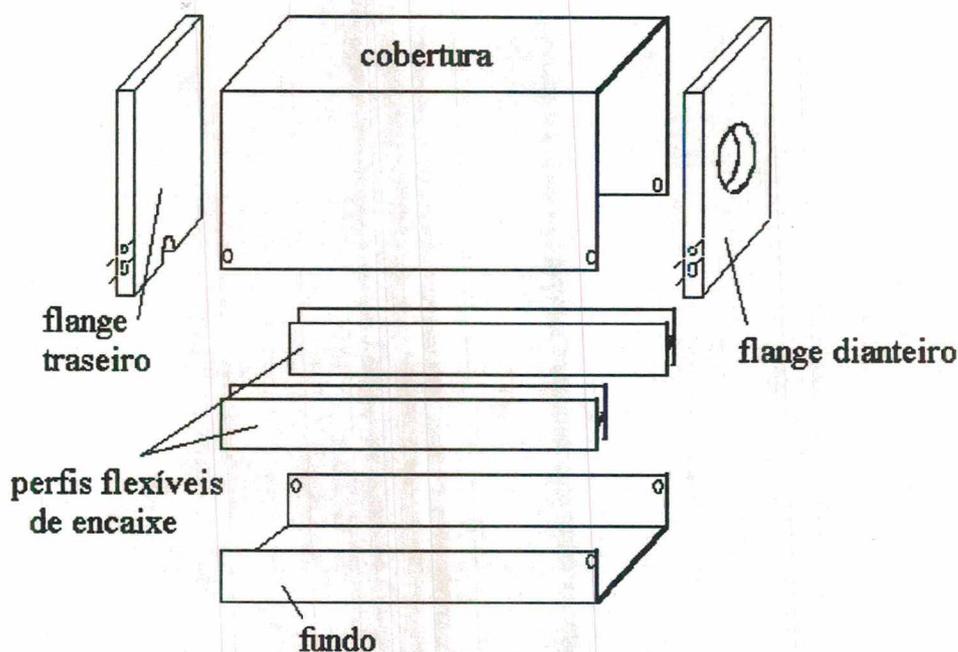


Figura 3.23- Configuração do módulo de proteção mecânica.

Deve-se perceber que com a vedação da carcaça através de uma cobertura metálica, haverá um aumento significativo no tempo de *warm-up*, principalmente se o sistema estiver operando com a ventilação forçada, no entanto existe a opção de trabalhar com ou sem cobertura de acordo com a necessidade ou não de reduzir-se o tempo de *warm-up*, lembrando que fundamentalmente deve-se atingir uma maior estabilidade espacial do feixe com a cobertura e conseqüente vedação da carcaça.

Como parte integrante também do módulo de proteção mecânica, especificou-se ainda uma janela óptica, com a função de permitir a passagem do feixe laser através da carcaça, e ao mesmo tempo garantir a vedação do conjunto contra interferências provenientes do ambiente, sendo dotada de um revestimento (*coating*) em ambas as superfícies.

Para a fixação desta janela óptica, desenvolveu-se um dispositivo (fig. 3.24), seguindo algumas diretrizes:

- fixação no telescópio, para minimizar erros devido a deslocamentos relativos entre telescópio e janela;
- não permitir interferência da carcaça da unidade geradora da reta padrão sobre o dispositivo, ou seja, deve haver folga garantida entre o dispositivo e a carcaça com um elemento elástico garantindo a vedação;
- facilidade de montagem e desmontagem, uma vez que a janela óptica regularmente precisa ser limpa.

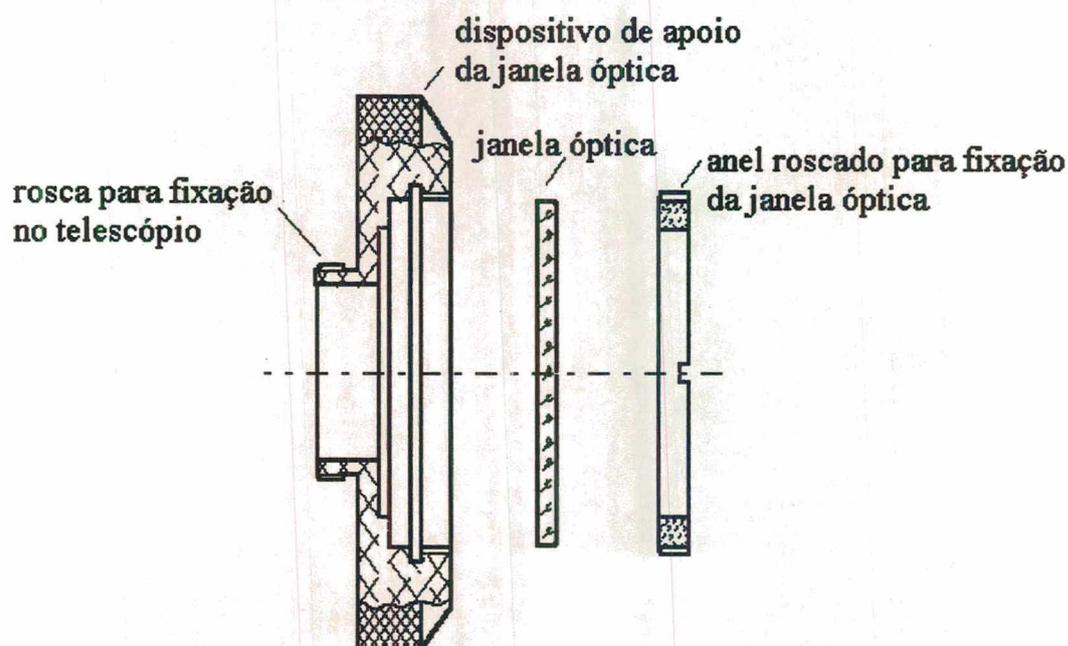
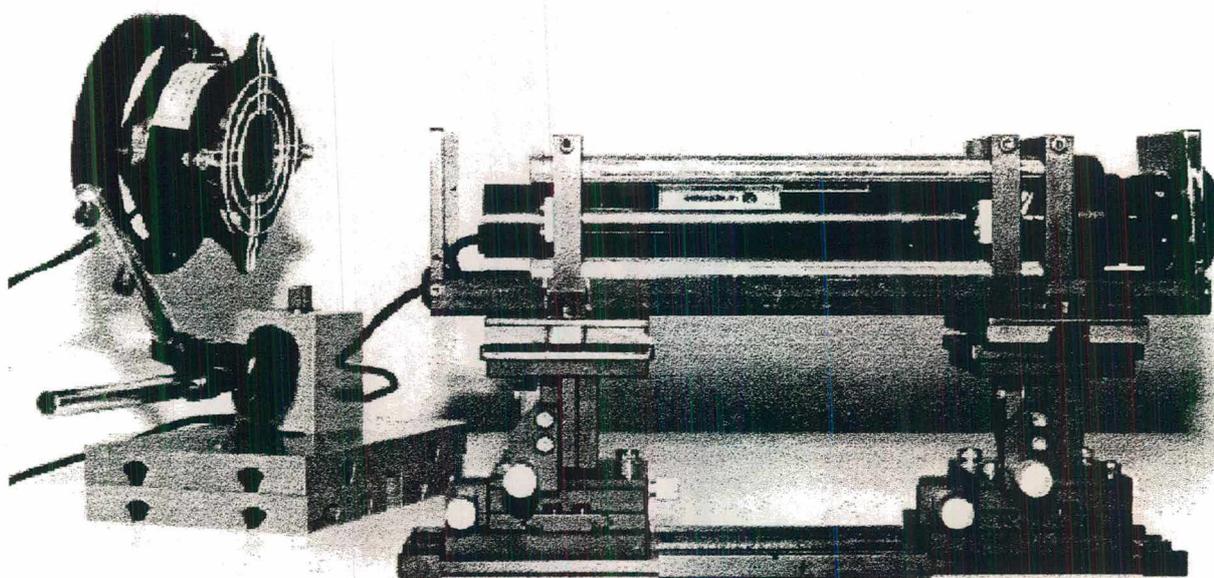


Figura 3.24- Dispositivo de apoio e fixação da janela óptica.

### 3.1.7 Integração dos Módulos

Reunindo o desenvolvimento de todos os módulos descritos dentro do ítem 3.1, integra-se as soluções em um único conjunto que caracteriza a configuração final do protótipo laboratorial, o qual está ilustrado na figura 3.25.



**Figura 3.25-** Configuração do conjunto do protótipo (carcaça aberta).

## **3.2 ANÁLISE TEÓRICA DE ERROS**

Uma vez concebido o protótipo, desenvolve-se um trabalho teórico de análise de erros, cujos passos são:

- o reconhecimento das fontes de erros;
- a avaliação dos erros, com uma estimativa numérica das grandezas envolvidas;
- e eliminação de erros, ou seja, possíveis atitudes para controle dos erros (tolerar, prevenir, compensar).

No trabalho de reconhecimento de erros, procurou-se fazer um levantamento bastante amplo das diferentes fontes de erros que afetam única e exclusivamente a unidade geradora da reta padrão, sendo esses erros classificados dentro do quadro da figura 3.26.

Entre as fontes de erros previamente levantadas, faz-se uma identificação dos erros sistemáticos e aleatórios.

### **3.2.1 Avaliação de Erros Sistemáticos**

Em primeiro plano é feita a avaliação dos erros sistemáticos, envolvendo nessa análise uma descrição da forma como cada um deles se manifesta e também apresentar alguns valores que possam dar uma idéia de ordem de grandeza.

MANIFESTAÇÃO DOS ERROS	FORMAS DE MANIFESTAÇÃO DOS ERROS		EXEMPLOS
Durante o uso (função)	desvios qualitativos	perturbação funcional	feixe desfocado, divergência, sensibilidade dos dispositivos de ajuste.
		efeitos secundários	reflexões, ruído óptico, vibrações.
	desvios quantitativos	parâmetros geométricos	desalinhamentos, deformações térmicas, deform. mecânicas
		relações de tempo	instabilidade de posição do feixe.
		parâmetros físicos	forças, resistências, potência do feixe, tensões.
Durante a fabricação	dificuldades de usinagem; dificuldades de montagem; dificuldades de ensaio; problemas com material; erros dimensionais e erros de forma; erros de posição; deformação, desalinhamento e folgas		tolerâncias pequenas; ajustagem indeterminada; pontos de medição de difícil acesso; peças especiais.

**Figura 3.26** - Reconhecimento de erros da solução desenvolvida.

- **Divergência do feixe:** Provoca uma variação no diâmetro do feixe ao longo do caminho óptico e, conseqüentemente, uma variação da densidade de potência. Como foi visto no ítem 3.1.2, por meio de um telescópio expande-se o feixe e em seguida ele é colimado, de maneira que essa divergência é bastante reduzida, e o feixe pode permanecer com o diâmetro praticamente constante ao longo de uma determinada distância, dependendo do projeto óptico e para qual distância o fator de ampliação do feixe foi otimizado. No caso específico do protótipo desenvolvido, já foi visto que o fator de ampliação  $A = 5$ , a distância ótima é de 12,7m, com a cintura do feixe no centro dessa faixa, e o diâmetro do feixe variando de 2,3 a 3,2mm. Considerando que a potência que incide no fotodetector é de 2mW, a variação da densidade de potência será de aproximadamente 0,5 a 0,25mW/mm<sup>2</sup>. No entanto a característica de

sensibilidade só será afetada significativamente se houver uma variação significativa na potência total incidente na área ativa do fotodetector, e como nesse caso específico ela se mantém em um nível bastante estável, a resposta do transdutor será também bastante estável.

- Desalinhamento estático do gerador laser: Segundo especificações do fabricante do gerador laser /52/, existe um desalinhamento estático na montagem do ressoador dentro da cápsula cilíndrica de alumínio (encapsulamento). Tipicamente os valores do desalinhamento são: inclinação = 1mrad = 1mm/m e desvio paralelo entre eixos = 0,25mm. Supondo que na montagem do gerador laser em conjunto com o telescópio, o alinhamento seja feito tomando como referência o eixo mecânico dos mesmos, esses valores são alterados pela característica de ampliação do telescópio, resultando: inclinação = 0,2mrad e desvio paralelo = 1,25mm. Este erro pode ser compensado mediante operações de ajustagem de alinhamento do gerador laser com o telescópio e ainda um segundo nível de alinhamento entre a unidade geradora da reta padrão e o fotodetector.

- Erros de fabricação e montagem do módulo de suporte: Supondo uma inclinação de 1° (5,5mrad) na montagem do telescópio, implicaria em um deslocamento angular de 1,1mrad após a amplificação do telescópio (5 vezes). Pode ser compensado, também com o ajuste de alinhamento do eixo óptico do gerador laser e do telescópio.

- Achatamento das esferas de apoio: O módulo de suporte da unidade geradora da reta padrão se apoia sobre três esferas, sendo que a esfera que sofre maior deformação é aquela que está em contato com a superfície plana da placa de acoplamento cinemático do módulo de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão. Considerando-se uma carga  $P = 20\text{N}$ , resultante do peso do sistema que está apoiado sobre as esferas mais a força magnética dos ímãs, e sendo esta

carga distribuída igualmente entre as três esferas, pode-se, para a esfera que está apoiada sobre a superfície plana, calcular o achatamento  $a$  ( $\mu\text{m}$ ) da esfera, com a seguinte equação:

$$a = \sqrt[3]{\frac{F^2}{d}} \quad (3.10)$$

Onde:  $F$  é a carga sobre a esfera, que nesse caso é 6,5N; e  $d$  é o diâmetro da esfera, que é 9,5mm. Esses valores aplicados à equação resultam em um achatamento  $a$  de aproximadamente 0,7 $\mu\text{m}$ . O achatamento nas outras duas esferas será menor pois estão apoiadas sobre uma ranhura em “V” e um furo cônico, com reações melhor distribuídas.

A seguir é apresentado uma análise de erros do módulo de ajustes da UGRP. No entanto, os erros deste sistema de ajustes não podem ser entendidos como erros da UGRP, pois estes não provocam erros de medição no laser de alinhamento.

- Erro de ortogonalidade das guias dos transladores verticais em relação à base: Trata-se de um erro com origem na fabricação ou montagem dos dispositivos. Considerando-se um desvio angular de 1' (0,29mrad) na direção vertical sobre toda a faixa de deslocamento que é de 10mm, calcula-se:

$$\text{erro} = 10 - 10 \cdot \cos 1' = 0,4\text{nm} \text{ (desprezível)}$$

- Erro de retilidade das guias dos transladores verticais: Segundo dados do fabricante dos transladores /37/, esse erro é da ordem de  $\pm 2\mu\text{m}$ , no entanto, esse erro é secundário, e sua ordem de grandeza se torna desprezível na sua transmissão à direção do feixe.

- Erro de ortogonalidade dos transladores horizontais em relação à direção z (direção z - fig.3.21): Erro com origem também na fabricação ou montagem dos dispositivos. Considerando-se um desvio de  $1^\circ$  (nos dois transladores, desvio =  $2^\circ$ ), e um curso de deslocamento de 10mm, calcula-se:

$$\text{erro} = 10 - 10 \cdot \cos 2^\circ = 6 \text{ mm}$$

- Erro de reticidade das guias dos transladores horizontais: Segundo dados do fabricante dos transladores /37/, esse erro é da ordem de  $\pm 2\mu\text{m}$ , e por ser um erro de primeira ordem, não é desprezível.

- Erro de planicidade e paralelismo entre as faces da placa de apoio cinemático com a ranhura em "V"; erro de reticidade no plano yz da ranhura; e erro de paralelismo da ranhura em relação à direção z conjugado com o erro de reticidade no plano xz: Estes erros dependem das condições de operação do sistema. Considerando-se, primeiramente no plano yz, uma condição de máximo desalinhamento onde o desnível (y) entre os transladores é de 2mm (fig. 3.27), calcula-se o deslocamento da esfera à partir de uma posição onde os dois transladores estão no mesmo nível ( $\Delta z$ ), a partir do cálculo do ângulo de desnível ( $\alpha$ ), da seguinte forma:

$$\alpha = \text{arc sen} (2/200) = 0,6^\circ$$

e

$$\Delta z = 200 - 200 \cdot \cos \alpha = 9,8\mu\text{m}$$

No plano xz, considera-se também um desnível (x) de 2 mm entre os transladores, e sendo  $\Delta z$  o deslocamento da esfera (direção z) e  $\alpha$  o ângulo de desnível, baseado na figura 3.28, calcula-se:

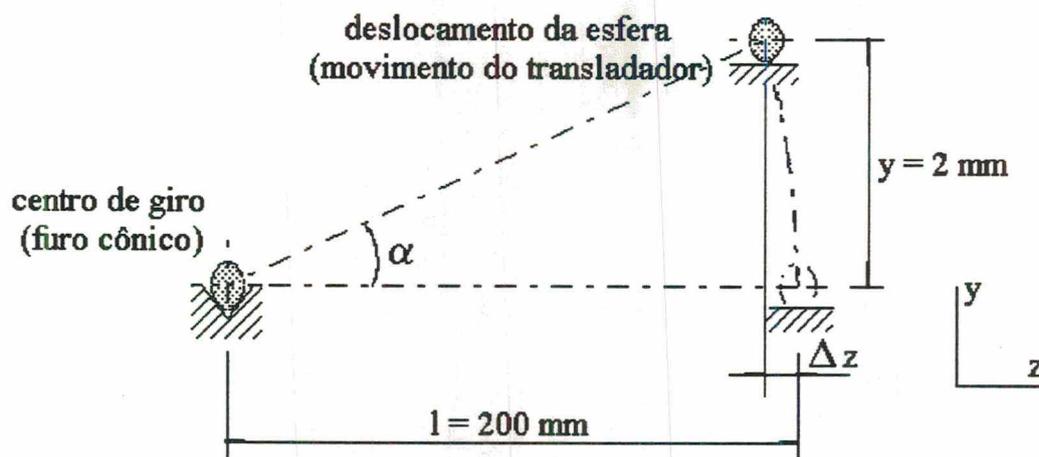


Figura 3.27- Condição de máximo desnível dos transladadores, no plano yz.

$$\beta = \text{arc tg} (25/200) = 7,1^\circ$$

considerando,  $\beta' = \beta$

$$k = x/\cos \beta = 2/\cos 7,1^\circ = 2,015\text{mm}$$

e

$$\Delta z = \sqrt{k^2 - x^2} = 0,25\text{mm}$$

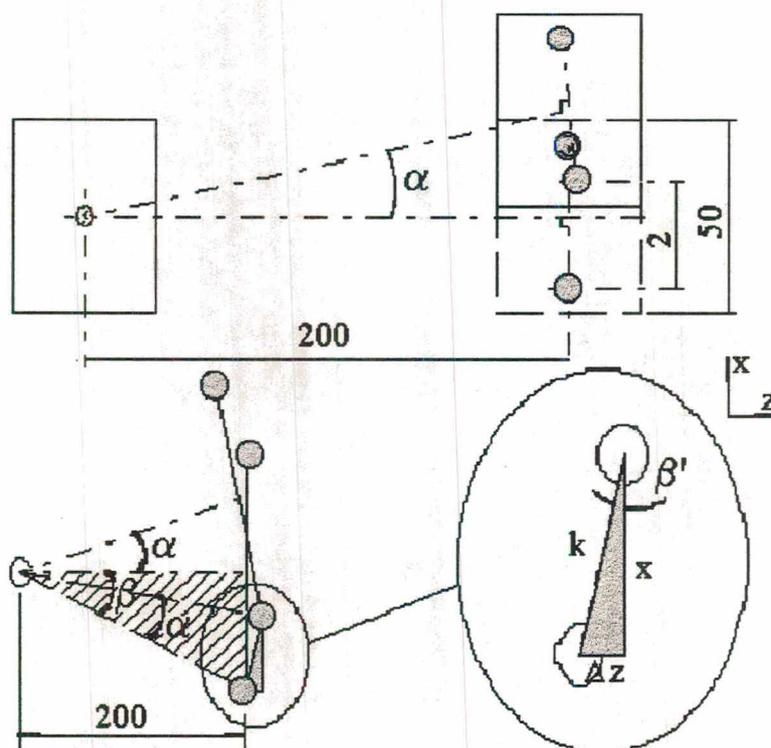
Para estes valores de deslocamento da esfera, os erros dimensionais e erros de forma e posição das placas de apoio cinemático podem ser considerados desprezíveis, desde que as peças estejam dentro das tolerâncias normais de fabricação /59/.

- Desalinhamento do feixe laser em relação à direção z: Segundo os requisitos do laser de alinhamento /27/, o ajuste do laser em relação à direção z deve convergir para dentro de uma faixa de  $40\mu\text{rad}$  ( $\pm 20\mu\text{rad}$ ). Considerando-se que a distância entre os transladadores é de 200mm

e que a sensibilidade de acionamento do manípulo de ajuste, segundo dados do fabricante /37/, é de  $2\mu\text{m}$ , mas supondo ainda que a carga sobre os transladores e atritos adicionais existentes no sistema provoquem uma perda na sensibilidade, ficando na ordem de uma divisão de escala ( $10\mu\text{m}$ ), a resolução angular do ajuste ( $\theta$ ) seria:

$$\theta = \text{arc tg} (0,01/200) \approx 10'' \approx 45\mu\text{rad}$$

Esse seria o erro residual no sistema após todas as operações de ajustagem.



**Figura 3.28-** Condição de máximo desnível dos transladores, no plano xz.

A figura 3.29 apresenta um quadro que resume os erros sistemáticos que são mais significativos dentro da avaliação feita.

ERROS SISTEMÁTICOS DA SOLUÇÃO				
	descrição	observações	valor típico do erro	avaliação
1	desalinhamento estático do gerador laser	inclinação	0,2mrad	ajustar
2	erros de fabricação e montagem do módulo de suporte	inclinação de 1° na montagem do telescópio	1,1mrad	ajustar
3	achatamento das esferas (esfera/plano)	diâmetro da esfera = 9,5mm F = 6,5N	0,7µm	compensar
4	erro de ortogonalidade dos transladores horizontais em relação ao eixo z	plano xz desvio de 1° curso = 10mm	6µm	ajustar
5	erro de retilidade das guias dos transladores horizontais	plano xz dados do fabricante	±2µm	ajustar
6	erro residual do ajuste de alinhamento do feixe laser em relação à direção z	resolução do dispositivo de ajuste = 10µm	45µrad (*)	tolerar
(*) Este é o erro residual do sistema após concluídas todas as operações de ajustagem.				

**Figura 3.29-** Quadro de erros sistemáticos significativos.

### 3.2.2 Avaliação de Erros Aleatórios

Os erros aleatórios só podem ser determinados à partir de dados experimentais do sistema desenvolvido. No entanto pode-se fazer uma estimativa analisando-se resultados de ensaios prévios. Estes erros são devidos basicamente a influências do ambiente.

- Reflexões: Feixes satélites, são feixes secundários criados por reflexões do feixe principal e estão presentes em todos os lasers a gás. Tipicamente a potência do feixe secundário é menor que 0,2% do feixe principal e raramente maior que 0,5% /37/. No sistema desenvolvido estes feixes secundários surgem devido à reflexões da janela óptica, do filtro espectral (filtro de interferência)

e superfície do fotodetector. Com tantas reflexões, é importante evitar que um desses feixes secundários "realmente" o fotodetector, pois essa realimentação seria compreendida como um deslocamento. Mesmo que essa potência seja muito inferior à potência útil podem ocorrer erros grandes quando se está medindo deslocamentos da ordem de micrometros.

- Ruído óptico: Variação do perfil energético do feixe, devido à difração da luz (sujeira nas superfícies ópticas), dispersão da luz no caminho óptico (pó, vapor, etc.) e turbulência do ar (movimentação de pessoas, etc.). As instabilidades podem chegar até  $10\mu\text{rad}$ .
- Vibrações: A grandeza da instabilidade depende basicamente da intensidade das vibrações e também da estrutura de suporte e apoios do gerador laser.
- Deformações térmicas: Eventos aleatórios que atuam sobre o sistema gerando um desequilíbrio térmico. Provocam modificações nos elementos mecânicos, que por sua vez desestabilizam espacialmente o feixe laser. Tomando-se como um evento típico fluxos aleatórios de ar provocados por movimentação de pessoas no ambiente, as instabilidades do feixe podem chegar a  $3\mu\text{rad}$ .

Variações de temperatura provocam modificações nos elementos mecânicos do sistema. As maiores alterações e conseqüentemente os maiores desvios de posição do feixe ocorrem durante o período de estabilização térmica da unidade geradora da reta padrão, pois ocorre um rápido aquecimento de todos os elementos. No entanto este é um comportamento normal e previsível, onde os deslocamentos do feixe são bastante grandes, mas que tendem a atingir um nível suficientemente pequeno, após o *warm-up*, para a realização das medições. Se for feito um

alinhamento do conjunto laser-telescópio após o período de estabilização térmica, estes desvios que ocorrem até que o sistema entre em regime podem ser tolerados. A seguir será feita uma análise quantitativa desses desvios durante a estabilização térmica.

a) Desvios devido a dilatação dos apoios do gerador laser: Nos pontos de apoio do gerador laser tem-se um aquecimento diferenciado, com  $\Delta T_d \approx 30^\circ\text{C}$  no apoio dianteiro e  $\Delta T_t \approx 25^\circ\text{C}$  no apoio traseiro, e que não pode ser modificado por se tratar de uma característica intrínseca do gerador laser. Com base na figura 3.30, o aquecimento diferenciado representaria um desvio angular  $\varphi \approx 14,5\mu\text{rad}$  e um desvio paralelo  $\Delta \approx 13\mu\text{m}$ . Após o telescópio, com a transformação do feixe, os desvios seriam:  $\varphi' \approx 2,9\mu\text{rad}$  e  $\Delta' \approx 65\mu\text{m}$ . A parcela angular é pequena e está dentro dos limites do desalinhamento máximo permissível.

b) Desvios devido a modificações internas do ressoador: Segundo dados experimentais, dependendo da posição radial (giro) em que o gerador laser é montado, podem haver variações nas direções x e y do feixe dentro de uma faixa de  $\pm 400\mu\text{rad}$ , o que é normal durante o período de estabilização térmica.

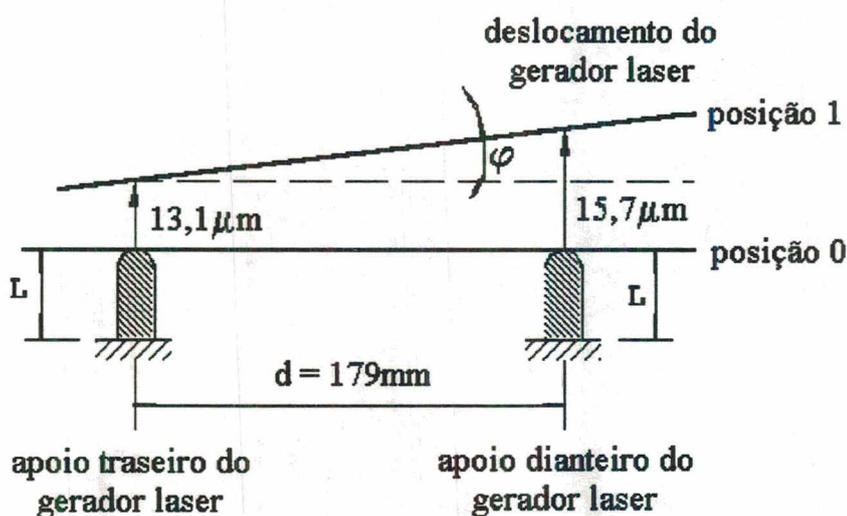


Figura 3.30- Influência da dilatação dos apoios.

- Deformações mecânicas: Basicamente devido a choques mecânicos atuando diretamente sobre a unidade geradora da reta padrão. Supondo-se que esses choques são de baixa intensidade, as instabilidades não devem exceder  $2\mu\text{rad}$ .

### **3.3 PLANOS DE AJUSTAGEM**

Existe na solução desenvolvida para o protótipo dois sistemas de ajuste: um de alinhamento do conjunto laser-telescópio e o outro de alinhamento da unidade geradora da reta padrão.

#### **3.3.1 Ajuste de Alinhamento do Conjunto Laser-Telescópio**

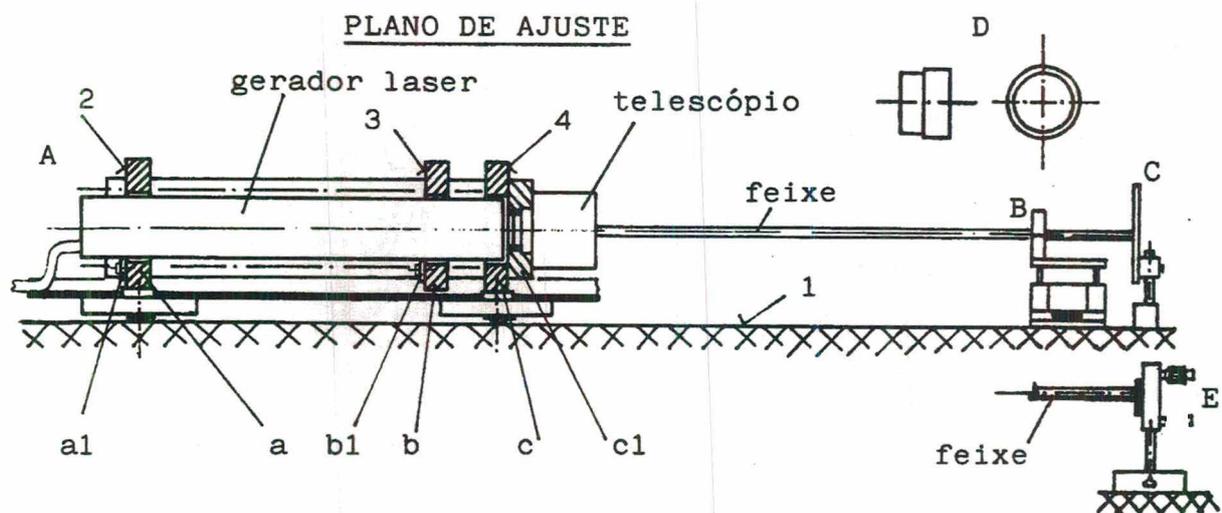
Consiste de uma seqüência de operações de ajustagem manual, com o objetivo de alinhar os eixos ópticos do gerador laser e do telescópio. Como um alinhamento perfeito não é possível, desenvolve-se uma metodologia que visa aproximar-se bastante desta condição ótima.

Na figura 3.31 é apresentado o plano de ajuste para o alinhamento do conjunto laser-telescópio, onde estão indicados todos os elementos envolvidos na metodologia desenvolvida, e na figura 3.32 estão detalhados alguns destes elementos. Nesta metodologia, adota-se os seguintes passos básicos:

- a) Ajuste inicial do apoio dianteiro do gerador laser, com auxílio do dispositivo D (fig 3.31), de forma a centrar radialmente o gerador laser no suporte.
- b) Ajuste inicial dos apoios traseiros do gerador laser de maneira que o feixe incida no centro de

B (fig. 3.33).

- c) Posicionar os elementos B e C (fig 3.31) o mais longe possível e repetir os ajustes no apoio traseiro, de maneira a manter o alinhamento do gerador laser (se necessário, reajustar o apoio dianteiro).
- d) Repetir os passos b e c, até que o alinhamento seja mantido.
- e) Posicionar o telescópio e ajustá-lo, com auxílio de um espelho plano. Em seguida fazer os travamentos necessários.



Base de ajuste	superfície de referência 1 superfícies de apoio 2, 3 e 4
Unidades de ajuste	a, b, c - suporte a1, b1, c1 - elementos de acoplamento
Elementos de ajuste	A - gerador laser B - dispositivo de intersecção do feixe, formado por 2 fios ( $\varnothing \cong 50\text{mm}$ ), em forma de cruz C - anteparo D - dispositivo para ajuste inicial do suporte b E - espelho plano ajustável

**Figura 3.31-** Plano de ajuste para o alinhamento do conjunto laser-telescópio.

Um pequeno desalinhamento residual não representa um erro significativo, já que não ocorrerá variações no perfil energético do feixe. Portanto o sistema de ajuste não requer uma grande resolução de ajuste. O sistema desenvolvido para o protótipo não permite um ajuste fino, por uma

opção de projeto, já descrito no item 3.3.1.b. O ajuste fino de alinhamento da reta padrão pode ser feito com o procedimento que será descrito no próximo item.

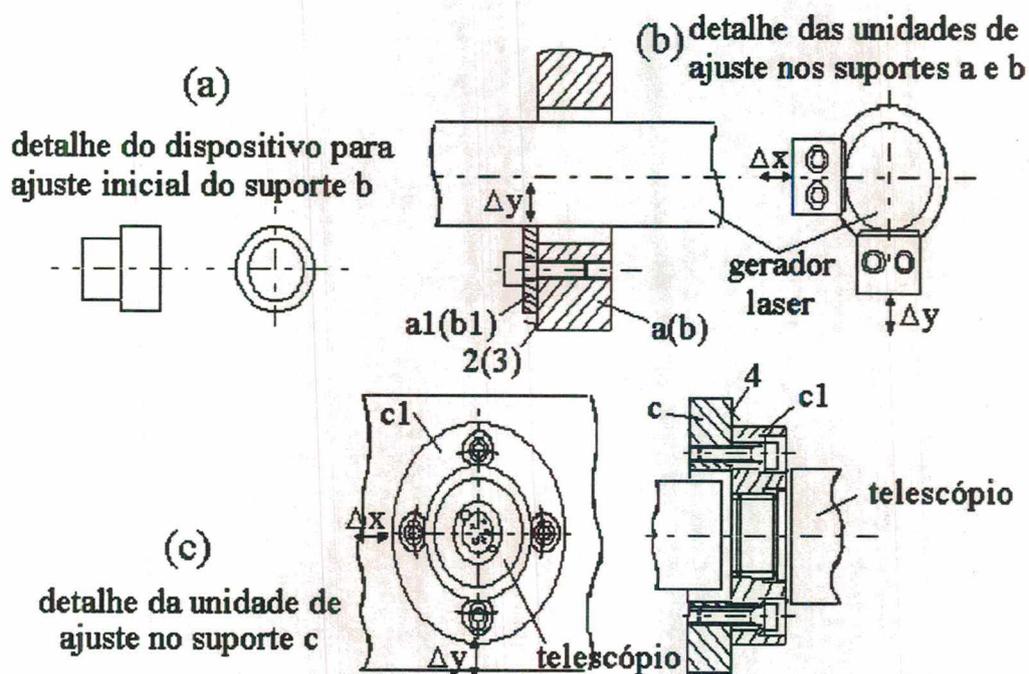


Figura 3.32- Detalhes referentes ao plano de ajuste da figura 3.31.

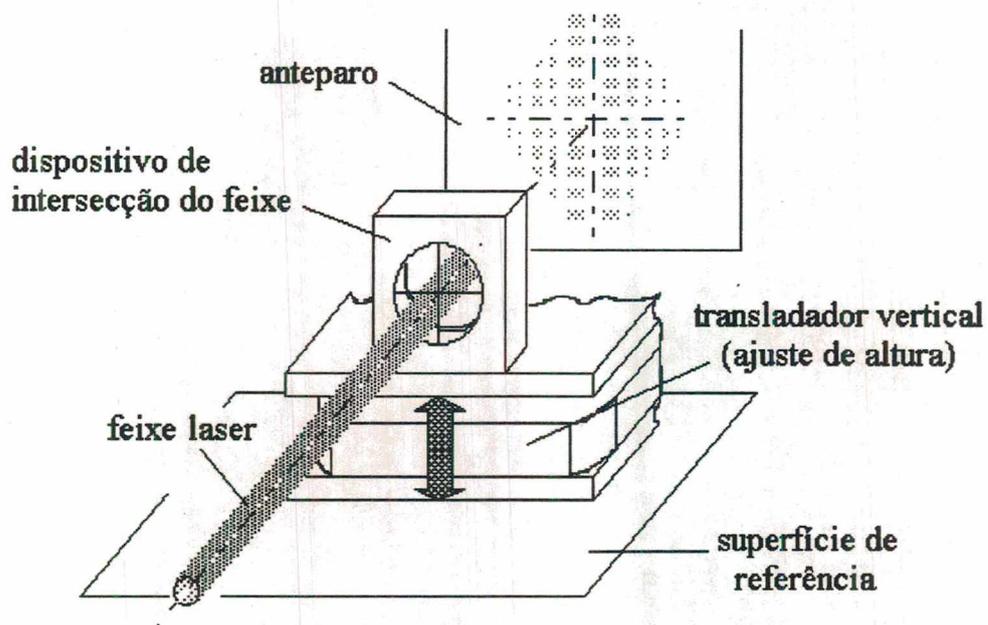


Figura 3.33- Detalhe do dispositivo de intersecção do feixe (plano de ajustagem da figura 3.31).

### 3.3.2 Ajuste de Alinhamento da Reta Padrão

Na medição do erro de retilidade de uma trajetória, a reta padrão deve ser posicionada de forma aproximadamente coincidente com a trajetória que se quer verificar. Enquanto que no ensaio de retilidade de linha a reta padrão deve ser colocada de forma aproximadamente paralela à linha controlada, com a mínima distância possível /2/. Da mesma forma que no outro alinhamento descrito (item 3.3.1) um alinhamento perfeito não é possível, pois se desconhece esta posição efetiva.

Com o objetivo principal de reduzir o tempo de ajustagem, foi estabelecida uma metodologia de ajuste instrumentada, ou seja, através de um modelo matemático genérico, determina-se os valores dos deslocamentos a serem dados na unidade geradora da reta padrão (transladadores).

Na figura 3.34 é mostrada a geometria para o algoritmo de ajustagem.

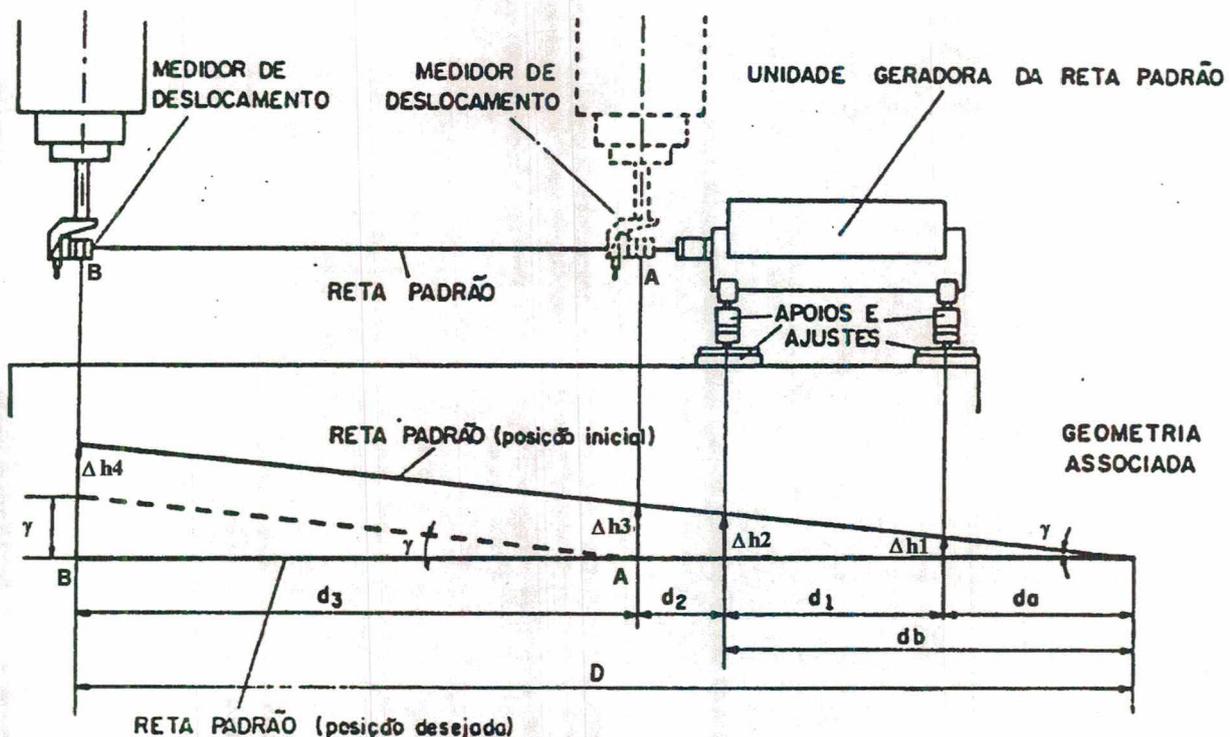
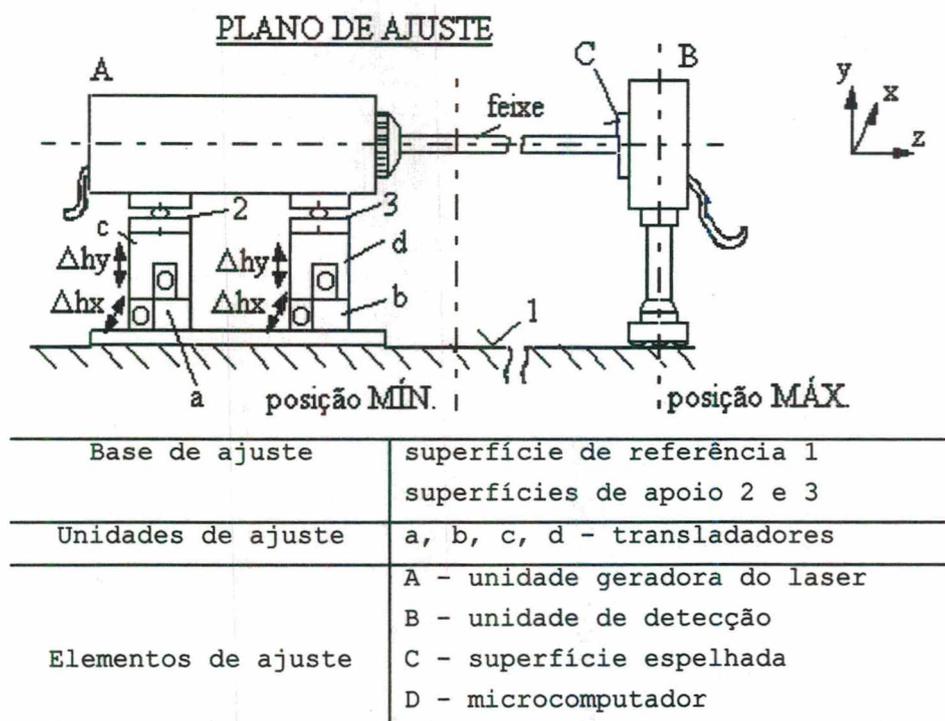


Figura 3.34- Geometria para o algoritmo de ajustagem do alinhamento da UGRP /1/.

De uma forma sucinta, as operações de ajustagem, tomando-se como referência o plano de ajuste da figura 3.35, são as seguintes:

- Posicionar a unidade de detecção (B na fig. 3.35) o mais distante possível da unidade geradora da reta padrão (posição máxima de valor conhecido) e fazer os ajustes grosseiros, de forma que a reflexão do feixe incida próximo à saída do laser.
- Posicionar B próximo à unidade geradora da reta padrão (posição mínima de valor conhecido) e fazer os ajustes  $\Delta h_{x1}$ ,  $\Delta h_{x2}$ ,  $\Delta h_{y1}$  e  $\Delta h_{y2}$ , calculados pelo microcomputador.
- Posicionar B na posição máxima e fazer os novos ajustes calculados pelo microcomputador.
- Repetir as operações b e c até que o erro residual  $\gamma$  (fig. 3.34), que também é calculado pelo computador, convirja para dentro da faixa de  $40\mu\text{rad}$  que é o desalinhamento máximo permissível.
- Concluídos os ajustes, fazer os travamentos.



**Figura 3.35-** Plano de ajuste para o alinhamento da unidade geradora da reta padrão.

Com módulo de ajustes e fixação que integra a unidade geradora da reta padrão, conseguiu-se um sistema que permite os ajustes de uma forma bastante confortável, mas a resolução angular dos ajustes, conforma estimativa feita no item 3.2.1, é de  $45\mu\text{rad}$ , ou seja, um pouco acima do requerido, sendo esse o valor do erro residual do ajuste. A implementação do procedimento controlado por computador foi executada com sucesso para o laser de alinhamento, mas não foi testado no âmbito deste trabalho.

## **4 INSTRUMENTAÇÃO PARA QUALIFICAÇÃO DA UNIDADE GERADORA DA RETA**

### **PADRÃO**

Um dos objetivos definidos na concepção deste trabalho estabelece a necessidade de fazer-se a montagem de um banco de ensaios automatizado para a qualificação do protótipo desenvolvido, dando-se uma especial atenção à medição da variação espacial do feixe. É, portanto, objeto de estudo deste capítulo, a descrição do trabalho de definição dos sistemas de medição e os demais elementos que configuram a infra-estrutura para os ensaios.

#### **4.1 MÉTODO PARA MEDIÇÃO DA INSTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE LASER**

Existem duas formas de caracterizar-se a variação espacial do feixe laser e que já foram citadas no item 2.2, e para cada uma, um modelo matemático, cujas variáveis dependem do sistema de medição adotado. Estes modelos serão descritos em seguida.

##### **4.1.1 Definição do Modelo Ideal para Medição**

Neste modelo (figura 4.1) o deslocamento do feixe é caracterizada por duas componentes - a variação

paralela ( $D$ ) e a variação angular ( $\varphi$ ), que são as variáveis do sistema de equações.

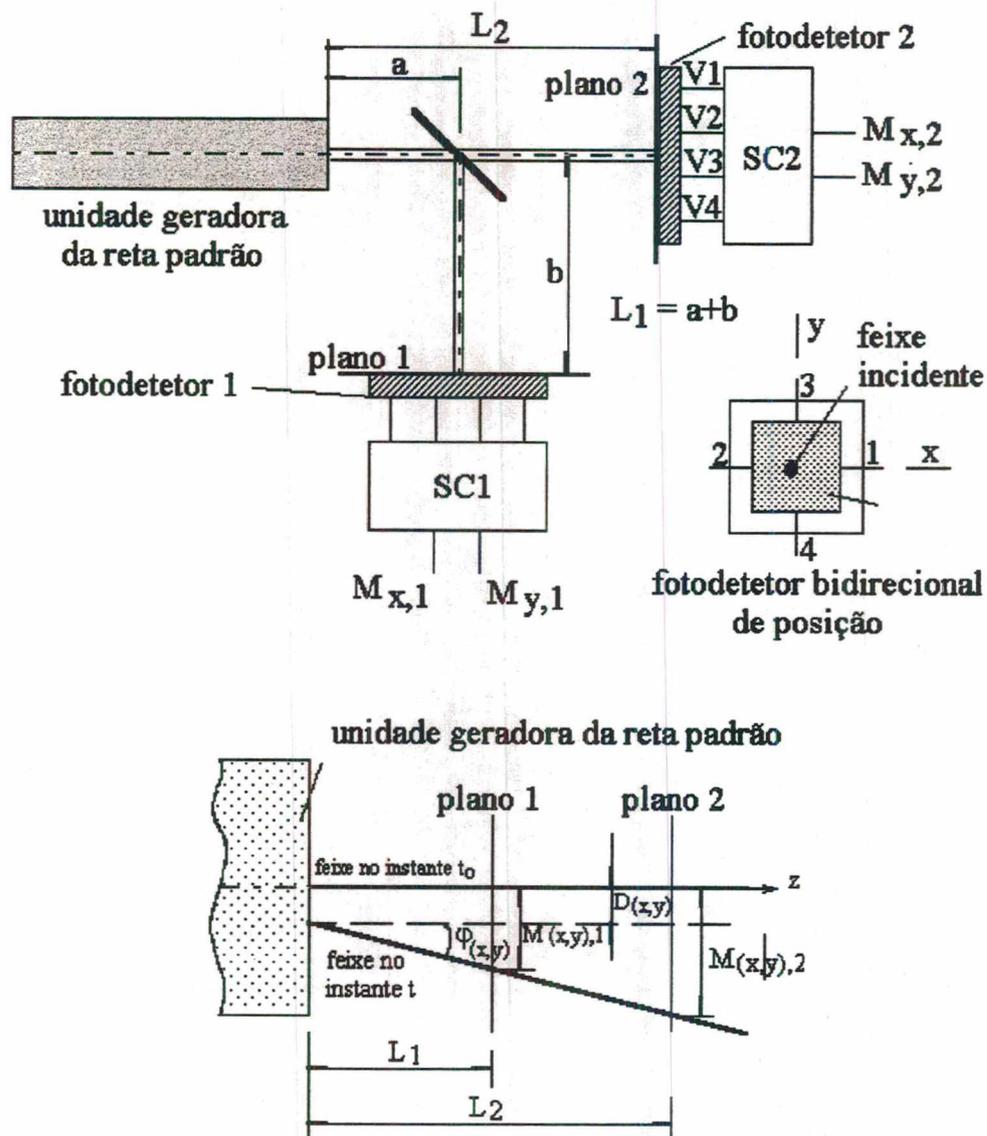


Figura 4.1- Método para medição da variação de posição do feixe (modelo ideal).

A figura 4.1 ilustra um esquema dessas variações, segundo um dos planos de propagação do feixe, sendo válido também para o outro plano. Neste esquema está representado o gerador laser e a divisão do feixe em duas direções, sendo que em cada uma das direções é montado um sistema de medição de deslocamentos do feixe (planos 1 e 2). Os fotodetetores devem ser posicionados a distâncias conhecidas do gerador laser ( $L_2 \gg L_1$ ). Cada sistema de medição fornece duas medidas ( $M_x$ ,  $M_y$ ), uma

para cada eixo do plano do fotodetector. Essas medidas são usadas nas equações para determinação das variações do feixe.

Baseado no esquema da figura 4.1, apresenta-se abaixo o equacionamento do modelo, considerando-se inicialmente o eixo x do plano da superfície ativa do fotodetector.

$$\begin{aligned} M_{x,1} &= -(\varphi_x \times L_1 + D_x) \\ M_{x,2} &= \varphi_x \times L_2 + D_x \end{aligned} \quad (4.1)$$

Resolvendo este sistema de equações, considerando que  $\varphi_x$  e  $D_x$  são as variáveis desconhecidas, obtém-se:

$$D_x = \frac{(M_{x,1} \times L_2 + M_{x,2} \times L_1)}{(L_2 - L_1)} \quad (4.2)$$

e

$$\varphi_x = \frac{(M_{x,2} + M_{x,1})}{(L_2 - L_1)} \quad (4.3)$$

Nas equações apresentadas,  $L_2$  e  $L_1$  são valores conhecidos e  $M_{x,1}$  e  $M_{x,2}$  são as medidas obtidas através do seguinte processamento:

$$M_{x,1} = K_{x,1} \times \frac{V_{1,1} - V_{2,1}}{V_{1,1} + V_{2,1}} \quad (4.4)$$

e

$$M_{x,2} = K_{x,2} \times \frac{V_{1,2} - V_{2,2}}{V_{1,2} + V_{2,2}} \quad (4.5)$$

O mesmo equacionamento é válido também para a direção y da superfície ativa do fotodetector, ficando:

$$D_y = \frac{(M_{y,1} \times L_2 + M_{y,2} \times L_1)}{(L_2 - L_1)} \quad (4.6)$$

e

$$\varphi_y = \frac{(M_{y,2} + M_{y,1})}{(L_2 - L_1)} \quad (4.7)$$

Neste equacionamento apresentado, temos:

$V_{ij}$  ... leitura dos fotodetetores (V), sendo i o índice que define o terminal do fotodetector e j o índice do fotodetector;

$K_{x,i}$  e  $K_{y,i}$  ... constantes de calibração do fotodetector (mm/V/V), levantadas experimentalmente, sendo i o índice que define o fotodetector;

$M_{x,i}$  e  $M_{y,i}$  ... medidas (mm), sendo i o índice do fotodetector.

Uma condição importante nesse modelo é a aquisição simultânea das leituras dos fotodetetores, no sentido de reduzir-se a dispersão da medição a níveis compatíveis com os requisitos de incerteza de medição ( $I_m$ ) do sistema de medição.

Esse modelo não foi adotado em função, exclusivamente, da não disponibilidade de dois sistemas de medição de deslocamentos.

#### 4.1.2 Definição do Modelo Adotado

O modelo adotado caracteriza a variação espacial do feixe através de uma única componente, o desvio total do feixe ( $\varphi$ ). Essa componente é definida a partir do conhecimento da distância fixada entre o gerador de laser e a superfície do fotodetector do sistema de medição, e do conhecimento também do ponto de incidência do feixe no fotodetector, o qual define um ponto no espaço.

Este modelo requer apenas um único sistema de medição, sem a necessidade de um componente óptico para a divisão do feixe, e o desvio espacial do feixe é dado em radianos ou  $\mu\text{m/m}$  (fig. 4.2).

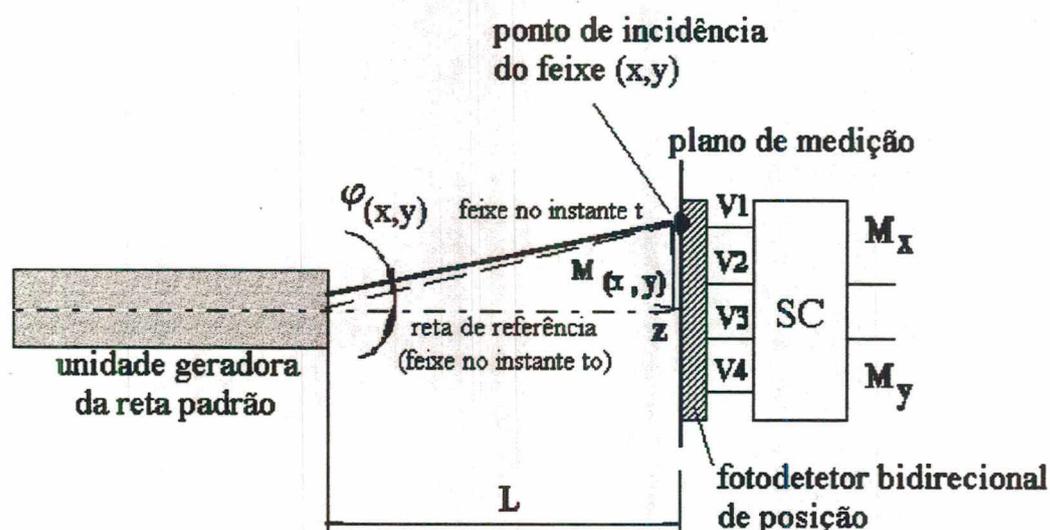


Figura 4.2- Modelo adotado para a medição dos desvios " $\varphi$ " do feixe laser.

A desvantagem deste modelo é o desconhecimento das parcelas paralela e angular desse valor medido. No entanto pode-se fazer uma avaliação bastante aproximada da componente paralela, realizando-se uma medição com o fotodetector o mais próximo possível da saída do gerador de laser, simulando-se dessa forma uma situação onde a componente angular é pouco significativa. A componente paralela levantada deverá manter a mesma ordem de grandeza, qualquer que seja a faixa de operação

longitudinal, passando a ser ela a parcela insignificante para medições a longas distâncias.

Baseado no esquema deste modelo de medição adotado (fig. 4.2), pode-se equacionar o desvio total do feixe ( $\varphi$ ), para as duas direções do plano de medição, da seguinte maneira:

$$\operatorname{tg} \varphi_{(x,y)} \approx \varphi_{(x,y)} = \frac{M_{(x,y)}}{L} \quad (4.8)$$

onde:

$\varphi_{(x,y)}$  ... é o desvio total do feixe (rad ou  $\mu\text{m/m}$ ), sendo  $1\mu\text{rad} = 1\mu\text{m/m}$ ;

$L$  ... é a distância da saída do gerador laser ao plano da superfície ativa do fotodetector;

$M_{(x,y)}$  ... são as medidas (mm), na direção x e na direção y do plano da superfície ativa do fotodetector, e seus valores são determinados também a partir da equação (4.4).

## 4.2 INFRAESTRUTURA PARA ENSAIOS

Com o conhecimento das grandezas a medir e das condições ambientais necessárias para a realização dos ensaios, fez-se a especificação de uma instrumentação adequada e disponível, e que é classificada e descrita em maiores detalhes nos itens seguintes.

### 4.2.1 A Bancada

Para se executar os experimentos e medições é desejável um ambiente livre de vibrações. Sistemas (ópticos) com múltiplos componentes são particularmente vulneráveis a vibrações que normalmente

induzem uma degradação no desempenho do conjunto, e, portanto, devem ser individualmente montados e alinhados em uma estrutura rígida e precisa. Fontes de vibrações são comuns em praticamente todos os ambientes.

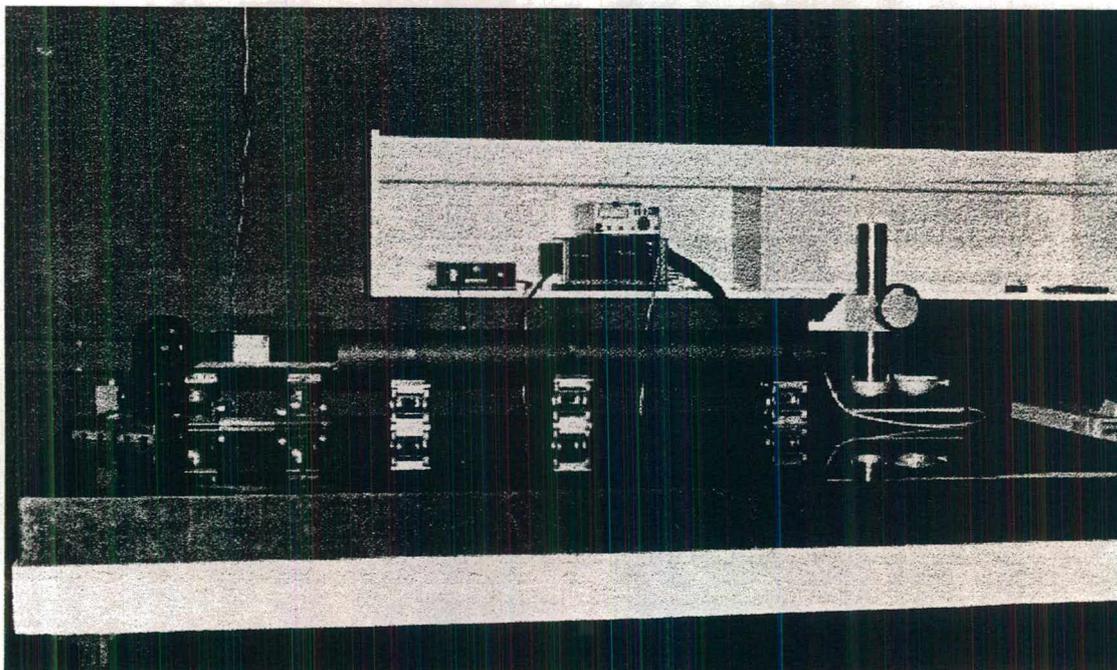
Usualmente, a superfície em que um sistema óptico é montado, deve satisfazer muitos requisitos básicos. Ela deve ser provida de uma base rígida onde montagens e alinhamentos ópticos possam ser realizados, com estabilidade térmica confiável e não inerente a vibrações ressonantes. Ela deve isolar eficazmente vibrações causadas por partes móveis ou motorizadas no experimento, prevenindo contra a influência destas nos elementos ópticos e estruturais críticos. É desejável um isolamento do experimento das vibrações provenientes de ambientes externos ao laboratório.

Se estes critérios não são conseguidos, efeitos indesejáveis freqüentemente poderão ocorrer, com um componente individualmente ou o sistema como um todo não funcionando devidamente.

Foi utilizado uma bancada de granito (figura 4.3), com dimensões que permitem a montagem de ensaios que não requerem um caminho óptico muito grande. As características de planicidade da superfície não foram levantadas, pois não seria muito relevante o conhecimento desta. O granito fica isolado da estrutura metálica que o sustenta, através de uma camada de espuma, e a estrutura é apoiada sobre o solo em quatro pés com características também isolantes.

Em termos de estabilidade, a bancada pôde ser bastante avaliada, através de diversos experimentos com objetivos semelhantes e demonstrou ter estabilidade aceitável nas condições ambientais do laboratório, sem prejuízo ao funcionamento do sistema. Do ponto de vista de estabilidade térmica, não houve qualquer preocupação, considerando-se que o ambiente laboratorial possui condições de

temperatura controladas. O isolamento com relação ao ambiente externo, também foi satisfatório.



**Figura 4.3-** Bancada para montagem dos experimentos.

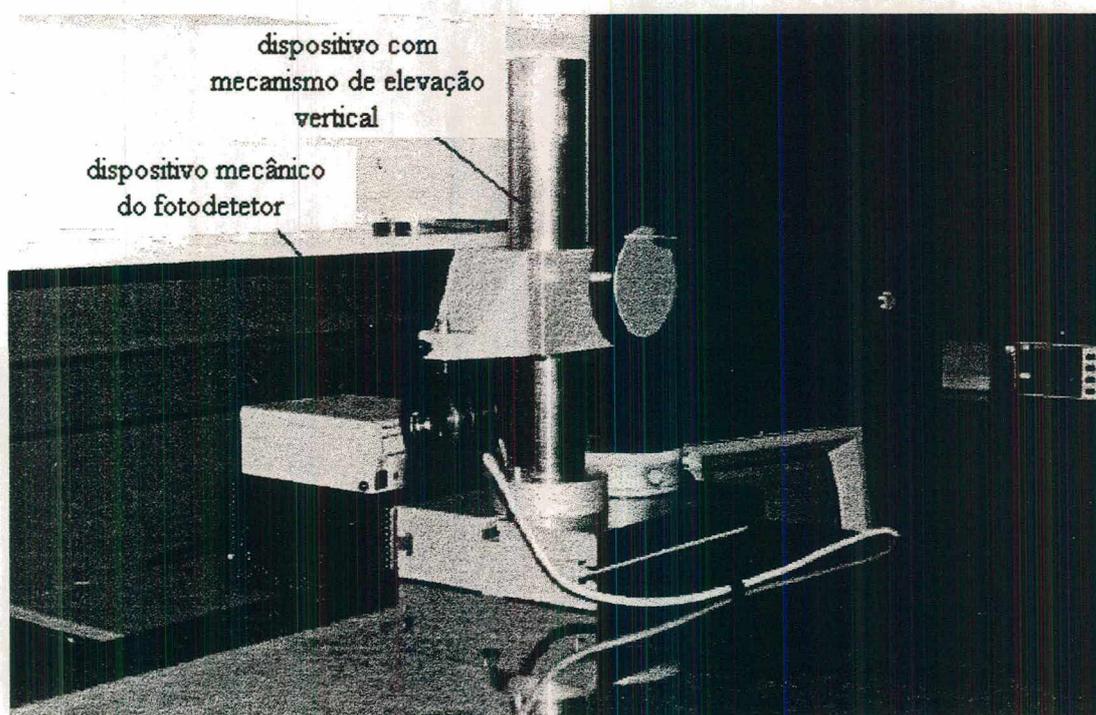
Na figura 4.3 é apresentada uma fotografia da bancada de granito, e sobre ela os componentes da montagem para ensaios.

#### **4.2.2 Componentes Mecânicos e Ópticos**

Além dos componentes integrantes da unidade geradora da reta padrão (telescópio, janela óptica, transladores) já detalhados nos capítulos anteriores, alguns outros componentes de natureza mecânica e ópticas foram necessários para compor o banco de ensaios, e são citados e caracterizados a seguir.

a) Dispositivo Mecânico do Fotodetetor.

Este dispositivo pode ser visto na figura 4.4, montado em um dispositivo maior, sobre a bancada de granito. É constituído basicamente de uma peça cilíndrica, usinada em alumínio, cuja função principal é alojar o fotodetetor em uma posição com um referencial bem definido, de maneira a facilitar o alinhamento e centragem do fotodetetor. Ao mesmo tempo, a mesma peça possui dois outros alojamentos frontais para o filtro de interferência (ou filtro espectral) e janela óptica, que são facilmente montados e fixados através de um anel roscado. Internamente existe um volume livre reservado para o posicionamento de um circuito eletrônico de conversão corrente/tensão (conversor I/V), parte integrante do transdutor (item 4.2.3). Fechando todo o conjunto existe uma tampa na parte traseira. Fixado radialmente ao corpo cilíndrico (fixação roscada), existe um eixo de aço cuja direção é orientada segundo a direção  $y$  do fotodetetor, e coincidente com o plano da superfície ativa do fotodetetor, sendo que sua função é de fixação do dispositivo a uma estrutura adequada aos ensaios e também servir como um eixo material de referência (direção  $y$ ) para alinhamento do fotodetetor.



**Figura 4.4-** Montagem dos dispositivos para detecção dos sinais, sobre a bancada.

O filtro de interferência acima citado, é um componente óptico que permite a isolamento de intervalos de comprimento de onda de poucos nanômetros, tendo sido, neste caso específico do laser de He-Ne, especificado um filtro otimizado para um comprimento de onda " $\lambda$ " de 632,8nm. A finalidade principal dessa isolamento é permitir a recepção do sinal do laser, sem a interferência de outras fontes luminosas indesejáveis. Para isso o dispositivo mecânico do fotodetector incorpora um alojamento na sua estrutura, devidamente dimensionado para o filtro bem em frente ao fotodetector, alinhado com ele e com tolerâncias de paralelismo adequadas.

A janela óptica, por sua vez, deve ser colocada logo em frente ao filtro de interferência, também em um alojamento no conjunto do dispositivo de fixação do fotodetector e alinhado. As características específicas da janela óptica são as mesmas daquela especificada para o módulo de proteção mecânica da unidade geradora da reta padrão, inclusive com as mesmas funções.

#### b) Dispositivo com Mecanismo de Elevação Vertical.

Esse dispositivo também pode ser visto nas figuras 4.3 e 4.4 montado sobre a bancada, e sua função principal pode ser caracterizada como elemento de sustentação do dispositivo mecânico do fotodetector e adaptação deste às condições de ensaio. Ele permite um ajuste grosseiro de posicionamento do transdutor de deslocamentos, na direção vertical (direção y) e garante uma montagem rígida suficiente para as condições de ensaio.

#### c) Tubo de Isolamento do Caminho Óptico.

Esse elemento pode ser visto na figura 4.3, montado em conjunto com os demais equipamentos. Sua

função consiste em isolar o caminho óptico do feixe, protegendo de turbulências provenientes do ambiente, que poderiam alterar os resultados dos ensaios.

Turbulências médias no ambiente podem provocar desvios no feixe, da ordem de  $5\mu\text{m/m}$  /23/. Alguns autores /10,60/, equacionaram a influência de gradientes de temperatura sobre a estabilidade do feixe, sendo:

$$y \approx -\frac{1}{2} \times 10^{-6} \times \frac{dt}{dy} \times z^2 \quad (4.9)$$

onde:  $y$  é a variação da posição do feixe;  $dt/dy$  é o gradiente de temperatura; e,  $z$  é a distância de medição. Considerando  $dt/dy = 1\text{K/m}$  e  $z = 20\text{m}$ ,  $y$  seria igual a  $200\mu\text{m}$ , o que é um valor inaceitável para a qualidade de feixe que se quer alcançar.

Na literatura /2,7,42/ são também feitas considerações sobre a instabilidade espacial do feixe em função de turbulência do ambiente e variação do índice de refração do ar. Levando em consideração essas fontes perturbadoras, é sugerido /21,24,42,60/ o uso de um tubo de proteção como solução para contornar o problema.

#### 4.2.3 O Sistema de Medição de Deslocamentos

O esquema do sistema de medição de deslocamentos pode ser visto na figura 4.5, sendo a sua configuração dividida em módulos, os quais são descritos sucintamente nos itens a seguir.

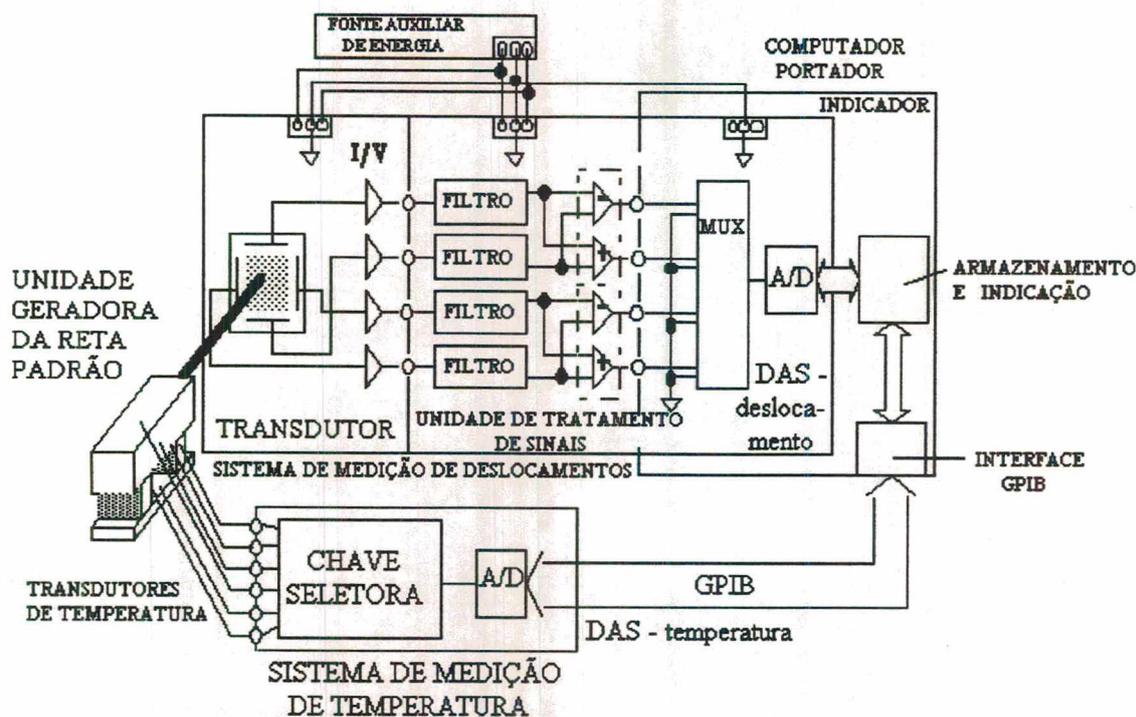


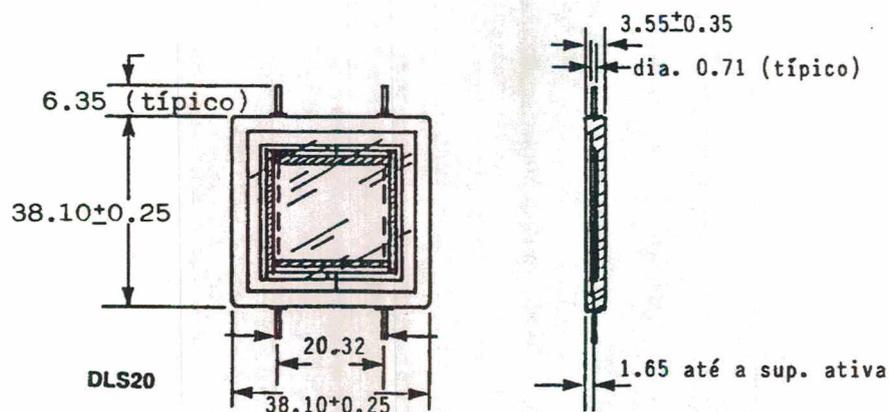
Figura 4.5- Diagrama dos módulos dos sistemas de medição de deslocamentos e temperatura.

a) Transdutor do Sistema de Medição de Deslocamentos.

É composto basicamente por um sensor fotoelétrico de posição e um circuito eletrônico de conversão corrente-tensão (conversor I/V).

Foi utilizado como sensor fotoelétrico, um fotodetector de posição contínuo biaxial (fotodiodo de posição), com uma área ativa de  $20\text{mm}^2$  (Fig. 4.6), com características de linearidade muito boas /61/.

Este fotodetector permite a sua utilização na captação de sinais de baixa intensidade luminosa, apresentam uma boa resposta espectral na faixa do vermelho e operam com uma densidade de potência de até  $0,5\text{mW}/\text{mm}^2$ . Devido à ampla faixa de resposta espectral do Silício, utilizou-se o filtro de interferência.



**Figura 4.6-** Detalhe construtivo do fotodetector de posição /61/.

A corrente gerada no fotodetector é composta de uma fotocorrente e uma corrente de fuga, que permanecerá constante, sob condições de temperatura e diferença de potencial constantes, e a fotocorrente será diretamente proporcional à intensidade da luz incidente. O fotodetector pode ser considerado então como uma fonte de corrente.

Os fotodetectors de posição biaxiais são capazes de fornecer, além da posição, a potência luminosa do feixe de luz incidente sobre a área ativa do dispositivo. Estas informações são obtidas através de quatro terminais, dois para cada eixo cartesiano. O sinal analógico referente à posição de um ponto luminoso é obtido através da diferença de corrente dos dois terminais do mesmo eixo, e a intensidade luminosa é obtida somando-se as correntes dos terminais de um mesmo eixo cartesiano.

Variações da intensidade luminosa incidente afetam a resposta do fotodetector, contudo é possível através da normalização dos sinais, minimizar essas influências. O sinal normalizado corresponde à razão da diferença das correntes, pela soma das correntes obtidas nos dois terminais correspondentes a cada eixo, conforme as equações 4.4 e 4.5.

Como parte integrante também do transdutor do sistema de medição de deslocamentos existe o circuito eletrônico de conversão corrente-tensão. Em sistemas de medição uma corrente é facilmente convertida a uma tensão com um simples resistor. No entanto a técnica de usar somente um resistor para a conversão I/V tem limitações. O uso de altos valores de resistores (ordem de megaohms), no tratamento de pequenos valores de corrente, induz grandes erros devido a ruídos. Portanto, quando correntes muito pequenas devem ser medidas, são empregadas técnicas como a que é mostrada na figura 4.7 e que foi utilizada neste sistema. A técnica sugere um circuito ativo que utiliza um amplificador de precisão para minimizar problemas de ruídos.

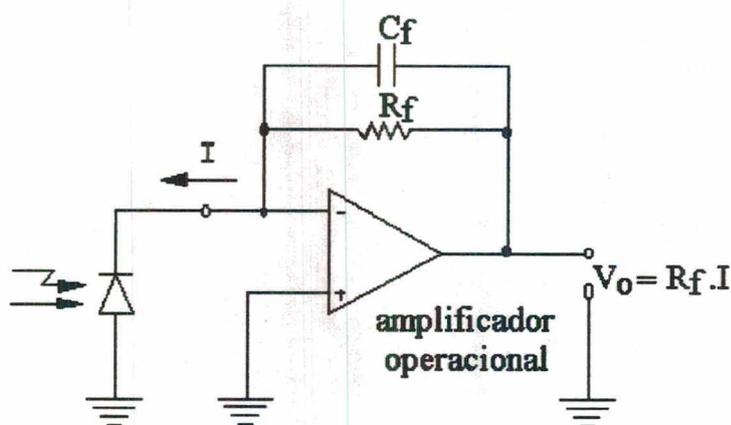


Figura 4.7- Esquema do circuito conversor I/V.

b) Unidade de Tratamento de Sinais ou Condicionador de Sinais (SC).

É formada basicamente pelo módulo de filtragem, o módulo somador-diferenciador e o sistema de aquisição de dados (fig. 4.5).

O módulo de filtragem é configurado fisicamente por quatro elementos eletrônicos, com a mesma função, inseridos no circuito, um para cada sinal de tensão oriundo do transdutor, cuja função principal é de eliminar ruídos elétricos de alta frequência, caracterizando um filtro passa-baixa.

O módulo somador-diferenciador é configurado por dois elementos eletrônicos, com a mesma função, no entanto um para o par de sinais filtrados provenientes da direção x do fotodetector ( $V_{x1}$  e  $V_{x2}$ ) e o outro para o par de sinais da direção y do fotodetector ( $V_{y1}$  e  $V_{y2}$ ). Cada elemento desses incorpora as funções de efetuar a diferença dos referidos sinais e separadamente efetuar também a soma dos mesmos, além de permitir o ajuste de diferentes ampliações ao sinal. Portanto na saída de cada um desses elementos temos a diferença e a soma dos sinais amplificados, um para cada direção do deslocamento, prontos para a aquisição e normalização, que são funções dos módulos seguintes.

Este elemento eletrônico que caracteriza o módulo somador-diferenciador é representado por um amplificador de instrumentação desenvolvido especificamente para essa função descrita.

O sistema de aquisição de dados (DAS) é configurado por placas que podem ser inseridas diretamente num *slot* livre do barramento do PC. As funções que podem ser realizadas com esta configuração são funções típicas para automatização de ensaios, ou seja, funções de entrada analógica e funções de saída digital para supervisão, comando ou controle do ensaio.

As placas que configuram o DAS /62,63/ são: uma placa portadora, um módulo de entrada analógica de alta resolução e uma placa de conexão.

A placa portadora é designada para interfacear diretamente com o barramento interno do PC, através de um *slot* de expansão disponível. Esta placa permite a conexão de até três módulos de entrada ou saída de diferentes funções, entretanto na configuração desenvolvida para os ensaios utilizou-se apenas um módulo com a função de entrada analógica.

O módulo de entrada analógica de alta resolução é uma placa de alta velocidade conectada à placa portadora, que incorpora basicamente um multiplexador (MUX) com quatro sinais diferenciais de entrada e um conversor analógico/digital (conversor A/D) de 16 bit de resolução e faixa de operação de  $\pm 5V$ . Esse módulo, portanto, permite fazer a multiplexação sequencial dos sinais e em seguida a conversão do sinal analógico de entrada em sinal digital de saída. A conversão pode ser inicializada com um sinal de *hardware* externo ou por um comando via *software*.

Na figura 4.5 podem ser vistos os módulos básicos do DAS, que são o Multiplexador (MUX) e o Conversor A/D.

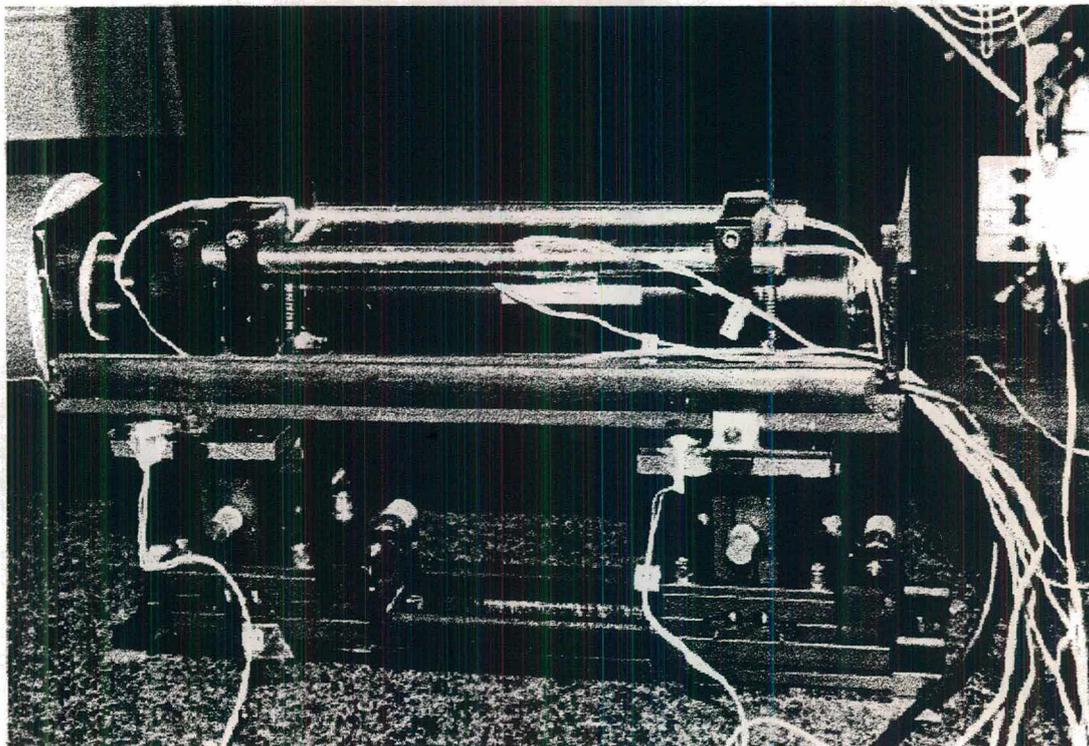
A função de indicação e registro do sistema de medição de deslocamentos é exercida pelo computador.

#### 4.2.4 O Sistema de Medição de Temperatura

Durante a realização dos ensaios foram monitoradas as temperaturas em vários pontos da unidade geradora da reta padrão, com a finalidade de analisar o comportamento térmico do sistema. Para esta monitoração foi necessário a montagem de um sistema de medição em paralelo ao sistema de medição de deslocamentos (fig. 4.5).

Como transdutores do sistema de medição de temperatura foram especificados termopares do tipo ferro-constantan (termopar tipo J) que possuem alta sensibilidade e baixo custo /64,65/, além de uma incerteza de medição e faixa de operação adequada ao requisitos dos ensaios. Os termopares foram colados em pontos da unidade geradora da reta padrão e do ambiente cuja monitoração foi

considerada importante, sendo que esse posicionamento dos termopares pode ser visto na figura 4.8.



**Figura 4.8-** Posicionamento dos termopares.

Além dos termopares, o sistema de medição de temperatura utiliza juntas de compensação e chaves seletoras incorporadas ao sistema de aquisição de dados (DAS-temperatura) específico deste sistema de medição (Fig. 4.9).

O DAS especificado /66/ para o sistema de medição de temperatura é uma unidade que pode trabalhar de forma autônoma, não necessitando obrigatoriamente de um computador externo /67/. No entanto, em função do grande volume de dados a serem adquiridos nos ensaios que foram planejados para avaliação do protótipo, optou-se pela automatização também da aquisição dos dados de temperaturas e utilização do computador no controle das aquisições.



**Figura 4.9-** Sistema computacional e equipamentos integrantes dos sistemas de medição.

Desta forma o referido DAS incorpora basicamente os seguintes módulos: chave seletora, conversor A/D e uma interface para comunicação entre DAS e computador.

A chave seletora é o elemento que possibilita a seleção programada dos sinais elétricos gerados pelos termopares. Fisicamente a chave seletora é formada por grupos de canais que possuem caixa própria com bornes terminais de entrada. Cada canal é formado por um relé de baixa tensão termelétrica que incorpora três contatos (alto, baixo e blindagem). Na utilização de relés deste tipo, um dispositivo de segurança garante que apenas um canal permaneça acionado a um tempo. Isto é devido ao fato de todos os canais estarem ligados a um mesmo barramento analógico. Portanto, sua principal aplicação está na multiplexação dos sinais analógicos de entrada gerados pelos termopares.

Especificamente para a medição de temperaturas com termopares, a chave seletora incorpora uma

junção de referência por *hardware*.

A etapa de conversão A/D é cumprida por um voltímetro digital, também incorporado ao *hardware* do DAS, que operando na faixa de 0 a 10V com uma resolução da ordem de 2,5mV, atende aos requisitos da aquisição dos sinais dos termopares, além de incerteza de medição e velocidade de chaveamento seqüencial adequados.

Complementando o DAS existe ainda uma interface do tipo GPIB de comunicação entre o DAS e o computador. A interface especificada /68/ é uma placa de circuito impresso desenvolvida para ser inserida diretamente em um *slot* livre do barramento do PC. Esta placa permite que a operação do DAS seja totalmente comandada por meio de um computador via *software* específico que utilize uma linguagem e comandos compatíveis com a referida interface.

Neste sistema de medição de temperatura a função de indicação e registro é também exercida pelo computador, conforme esquematizado na figura 4.5.

#### **4.2.5 O Computador**

Trata-se de um PC (Fig. 4.9) que acumula as funções de comando das medições, armazenamento temporário dos dados dos ensaios, processamento/documentação e servir de módulo indicação através do monitor de vídeo, funções essas cumpridas em associação com os sistemas de medição de deslocamentos e de temperaturas já comentados.

### 4.3 AUTOMAÇÃO DA MEDIÇÃO

A grandeza que se quer medir com mais rigor nos ensaios planejados é a posição instantânea do feixe laser a uma distância conhecida do gerador, e essa medição sabe-se que se faz a partir de quatro sinais elétricos gerados no fotodetector. No entanto, para se ter uma maior confiabilidade na medição, toma-se a média de várias leituras seguidas em um intervalo de tempo da ordem de centésimos de segundo. Uma situação ideal seria aquela que permitisse leituras simultâneas dos quatro sinais e a obtenção da posição instantânea média do feixe.

De qualquer forma leituras manuais são impraticáveis devido, principalmente, ao grande volume de aquisições e elevada velocidade de aquisição requerida, justificando dessa forma a automação dos ensaios.

A instrumentação disponível permite leituras seqüenciais de quatro sinais diferenciais, que neste caso são os sinais provenientes do fotodetector, e posteriormente um armazenamento temporário dos dados para em uma fase posterior à aquisição fazer-se o processamento e documentação dos resultados através de tabelas e gráficos.

Além da automação da medição da posição instantânea do feixe laser, é importante também a automação da monitoração de temperaturas do protótipo e do ambiente, já referenciado anteriormente. Esses dados de temperatura passam pelo mesmo processo de armazenamento temporário dos dados e posterior processamento e documentação, sendo importantes para correlacionar variações de posição do feixe com variações de temperaturas em determinados pontos do protótipo em avaliação, caracterizando desta forma uma investigação científica.

Entre tantas vantagens do processo automatizado de medição pode-se destacar algumas:

- velocidade e confiabilidade na aquisição de dados;
- sistematização dos procedimentos e conseqüentemente uma racionalização de tempos;
- diminuição dos erros do processo;
- processamento imediato e possibilidade agilização na verificação da coerência das medidas.

#### 4.3.1 O Software de Medição da Instabilidade Espacial do Feixe

Utilizou-se para a automação da medição dos desvios de posição do feixe o *Labtech Notebook* /62,69/ que é um *software* que integra funções de aquisição de dados, teste, medição, controle, e análise (Fig. 4.10). É um *software* compatível com as placas de aquisição especificadas para a medição da instabilidade espacial do feixe.

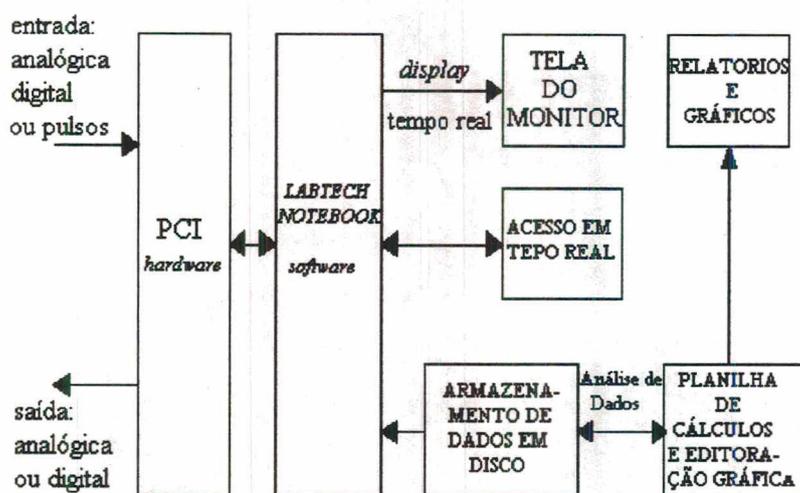


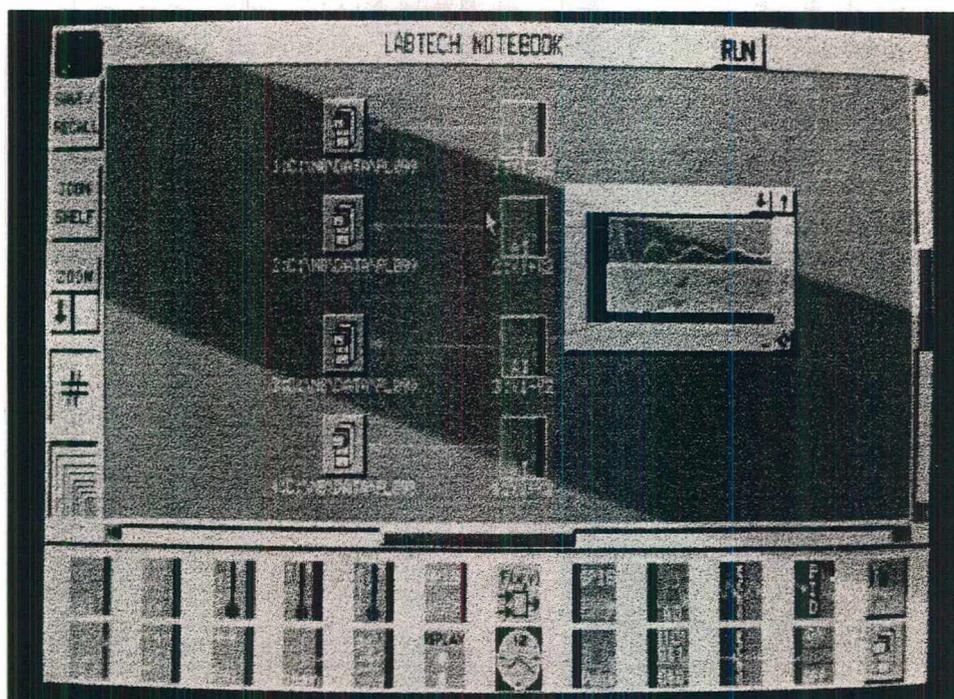
Figura 4.10- Diagrama funcional do software de medição da variação de posição do feixe laser.

Especificamente para a realização dos ensaios de avaliação do protótipo, este *software* cumprirá as

funções de aquisição e armazenamento dos dados e ainda a apresentação em tempo real da medição na forma gráfica na tela do computador.

O *Labtech Notebook* permite que a programação da aquisição seja feita de uma forma rápida utilizando recursos de ícones, ou seja, a programação da aquisição pode ser configurada através de blocos (Fig. 4.11). Cada bloco possui individualmente a sua página de *setup*, onde se encontram as variáveis da aquisição.

Na figura 4.11 pode-se ver que existem quatro blocos de entrada analógica (AI - Analog Input) correspondentes aos quatro sinais de tensão a serem adquiridos (dois de soma e dois de diferença); quatro blocos de armazenamento, uma vez que cada sinal adquirido é armazenado em um arquivo próprio; e, um bloco de *display* correspondente a tela gráfica de apresentação das leituras em tempo real.



**Figura 4.11-** Tela com a configuração (iconizada) por blocos da aquisição, armazenamento e apresentação dos dados dos experimentos.

Os blocos AI foram configurados para trabalhar em três estágios com duração e taxa de aquisição diferentes. O primeiro estágio com duração de 10 segundos, faz apenas uma aquisição que no processamento será descartada, pois este estágio pode vir acompanhado de interferências de início de aquisição e é um estágio que não se repete ao longo do tempo total de ensaio; o segundo estágio com duração de 0,02 segundos (20ms) a uma taxa de 500Hz, é aquele onde serão feitas 10 leituras para cada canal em um intervalo da ordem de centésimos de segundo, e se repete em intervalos de 20 segundos, sendo que o número de vezes que se repete é definido pelo número de iterações definidos no *setup*; o terceiro e último estágio com duração de aproximadamente 20 segundos, serve apenas para definir o tempo de espera entre uma iteração e outra do segundo estágio, e portanto não faz aquisições. O número de iterações define o tempo total do ensaio, sendo que cada iteração dura 20 segundos. De uma forma resumida pode-se dizer que a cada 20 segundos são feitas 10 leituras por canal no menor intervalo de tempo possível.

A figura 4.12 mostra um quadro com o resumo do *setup* do programa de aquisição, para uma aquisição programada com 540 iterações que totalizam um tempo de 3 horas de ensaio. Este resumo mostra ainda os arquivos e as janelas do *display* onde são armazenados e mostrados respectivamente os dados.

O *software* permite que o programa de aquisição seja executado no chamado modo *background* permitindo que um outro programa seja executado simultaneamente em *foreground*. Portanto, em alguns ensaios este recurso foi utilizado para executar o programa de aquisição de temperaturas, utilizando um único computador.

n° Bloco	Nome do Bloco	Interface		Função do Bloco	n° de iterações	n° do Estágio	Estágios	
		disp.	canal				Duração (s)	Taxa (Hz)
1	x1-x2	1	0	entrada analógica	540	1	10	0,1
						2	0,02	500
						3	19,98	0,05
2	x1+x2	1	1	entrada analógica	540	1	10	0,1
						2	0,02	500
						3	19,98	0,05
3	y1-y2	1	2	entrada analógica	540	1	10	0,1
						2	0,02	500
						3	19,98	0,05
4	y1+y2	1	3	entrada analógica	540	1	10	0,1
						2	0,02	500
						3	19,98	0,05

Dispositivos de interface:    0: DEMO BOARD  
                                       1: PCI 20341M - Placa de entrada analógica com conversor A/D de alta resolução (16 bit)  
                                       2: PCI 20001C-2 - Placa portadora

**Figura 4.12-** *Setup* global da configuração para aquisições com 540 iterações (3 horas de ensaio).

No que se refere à manipulação dos dados ( $\Delta x$ ,  $\Sigma x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Sigma y$ ), durante a aquisição os dados são armazenados provisoriamente em um *buffer*, e após a conclusão das leituras é necessário executar um comando que ordena o armazenamento definitivo nos respectivos arquivos, em formato ASCII, de forma que os dados ficam organizados para o posterior processamento.

O processamento dos dados é feito com um programa de planilha, que "importa" os dados dos arquivos. Nesta planilha são executados então o cálculo das médias, a normalização dos dados, a aplicação da função transferência e, por último, as medidas são armazenadas em novos arquivos, também em formato ASCII.

Após este processamento final dos dados, utilizou-se ainda um programa de edição de gráficos, que também tem o recurso de "importação" de dados. Através deste programa conseguiu-se editar e

registrar graficamente os resultados dos ensaios e imprimi-los.

#### 4.3.2 O *Software* de Medição de Temperaturas

Este *software* foi desenvolvido em linguagem C, especificamente para estes ensaios e sua função principal é comandar o trabalho do DAS do sistema de medição de temperatura. A estrutura do programa engloba as seguintes tarefas:

- inicializar a interface /68/ de comunicação do DAS com o computador;
- resetar o DAS, ligado a GPIB;
- permitir a entrada via teclado de informações, tais como, nome do arquivo, tempo em segundos entre ciclos e tempo total do ensaio;
- abrir o arquivo;
- ler, aplicar a função transferência e armazenar a medida no arquivo;
- fechar o arquivo.

Após a aquisição, os dados são também processados com os recursos do programa de planilha e, após este estágio, é feita a edição e impressão dos gráficos.

## **5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO PROTÓTIPO**

Neste capítulo avalia-se o comportamento metroológico e operacional do protótipo configurado. Esta avaliação é feita com base em resultados experimentais que simulam diferentes situações de aplicação do protótipo, tendo sido dada especial atenção às variações ambientais que tem a maior parcela de contribuição na instabilidade espacial do feixe. Além disso, é feita uma análise do comportamento em diferentes formas de montagem do conjunto.

### **5.1 ESTABILIZAÇÃO TÉRMICA DA UNIDADE GERADORA DA RETA PADRÃO**

No período de estabilização térmica os componentes mecânicos e ópticos sofrem grandes alterações geométricas e, conseqüentemente, ocorre uma maior variação na posição espacial do feixe laser. Após este período, o feixe permanece dentro de uma determinada faixa.

A fixação do tempo de estabilização térmica, no âmbito deste trabalho, não obedece a um critério único, pois depende muito das particularidades do processo que está sendo analisado.

Como procedimento geral para definição do "tempo de estabilização térmica" da unidade geradora da reta padrão definiu-se duas sistemáticas para fixação do instante em que o sistema entra em regime

estável.

Uma primeira análise é feita no gráfico temperatura *versus* tempo, onde, entre os pontos de medição, identifica-se aquele cuja evolução térmica é mais lenta, e, a partir da última leitura do ensaio ( $t = 3h$ ), supondo-se que o regime já está estável, estabelece-se uma linha média horizontal com uma faixa em torno dela que pode variar de 0,5 a 1°C em amplitude, dependendo das condições ambientais durante o ensaio. O período decorrido até o instante em que a curva correspondente àquele ponto de medição entra dentro da faixa estabelecida e nela permanece, caracteriza o tempo de estabilização térmica.

Observando-se os gráficos que registram os deslocamentos do feixe, percebe-se que, muito embora, as temperaturas nos pontos medidos tenham registrado uma estabilização, o feixe continua com uma tendência não estável, provavelmente em virtude de existirem, internamente ao gerador laser, elementos cujas temperaturas não foram medidas e que continuam variando.

Portanto, chega-se a uma conclusão definitiva analisando-se estes gráficos que registram o deslocamento do feixe segundo os eixos x e y. À partir do instante já estabelecido pela análise das curvas temperatura *versus* tempo, procura-se identificar novamente uma linha média horizontal com uma faixa em torno dela de  $\pm 1\mu\text{rad}$  a  $\pm 3\mu\text{rad}$ , dependendo da configuração do sistema (carcaça fechada ou aberta). O período decorrido até o instante em que as curvas de deslocamento entram na faixa definida, caracteriza definitivamente o tempo de estabilização térmica do conjunto.

Para avaliar a estabilização térmica do protótipo, definiu-se como grandezas a serem monitoradas no decorrer do tempo: a temperatura em diferentes pontos, já definidos no capítulo anterior (fig. 4.8), e a variação espacial do feixe laser.

Como procedimento geral para a execução dos testes experimentais monta-se a bancada de acordo com as condições que se quer impor ao sistema para uma posterior avaliação, e começa-se a aquisição das grandezas à partir do instante em que o gerador laser é ligado, considerando uma condição inicial em que o sistema está à temperatura ambiente.

### **5.1.1 Influência dos Transladadores**

Em experimentos repetidos sob as mesmas condições, onde a única variável era a montagem com ou sem transladores, não observou-se influências significativas nos resultados. Em qualquer um dos diferentes experimentos, observou-se que a dissipação de calor ocorre sem que haja variação significativa na temperatura dos transladores.

### **5.1.2 Influência da Carcaça**

Avaliando-se o comportamento do protótipo com a carcaça aberta, ou seja, o gerador laser, o telescópio e todo o sistema mecânico de suporte destes componentes, apresentam-se desprotegidos e a mostra, sujeitos às ações diretas do ambiente (fig. 5.1 e 5.3), e fechada (fig. 5.2 e 5.4), que significa que estes mesmos elementos apresentam-se protegidos com a cobertura metálica da carcaça, observa-se, de uma forma geral, um aumento no tempo de estabilização térmica com a carcaça fechada. A diferença entre estes tempos irá depender de um outro fator associado, que é a existência ou não da ventilação forçada.

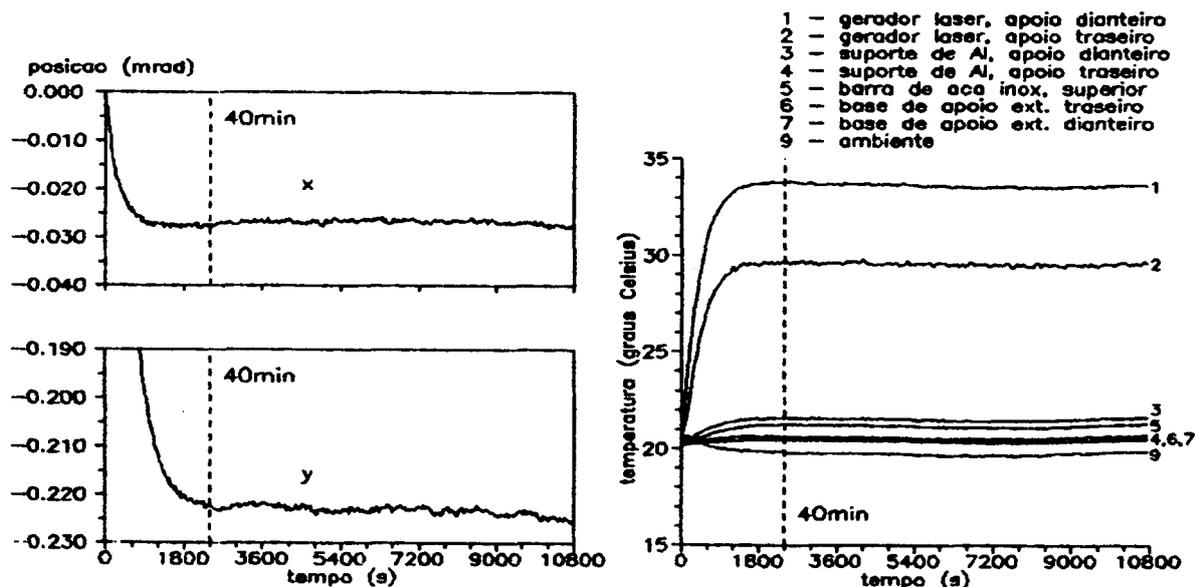


Figura 5.1- Estabilização térmica - com ventilação e carcaça aberta.

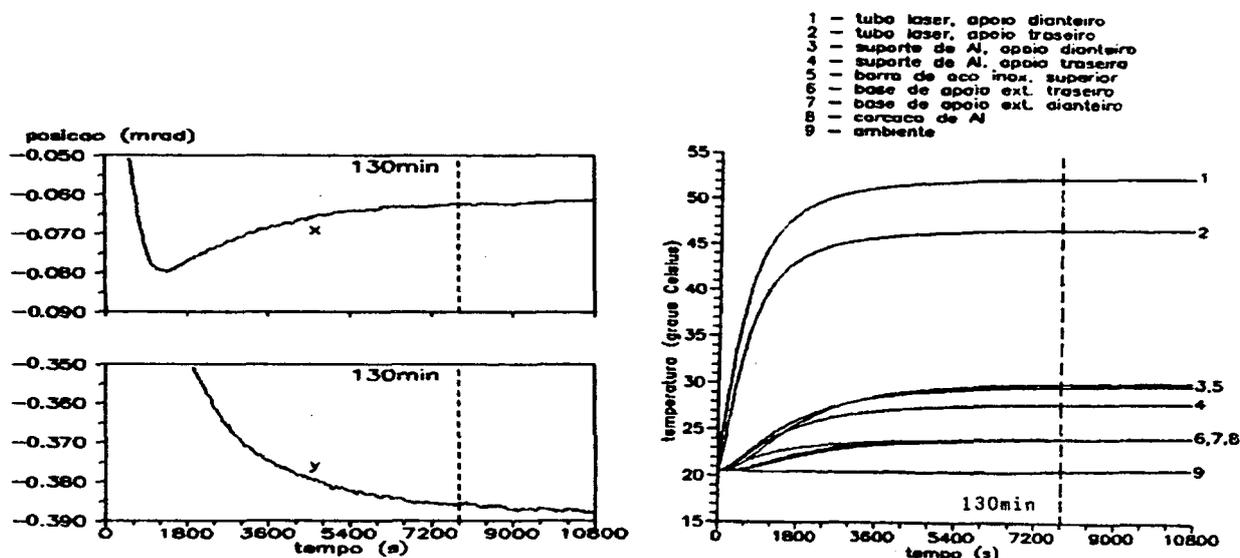


Figura 5.2- Estabilização térmica - com ventilação e carcaça fechada.

A unidade geradora da reta padrão foi testada em várias situações, sempre buscando testar a influência e eficiência do módulo de proteção térmica, cuja configuração caracteriza-se basicamente por um ventilador axial de posição ajustável e adaptável às condições de ensaio, melhor descrita no capítulo 3 (item 3.1.4), e cuja função principal é, através da ventilação forçada, estabilizar o campo de temperaturas ao redor do gerador laser.

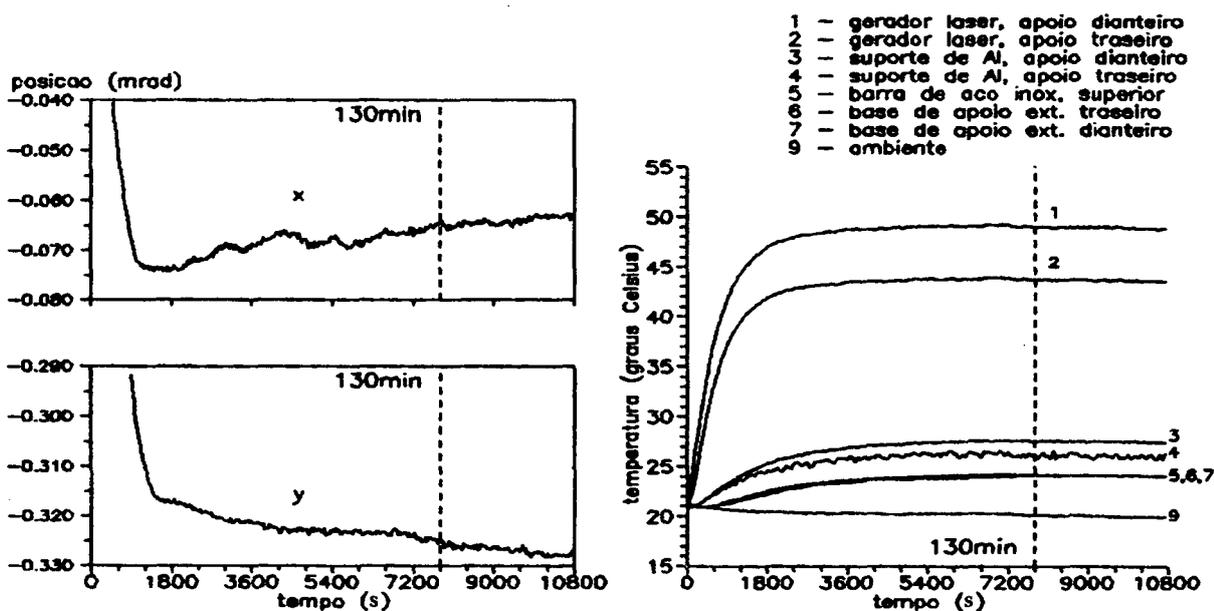


Figura 5.3- Estabilização térmica - sem ventilação e carcaça aberta.

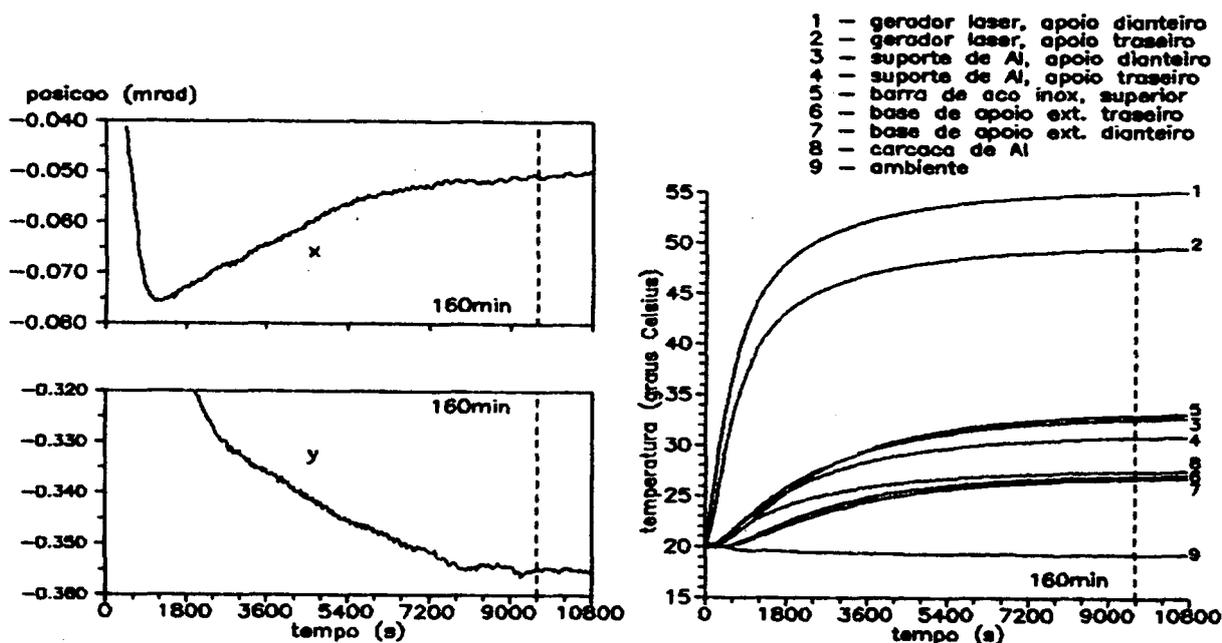


Figura 5.4- Estabilização térmica - sem ventilação e carcaça fechada.

Se o sistema trabalha sem ventilação forçada, com o fechamento da carcaça, o tempo de estabilização térmica é de aproximadamente 160 minutos (fig. 5.4), enquanto que sem o fechamento, o tempo é de

aproximadamente 130 minutos (fig. 5.3).

Se o sistema trabalha com ventilação forçada, com a carcaça fechada, este tempo é de aproximadamente 130 minutos (fig. 5.2), enquanto que sem o fechamento da carcaça, o tempo é de aproximadamente 40 minutos (fig. 5.1).

O fechamento completo da carcaça impõe uma resistência à dissipação de calor fazendo com que o sistema atinja níveis de temperatura muito mais elevados e com isso retarda a estabilização térmica (*warm-up*) do sistema. Este aumento do tempo é da ordem 20% sem ventilação e da ordem de 220% com ventilação, ou seja, se o objetivo é simplesmente reduzir este tempo de espera, a situação registrada na figura 5.1, com o sistema aberto e com ventilação forçada, é nitidamente a melhor, com o fluxo de ar do ventilador atuando diretamente sobre o gerador laser e dissipando eficientemente a radiação térmica. No entanto outras situações devem ser consideradas, tais como a proteção do sistema contra interferências do ambiente, tais como poeira, umidade e fluxos aleatórios de ar, situações estas que podem conduzir o usuário a optar por uma aplicação do sistema com a carcaça fechada. Através de uma análise cuidadosa dos gráficos e dos dados dos ensaios percebe-se um comportamento menos linear do feixe, e neste caso a configuração fechada e com ventilação pode ser interessante (fig. 5.2), apesar da estabilização térmica (*warm-up*) ser mais lenta.

De qualquer forma a opção de operar com ou sem a cobertura de acordo com a necessidade ou não de reduzir-se o tempo de *warm-up* e os níveis de temperatura envolvidos no sistema, deve ser cuidadosamente avaliado em função das condições ambientais onde o sistema irá operar, observando, no entanto, que a frequência de oscilação do feixe com a carcaça aberta é maior.

### 5.1.3 Influência da Ventilação Forçada

Analisando-se os resultados dos experimentos relativos exclusivamente ao protótipo sem ventilação (fig. 5.3 e 5.4) e com ventilação forçada (fig. 5.1 e 5.5), pode-se dizer que, como regra geral, a atuação da ventilação reduz o tempo de estabilização térmica.

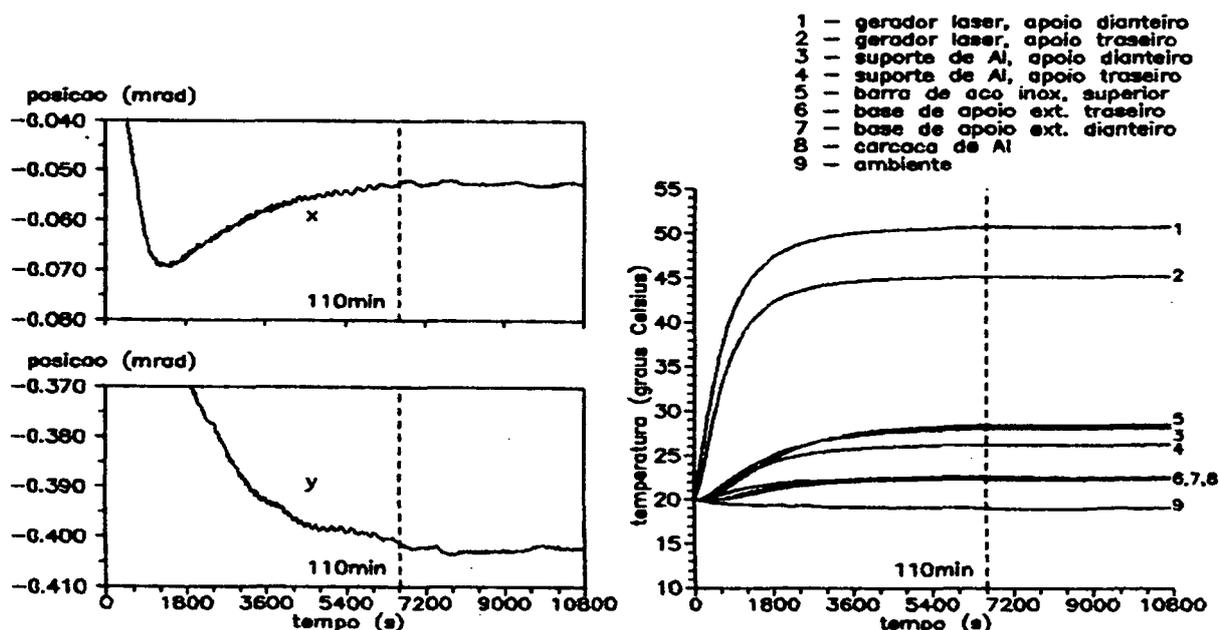


Figura 5.5- Estabilização térmica - com ventilação e carcaça fechada.

Com o sistema trabalhando com a carcaça fechada, com ventilação (fig. 5.2 e 5.5), esta redução é de 160 para 110 a 130 minutos, significando uma redução da ordem de 20%, em relação ao funcionamento sem ventilação. Com a carcaça aberta esta redução chega a 220%.

O quadro da figura 5.6 resume os resultados dos testes de estabilização térmica realizados e os valores apresentados são valores típicos do tempo de estabilização térmica e das variações de posição do feixe no intervalo que vai desde este o instante em que atingiu-se o *warm-up* até o final do teste.

	carcaça aberta		carcaça fechada	
	<i>warm-up</i> (min)	$\varphi_x$ e $\varphi_y$ ( $\mu$ rad)	<i>warm-up</i> (min)	$\varphi_x$ e $\varphi_y$ ( $\mu$ rad)
sem ventilação forçada	130	$\pm 3 / 50\text{min}$	160	$\pm 2 / 50\text{min}$
com ventilação forçada	40	$\pm 2 / 140\text{min}$	110 a 130	$\pm 1 / 50\text{min}$

Figura 5.6- Resultados dos ensaios de estabilização térmica.

#### 5.1.4 Influência do Gerador Laser e Elementos Mecânicos Associados

O tempo de estabilização térmica é determinado basicamente pela evolução térmica do gerador laser, segundo mostra os gráficos de temperatura associados aos ensaios descritos nos itens anteriores (fig. 5.1 a fig. 5.5).

Os elementos mecânicos (barras de aço e os suportes de alumínio) têm uma influência secundária, principalmente por envolverem variações térmicas bastante inferiores às do gerador laser.

#### 5.1.5 Influência da Posição Radial de Fixação do Gerador Laser no Suporte

Para avaliar-se esta influência, repetiu-se seis vezes, o experimento de estabilização térmica sob condições idênticas de montagem (fig. 5.7), sendo que entre um experimento e outro o gerador laser foi rotacionado no suporte em torno do seu próprio eixo e monitorou-se a variação espacial do feixe nas seis posições diferentes. Para isso foram marcadas as 6 posições radiais para o gerador laser:  $0^\circ$ ,

60°, 120°, 180°, 240° e 300°. O ponto 0° foi fixado na parte superior do eixo vertical definido pelo plano de polarização especificado pelo fabricante do gerador laser. Os ângulos seguintes são alcançados a cada 60° de giro no sentido anti-horário.

Os valores da variação espacial do feixe no período de 1200 segundos são colocados em uma tabela (fig. 5.8) e possibilitam uma comparação quantitativa das variações em cada direção transversal de medição.

Traçando-se uma curva por esses pontos, pode-se ter uma idéia da variação do feixe em função da posição radial do gerador laser, para qualquer posição que ele seja fixado (fig. 5.9).

Todos os valores apresentados (fig. 5.7 a 5.9) correspondem a um período de 20 minutos desde o instante em que o laser é ligado. É neste período que ocorrem os maiores deslocamentos do feixe ( $\pm 200\mu\text{rad}$ ) durante a estabilização térmica. Após este período de 20 minutos, a variação do feixe tem uma modificação no seu comportamento, envolvendo deslocamentos sensivelmente menores ( $\pm 20\mu\text{rad}$ ).

Em alguns casos, dependendo da configuração do sistema (carcaça fechada, sem ventilação), este período é mais longo, chegando a valores em torno de 60 minutos, entretanto, o comportamento sempre se repete, tanto quantitativamente quanto qualitativamente, caracterizando um comportamento sistemático e previsível, portanto, passível de ser corrigido.

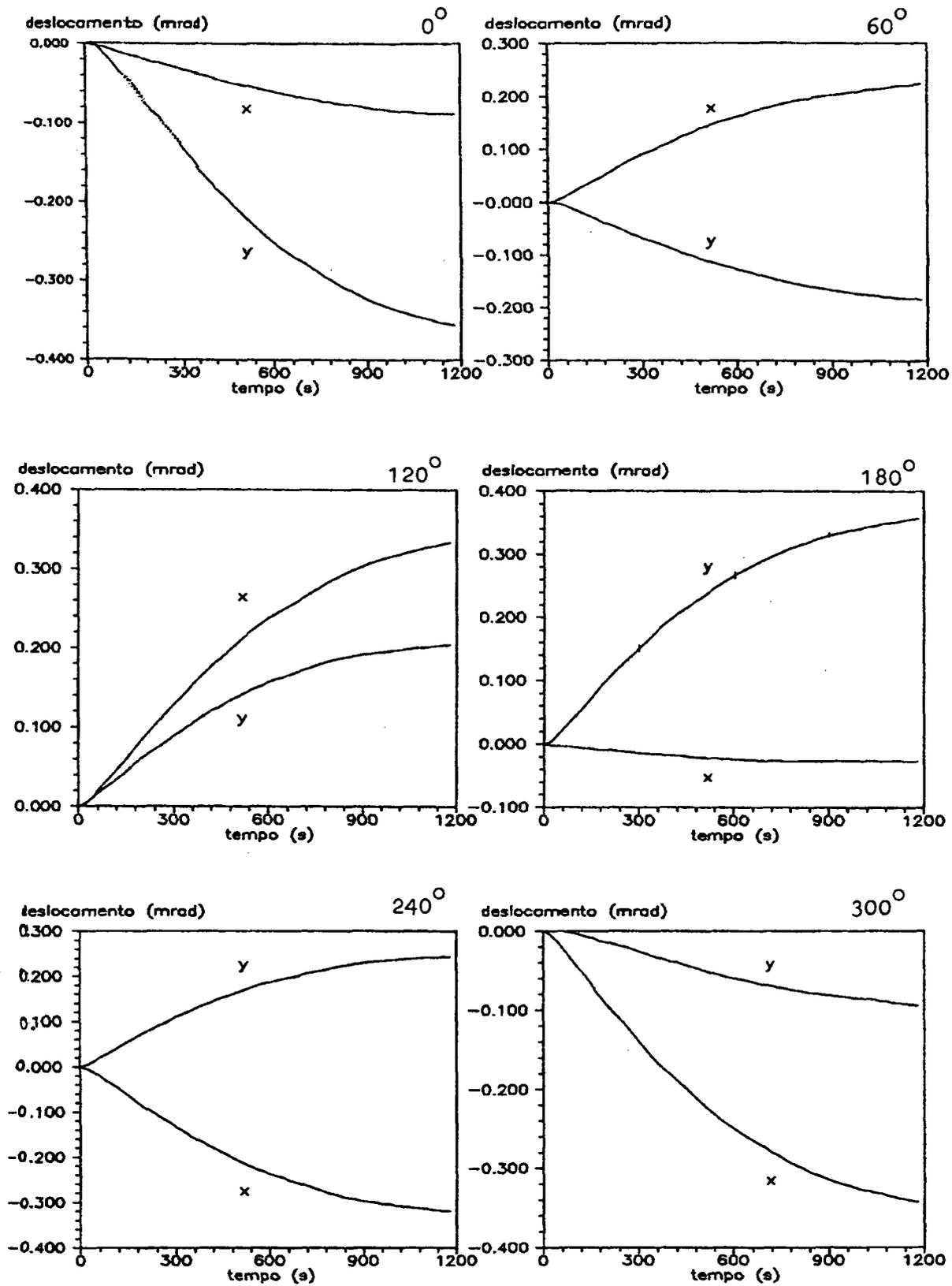


Figura 5.7- Influência da posição radial de fixação do gerador laser.

POSIÇÃO RADIAL DO GERADOR LASER	VARIACÃO ESPACIAL DO FEIXE LASER (*)	
	$\varphi_x$ [ $\mu\text{rad}$ ]	$\varphi_y$ [ $\mu\text{rad}$ ]
0°	- 90	- 360
60°	+ 230	- 190
120°	+ 350	+ 210
180°	- 30	+ 360
240°	- 320	+ 250
300°	- 350	- 100

(\*) Estes valores foram lidos diretamente dos gráficos (fig. 5.6) com uma incerteza de  $\pm 5 \mu\text{rad}$ .

**Figura 5.8-** Deslocamentos do feixe laser para diferentes posições radiais do gerador.

Uma análise do gráfico da figura 5.9 revela que existe uma posição onde a componente da variação espacial do feixe laser na direção x é praticamente nula ( $\varphi_x \approx 0$ ) e posições onde a componente da variação na direção y é praticamente nula ( $\varphi_y \approx 0$ ), durante o período de estabilização térmica do conjunto. Estas informações podem ser importantes quando se quer medir em apenas uma das direções. Rotacionando o gerador laser uma destas posições pode ser alcançada, e com isso uma longa espera pela estabilização térmica do gerador laser não é necessária. Nestas condições pode-se prever uma forma de compensação regulada para aquele plano onde a componente da variação não é nula.

Pode-se prever um sistema ativo de estabilização, mostrado no diagrama de blocos da figura 5.10, que corresponde a um sistema de controle de realimentação negativa, com uma função básica de detectar de modo contínuo o efeito das perturbações e através de um atuador dinâmico (atuador piezoelétrico) voltá-lo em forma inversa ao sistema.

As perturbações ocorrem, através do aquecimento, alterando a posição do feixe, ou seja gerando

diretamente um deslocamento, que considera-se em apenas uma direção, por exemplo, na direção y ( $\varphi_y$ ).

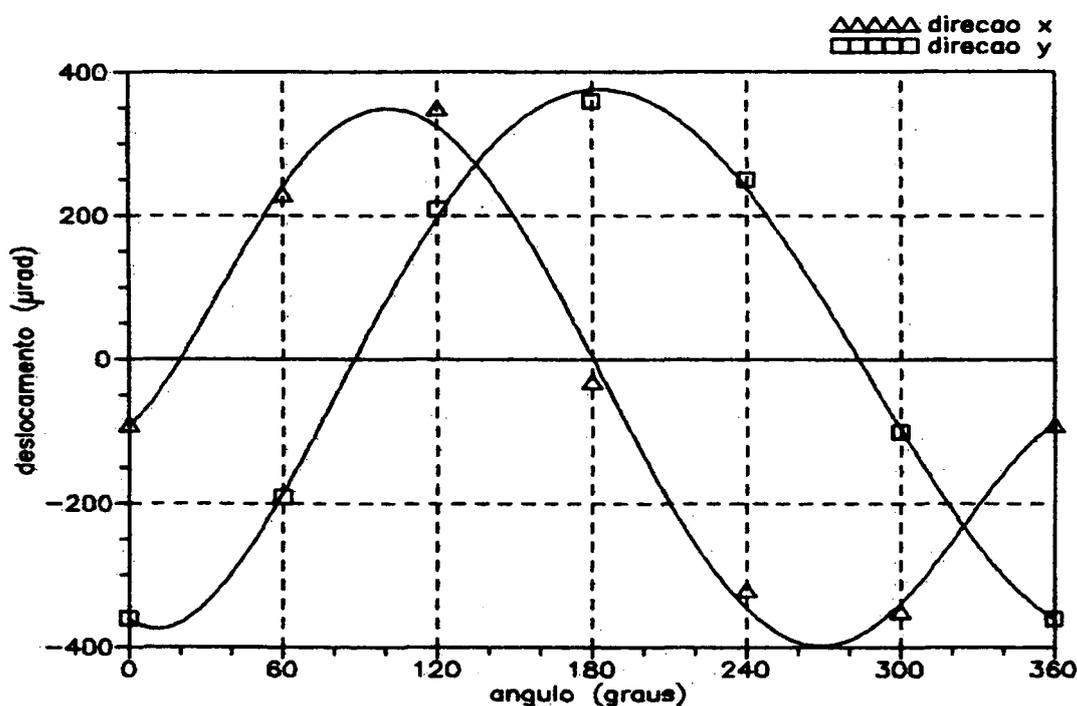


Figura 5.9- Variação do feixe em função da posição radial do gerador laser.

Uma maneira mais direta de controlar o sistema seria, através da detecção direta dos deslocamentos do feixe, no entanto, como não se pode interromper o feixe, a variável a ser controlada é a temperatura, que influencia indiretamente na variação do feixe.

É importante que se identifique um ponto crítico onde deverá ser feita a medição da temperatura, sendo que este ponto deve ser aquele que melhor descreve o período de estabilização térmica do sistema.

Conforme representado na figura 5.10, a temperatura neste ponto é medida por meio do realimentador, composto por um transdutor e sua unidade de tratamento de sinais, que transforma a temperatura em

um sinal elétrico proporcional. O sinal é enviado a um comparador que determina um desvio em relação à uma referência, gerando um novo sinal que é um sinal de erro. Por sua vez o sinal de erro é enviado ao controlador que gera o sinal de controle que alimenta o atuador piezoelétrico, que aplica ao apoio traseiro do sistema um deslocamento controlado.

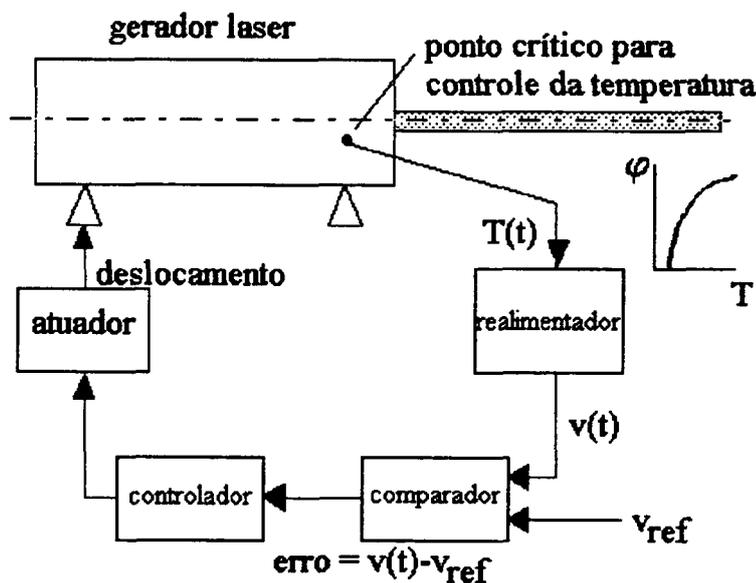


Figura 5.10- Diagrama de blocos do sistema de controle proposto.

O controlador é que relaciona o sinal de erro (diferença de temperaturas) com o deslocamento necessário no apoio do gerador laser, para compensar o deslocamento do feixe. Para isso é necessário o conhecimento da função transferência que relaciona os deslocamentos com a temperatura, função esta que deve ser levantada experimentalmente.

Cabe destacar, que este sistema de controle é voltado a comportamentos lineares, que não é o caso do comportamento do feixe durante o período de estabilização térmica, no entanto, a curva de estabilização térmica no início do funcionamento do sistema se aproxima bastante de um comportamento linear.

De qualquer forma, o sistema de controle pode ser aplicado até um determinado instante, no sentido de reduzir-se sensivelmente as variações do feixe.

Cabe ressaltar ainda que este tipo de solução só é representativa, durante o período de estabilização térmica para redução do tempo de preparação de ensaios geométricos.

Tentativas de rastrear as possíveis causas deste comportamento diferenciado dos deslocamentos do feixe no plano  $xy$ , recaem sobre a estrutura interna do gerador laser, mais especificamente no ressoador. Os deslocamentos registrados nos testes caracterizam tipicamente um comportamento de uma estrutura sem simetria. Muito embora o projeto do ressoador especificado /53/, tenha sido desenvolvido buscando minimizar os efeitos térmicos que produzem distorções no alinhamento dos espelhos, através da equalização da temperatura ao longo de uma boa parte da extensão do ressoador, sabe-se, e isto foi comprovado experimentalmente, que ainda existem expansões térmicas diferenciadas em algumas partes da parede do ressoador.

Possíveis contribuições no sentido de se aproximar de uma solução ótima poderiam ser conseguidos envolvendo na análise as seguintes possibilidades:

- equalização da temperatura ao longo de toda a extensão do gerador laser, utilizando métodos de controle de temperatura, como aqueles abordados no item 3.1.4;
- implementação de um sistema ativo de estabilização baseado no controle direto dos deslocamentos do feixe, utilizando um divisor de feixe, para não interromper o feixe, e também com atuação através de um atuador piezoelétrico, com módulos similares aos descritos anteriormente.

## 5.2 ESTABILIZAÇÃO DA POTÊNCIA EMITIDA

O sinal gerado pelo fotodetector é proporcional à intensidade luminosa (potência) do feixe laser e em função disso é importante que o sistema opere em um regime de potência o mais estável possível.

Para monitorar a potência do laser utilizou-se um medidor de potência óptica com uma interface GPIB para comunicação entre o medidor e um computador.

Os resultados dos testes mostram que em 10 minutos a estabilização de potência do laser está praticamente completa, ficando um *drift* da ordem de 2% (fig. 5.11), e, após este período, o *drift* continua diminuindo até 0,02mW, que representa aproximadamente 1% da potência nominal do feixe laser.

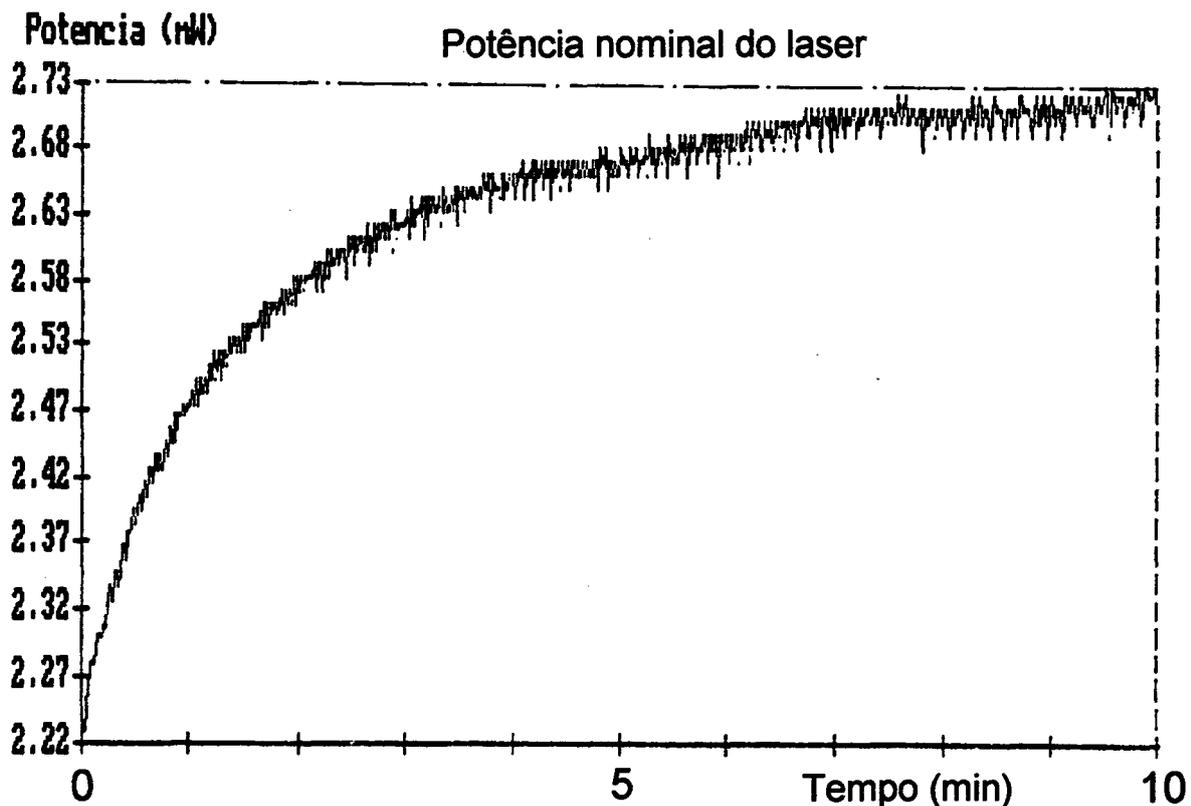


Figura 5.11- Estabilização de potência do gerador laser (10 min).

O comportamento do laser é bastante normal, atingindo a estabilização de potência em 10 minutos e mantendo-se estável à partir daí, com oscilações muito pequenas e que não chegam a provocar perturbações funcionais relevantes.

### **5.3 ESTABILIDADE ESPACIAL DO FEIXE**

Nesta etapa da avaliação experimental do protótipo, procurou-se conhecer o comportamento temporal do feixe laser, em regime normal de funcionamento, isto é, após ultrapassado o período de estabilização térmica. Para tanto simulou-se diferentes situações que poderiam influenciar neste comportamento, de maneira semelhante ao que foi feito nos testes experimentais de estabilização térmica da unidade geradora da reta padrão.

Nos sub-itens seguintes serão descritos portanto as diferentes simulações com seus respectivos resultados e análises.

#### **5.3.1 Influência da Ventilação Forçada**

Novamente foram feitos testes para checar a influência da ventilação forçada atuando sobre a unidade geradora da reta padrão, ora com a carcaça aberta, ora com a carcaça fechada, porém, após a estabilização térmica, monitorando apenas a posição do feixe.

Quando a carcaça da unidade geradora da reta padrão está aberta, a influência da ventilação é mais

sensível, ou seja, a ventilação reduz sensivelmente as variações de posição do feixe. Isso fica evidenciado comparando-se os resultados registrados nas figuras 5.12 e 5.13. A figura 5.12 registra um teste sem ventilação, e percebe-se que, tipicamente,  $\phi_x$  e  $\phi_y$  apresentam valores da ordem de  $\pm 3\mu\text{rad}$ , enquanto que na figura 5.13, onde está registrado um teste com ventilação lateral, encontra-se  $\phi_x$  na faixa de  $\pm 1\mu\text{rad}$  e  $\phi_y$  na faixa de  $\pm 2\mu\text{rad}$ .

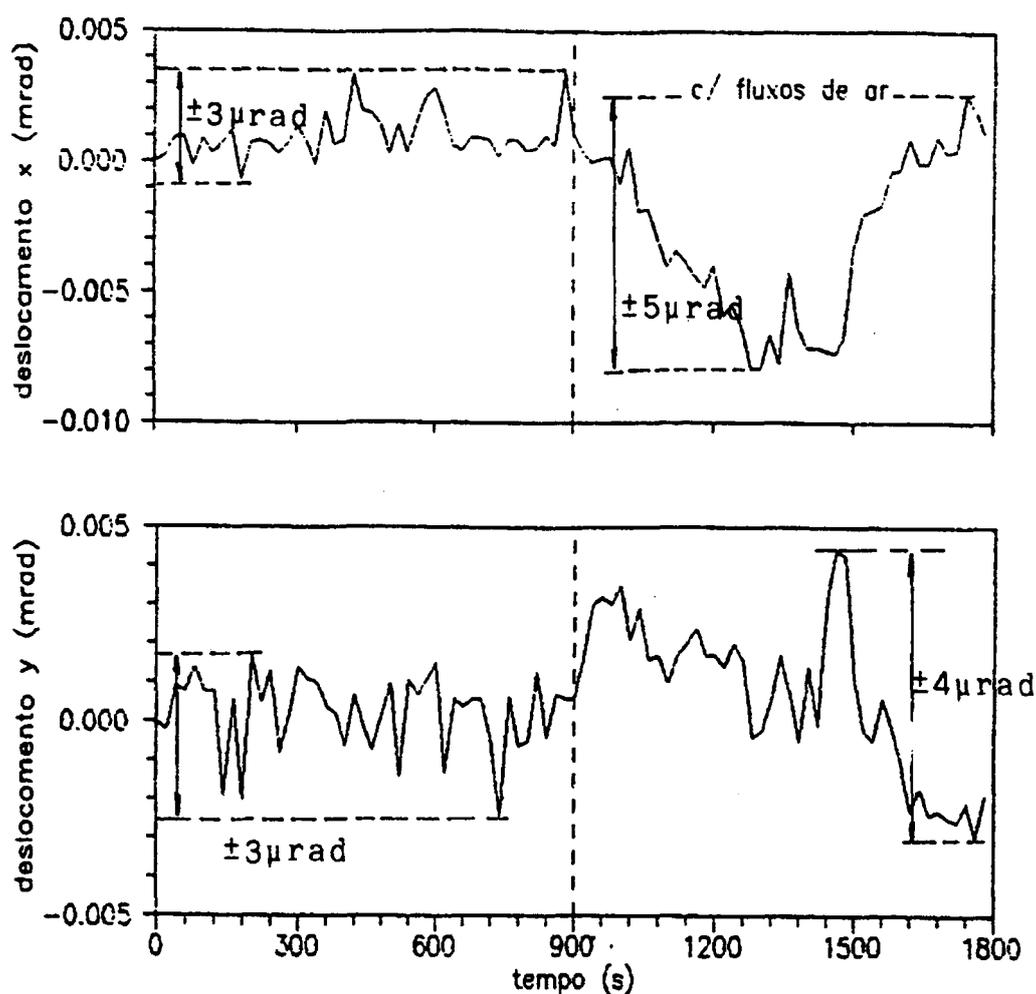


Figura 5.12- Estabilidade espacial - carcaça aberta, sem ventilação.

Portanto, como já era esperado, quando a unidade geradora da reta padrão opera com a carcaça aberta, o sistema é significativamente melhorado ativando a ventilação forçada e agilizando a

dissipação do calor gerado.

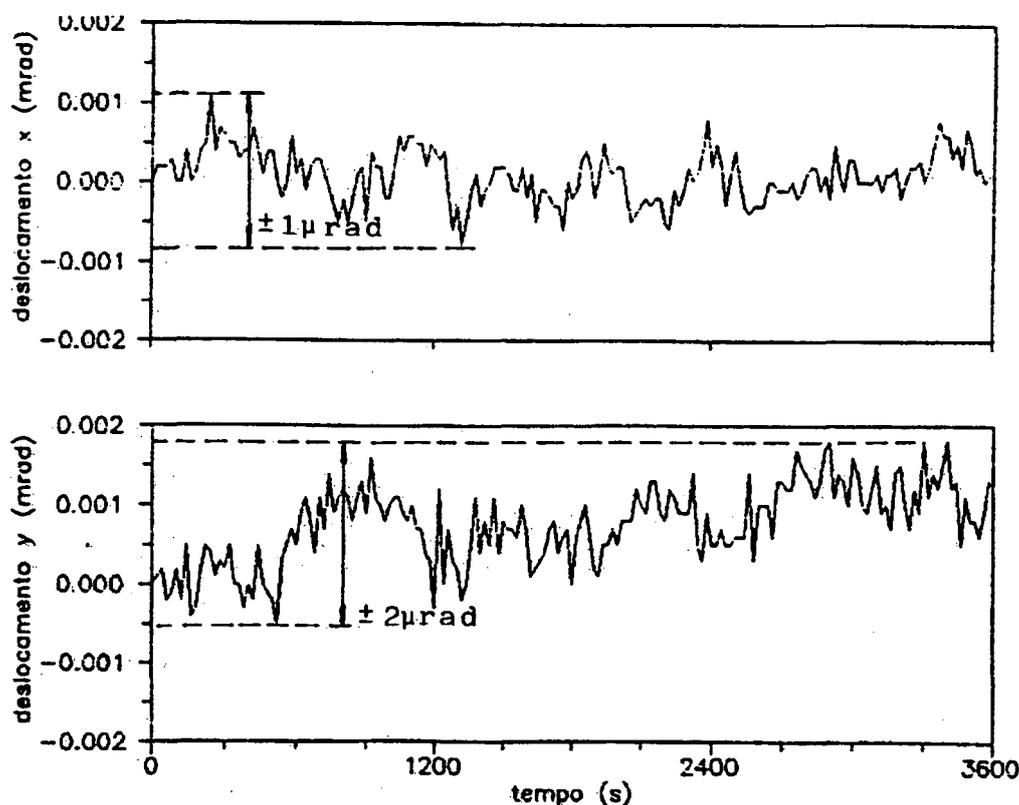


Figura 5.13- Estabilidade espacial - carcaça aberta e com ventilação.

A melhora, que é da ordem de 50% com a carcaça aberta, cai para algo em torno de 25% se a carcaça está fechada, comprovando a proteção mecânica da carcaça e a conseqüente resistência que ela oferece à dissipação da radiação térmica gerada no interior da unidade geradora da reta padrão.

Nos testes realizados com o protótipo operando com carcaça fechada, encontrou-se valores dentro da faixa de  $\pm 1 \mu\text{rad}$  tanto para  $\phi_x$  quanto para  $\phi_y$ , como pode ser visto nas figura 5.14 (sem ventilação) e 5.15 (com ventilação), no entanto, uma análise mais minuciosa revela, mesmo assim, uma pequena melhora ( $\phi_x$  e  $\phi_y$  da ordem de  $\pm 0,5 \mu\text{rad}$ ) com a ação da ventilação forçada, porém não tão perceptível porque os resultados estão dentro de uma faixa bastante pequena e que, praticamente, se confundem

com a própria incerteza de medição do sistema de medição de deslocamentos utilizado na medição referida.

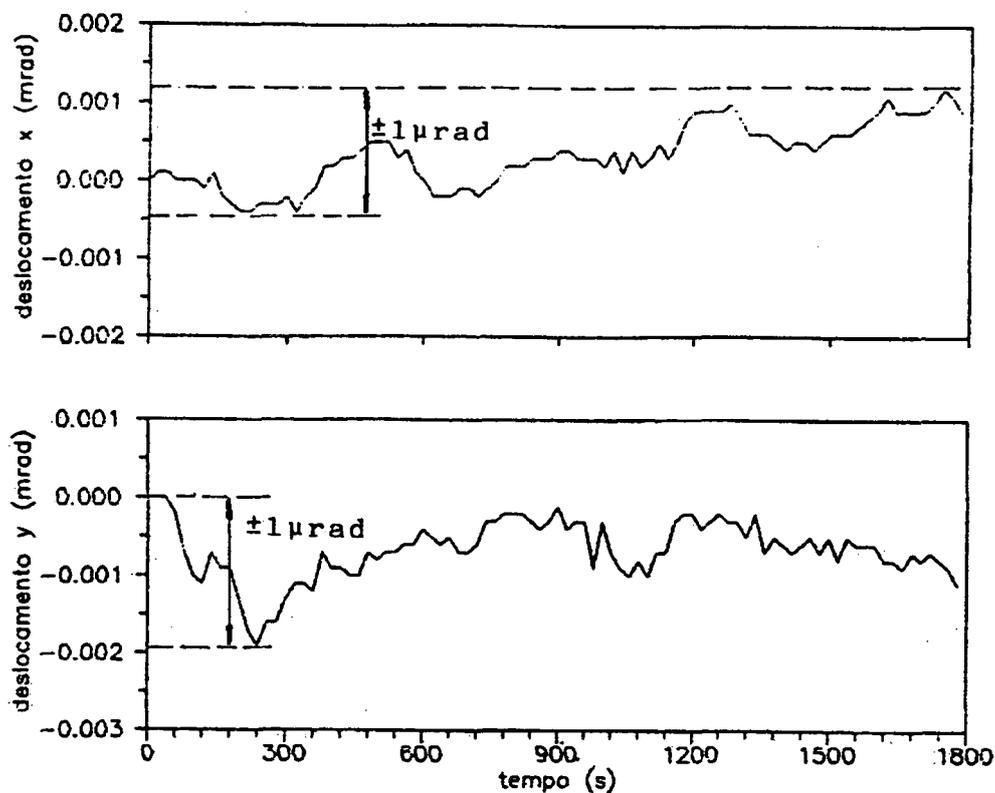
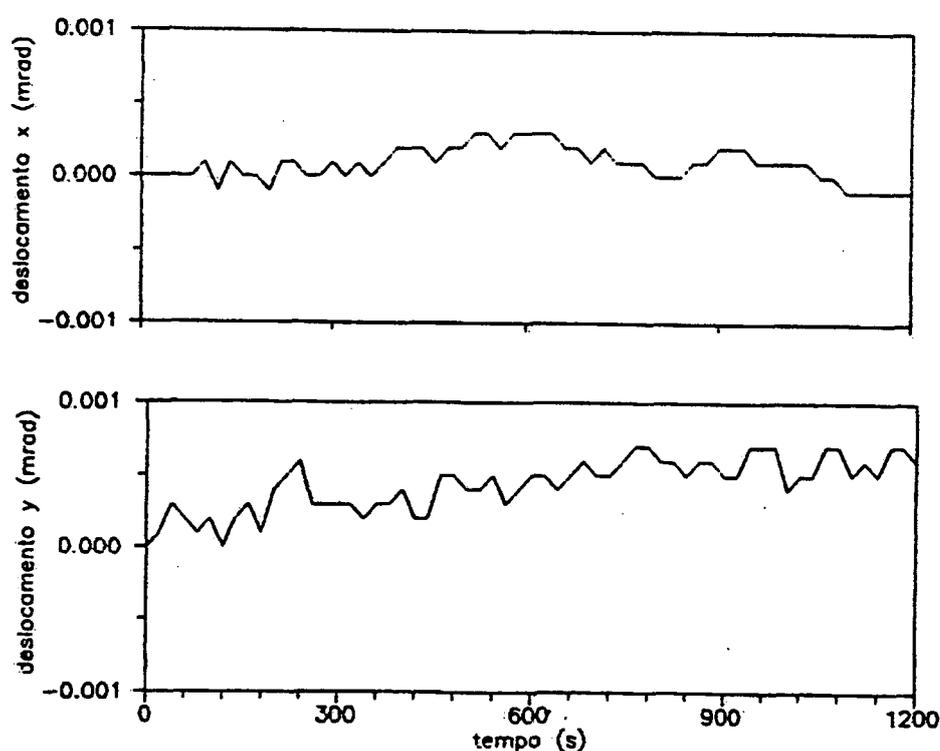


Figura 5.14- Estabilidade espacial - carcaça fechada e sem ventilação.

Em alguns testes, simultaneamente, foram feitas simulações para avaliar a influência da agitação do ambiente. Para tanto, provocou-se fluxos aleatórios de ar em diferentes direções simulando situações, tais como, abrir e fechar de portas, movimentação de pessoas, correntes de ar e outras. Esses fluxos foram provocados manualmente, com o auxílio de um "leque" e com frequências de movimentação variáveis.

A figura 5.12 registra esta influência em uma situação onde o protótipo foi montado com a carcaça aberta e sem ventilação forçada, tendo as variações atingido valores da ordem de  $\pm 5 \mu\text{rad}$  para  $\phi_x$  e

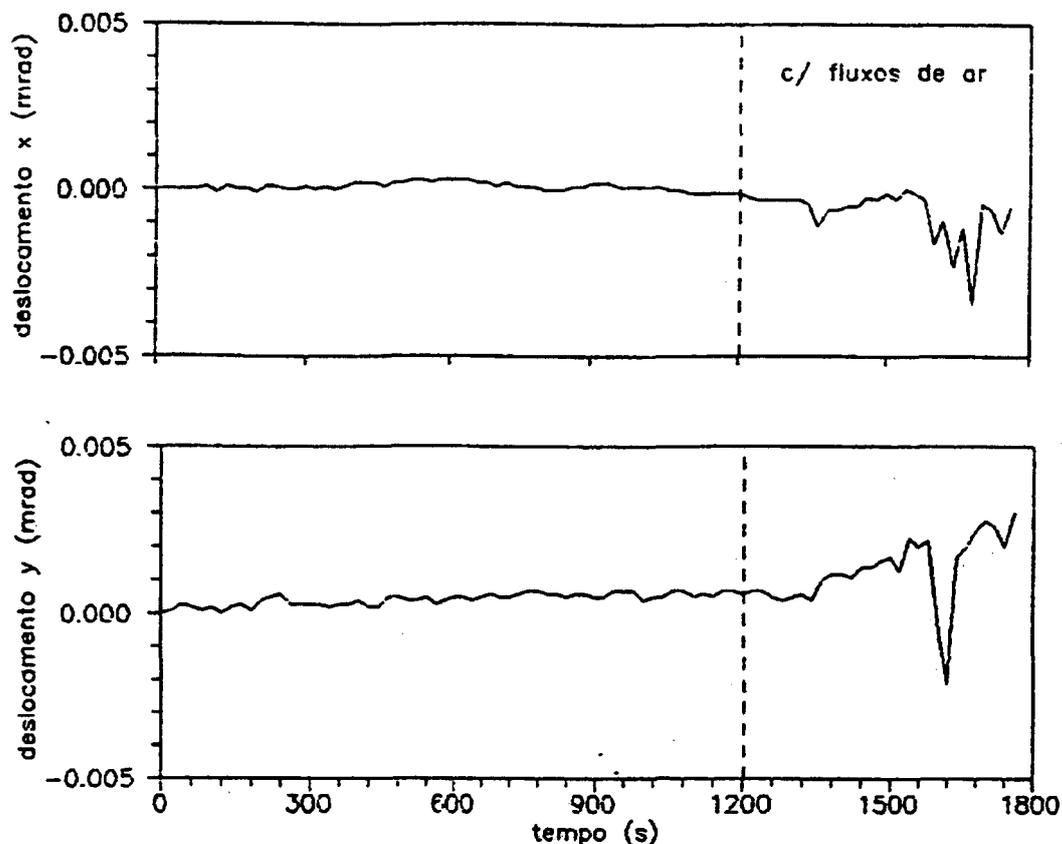
$\pm 4\mu\text{rad}$  para  $\varphi_y$ , valores considerados elevados, comprovando a necessidade de uma proteção contra a ação de agentes irregulares de dissipação sobre o gerador laser. Por sua vez, na montagem com a carcaça fechada e com ventilação lateral (fig. 5.16), caracterizando o sistema plenamente protegido, as variações diminuíram, chegando a valores na ordem de  $\pm 2$  e  $\pm 3\mu\text{rad}$  para  $\varphi_x$  e  $\varphi_y$  respectivamente, indicando ainda uma sensibilidade aos fluxos aleatórios de ar, só que já não tão intensa como no caso anterior.



**Figura 5.15-** Estabilidade espacial - carcaça fechada e ventilação lateral.

Mudando a direção do fluxo de ar da ventilação - direção axial com o ventilador posicionado atrás da unidade geradora da reta padrão, obteve-se valores que permitem comparar o desempenho com a montagem com ventilação lateral. A figura 5.17 mostra o resultado deste teste e os valores da variação de posição do feixe ficaram igualmente na faixa de  $\pm 0,5$  a  $\pm 1\mu\text{rad}$  nos dois planos de medição, caracterizando também uma grande estabilidade espacial do feixe. No entanto, na mesma figura pode-

se verificar a simulação feita com fluxos aleatórios de ar, e novamente comprovou-se uma sensibilidade do sistema à agitação do ambiente. Foram registradas variações da ordem de  $\pm 4 \mu\text{rad}$  nas duas direções.

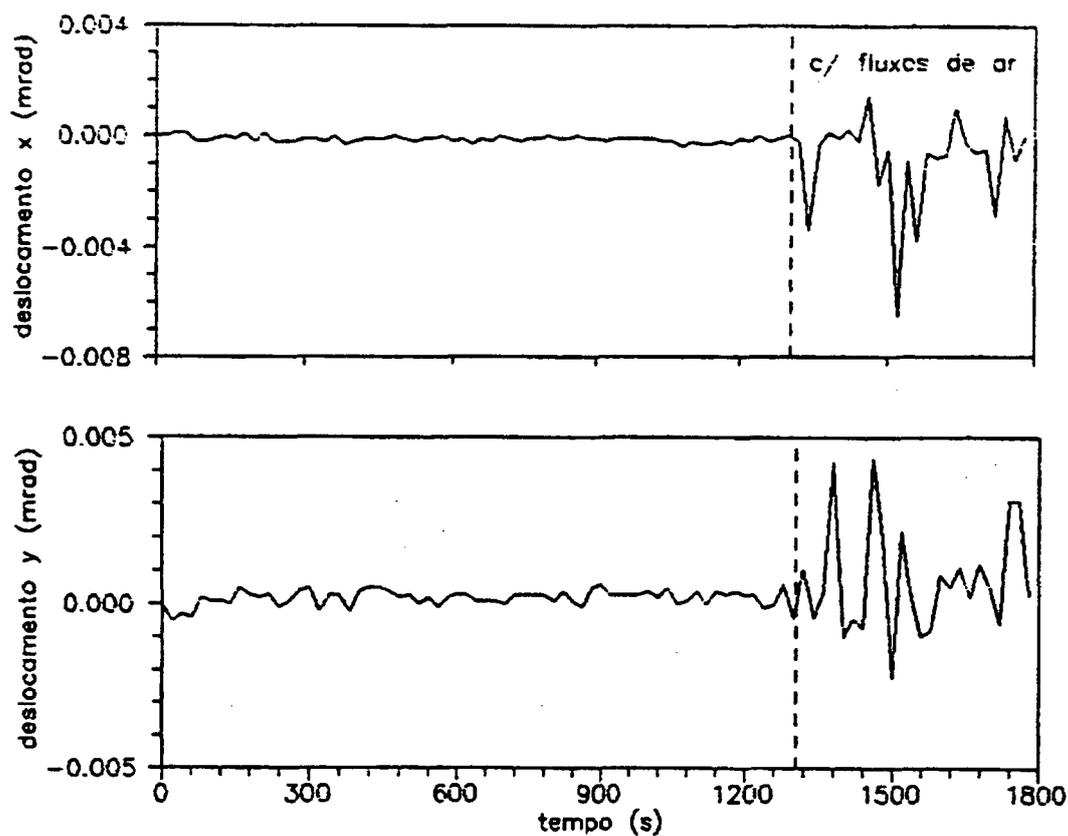


**Figura 5.16-** Influência de fluxos aleatórios de ar na estabilidade espacial do feixe - carcaça fechada e com ventilação lateral.

A influência da posição do ventilador não altera os resultados quando o sistema está funcionando em um ambiente sem perturbações, mas é perceptível uma melhora (em torno de 25%) com a ventilação lateral, quando existem fluxos aleatórios de ar.

Utilizando-se ventilação lateral, existe uma dependência da direção e do sentido desses fluxos

aleatórios de ar, uma vez que a homogeneização do ar em torno da unidade geradora da reta padrão não é perfeita, enquanto que quando utiliza-se a ventilação axial a homogeneização é melhor, no entanto as instabilidades registradas foram maiores, provavelmente porque o fluxo de ar do ventilador foi insuficiente.



**Figura 5.17-** Influência de fluxos aleatórios de ar na estabilidade espacial do feixe - carcaça fechada e com ventilação axial.

Fundamentalmente, a ventilação é bastante importante, confirmando a expectativa de redução dos gradientes de temperatura entre o gerador laser e meio ambiente. Os resultados podem ser melhorados com a utilização de um ventilador de fluxo de ar maior.

### 5.3.2 Influência da Carcaça

Quando da análise da influência da proteção mecânica da carcaça sobre o tempo de estabilização térmica do sistema, estando a carcaça aberta ou fechada, verificou-se, ao mesmo tempo que esta proteção tem uma importância relativamente grande, no que se refere à estabilidade espacial do feixe.

De uma forma geral, a carcaça torna a unidade geradora da reta padrão menos sensível às perturbações do ambiente, e independente das demais formas de configuração do sistema, tais como, a atuação ou não do ventilador, torna o feixe laser mais estável também quando o sistema já está em regime termicamente estabilizado. Esta melhora tipicamente é da ordem de 50%.

O quadro da figura 5.18 resume alguns resultados dos testes de estabilização espacial do feixe e os valores apresentados são valores típicos dos deslocamentos do feixe, medidos com o sistema em regime termicamente estável. São apresentados também alguns dos resultados obtidos com a simulação de agitação no ambiente de medição.

influência do ambiente →		carcaça aberta		carcaça fechada	
		calmo	agitado	calmo	agitado
sem ventilação	$\varphi_x$ ( $\mu\text{rad}$ )	$\pm 3$	$\pm 5$	$\pm 1$	-
	$\varphi_y$ ( $\mu\text{rad}$ )	$\pm 3$	$\pm 4$	$\pm 1$	-
com ventilação lateral	$\varphi_x$ ( $\mu\text{rad}$ )	$\pm 1$	-	$\pm 1$	$\pm 2$
	$\varphi_y$ ( $\mu\text{rad}$ )	$\pm 2$	-	$\pm 1$	$\pm 3$
com ventilação axial	$\varphi_x$ ( $\mu\text{rad}$ )	-	-	$\pm 1$	$\pm 4$
	$\varphi_y$ ( $\mu\text{rad}$ )	-	-	$\pm 1$	$\pm 4$

Figura 5.18- Resultados dos ensaios da estabilidade espacial do feixe.

No entanto, cabe ressaltar que não se pode avaliar até que ponto a simulação do ambiente de medição representa as condições típicas do ambiente onde o “laser de alinhamento” irá operar. Uma conclusão mais segura seria conseguida com a repetição dos testes em um ambiente tipicamente industrial com variações ambientais reais.

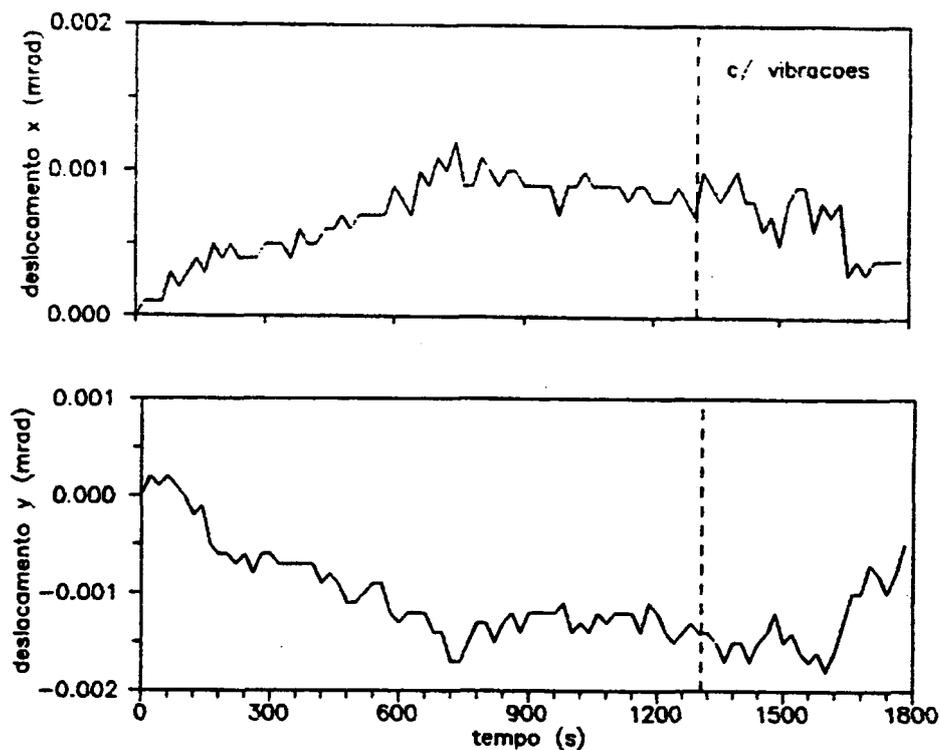
### 5.3.3 Influência de Vibrações Mecânicas

A simulação de vibrações foram provocadas através de batidas com a mão, com intensidades e frequência variáveis, em diferentes posições da bancada, simultaneamente com o monitoramento da posição do feixe laser.

Na figura 5.19 é apresentado o resultado de um teste com a unidade geradora da reta padrão montada sobre os transladores, carcaça fechada e com ventilação. Durante o período de funcionamento sem vibrações as variações do feixe ficaram dentro da faixa de  $\pm 1 \mu\text{rad}$  nos dois planos de medição. A partir do instante em que começaram a haver as vibrações, as variações permaneceram dentro da mesma faixa, sem ter havido detrimento da qualidade do feixe.

Os testes experimentais demonstram que as vibrações provocadas não influenciaram na estabilidade espacial do feixe, no entanto não foi feito uma análise com outras formas de vibrações, tais como, as vibrações provocadas durante o funcionamento de uma máquina.

A estabilidade dos elementos mecânicos da unidade geradora da reta padrão foi bastante satisfatória nos testes realizados.



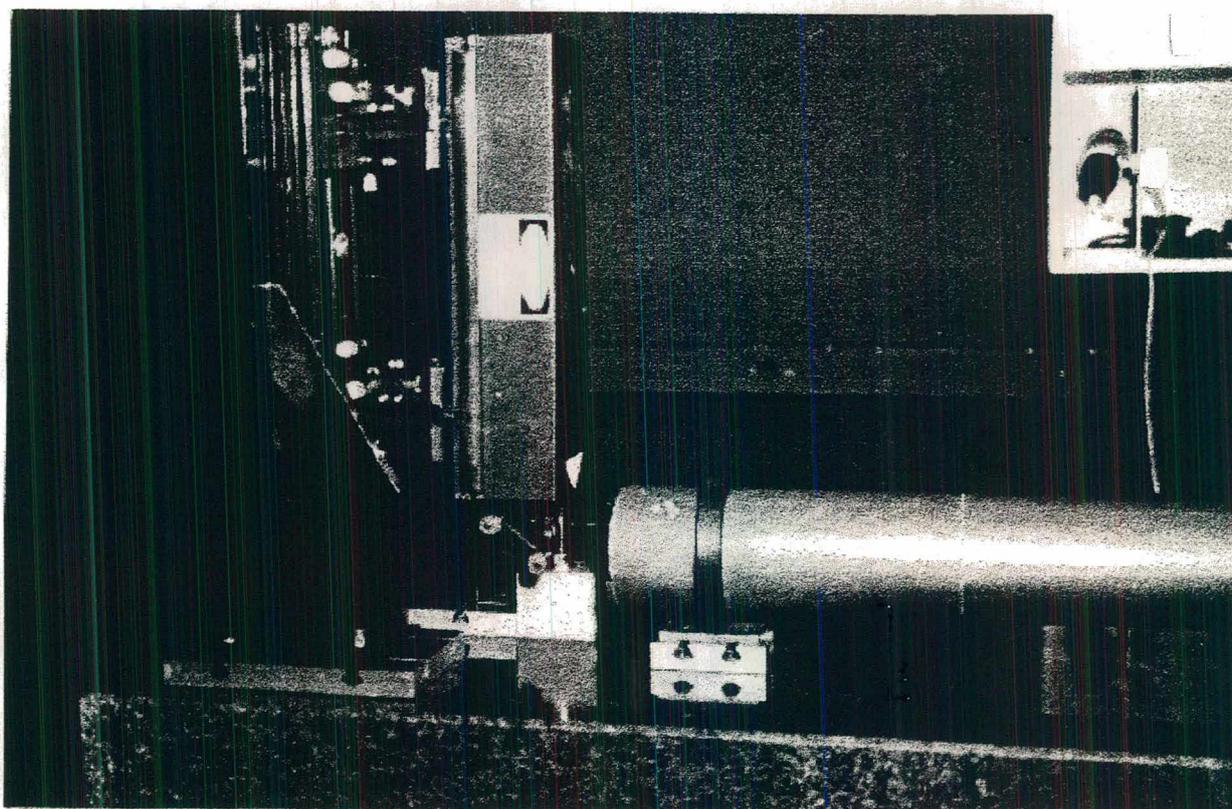
**Figura 5.19-** Influência de vibrações na estabilidade espacial do feixe - com transladores, carcaça fechada e ventilação.

### 5.3.4 Comportamento do Protótipo com Fixação na Posição Vertical

Quando da definição dos requisitos de cada módulo do protótipo citou-se a necessidade de um sistema que possibilitasse a fixação do conjunto em posições diferentes da horizontal, e durante o projeto adotou-se uma solução que utiliza ímãs como elemento de fixação no sentido de atender este requisito.

Com o objetivo de avaliar a eficiência desta solução configurada, planejou-se um teste de avaliação do protótipo montado na posição vertical.

Uma infra-estrutura um pouco diferente da utilizada nos testes já comentados foi necessária, envolvendo um dispositivo modular para fixar a placa base da unidade geradora da reta padrão na posição vertical em relação à superfície da bancada, e um penta-prisma com a função de desviar o feixe a  $90^\circ$  no sentido de encontrar o fotodetector posicionado a uma distância de um metro sobre a bancada. Esta montagem é mostrada na figura 5.20.



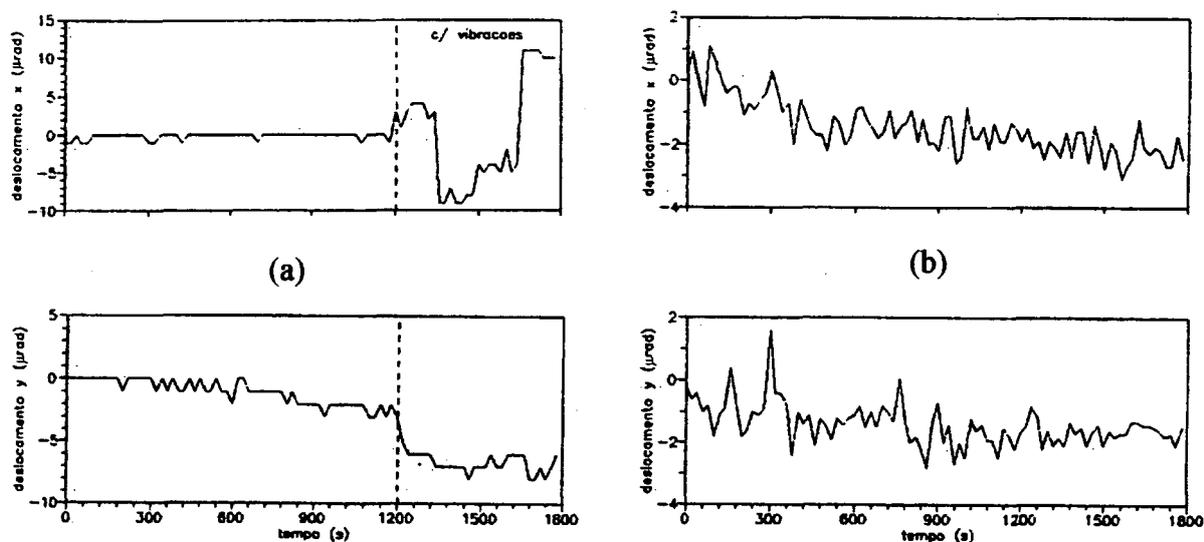
**Figura 5.20-** Montagem da unidade geradora da reta padrão na posição vertical.

A unidade geradora da reta padrão foi montada com a carcaça totalmente fechada, sobre os transladores do módulo de ajuste e fixação e com o sistema de ventilação forçada direcionado à lateral do conjunto.

Após a estabilização térmica, foi feito o monitoramento da posição do feixe laser durante um período

de 30 minutos, com simulação de vibrações sobre a bancada para checar a estabilidade mecânica desta montagem.

O comportamento do sistema em condições normais, sem vibração, registrou variações na faixa de  $\pm 2\mu\text{rad}$  (fig. 5.21.b), caracterizando um comportamento relativamente estável. No entanto, na situação com as vibrações simuladas (fig. 5.21.a), houve uma grande perturbação no comportamento, com variações da ordem de  $\pm 10\mu\text{rad}$  na direção x e na faixa de  $\pm 4\mu\text{rad}$  na direção y, sendo que, nos dois planos, houve deslocamentos sistemáticos, que podem ser verificados nitidamente nas curvas registradas nos gráficos da figura 5.21.a, caracterizando um deslocamento da estrutura mecânica e não do feixe. O elemento onde a UGRP está fixada demonstra ao mesmo tempo uma rigidez insuficiente, sendo uma fonte de perturbações significativas. A direção x apresenta uma variação bem maior, porque é no plano xz que atua o peso do conjunto quando montado verticalmente.



**Figura 5.21-** Influência na estabilidade espacial do feixe com o protótipo montado na posição vertical, devida a vibrações.

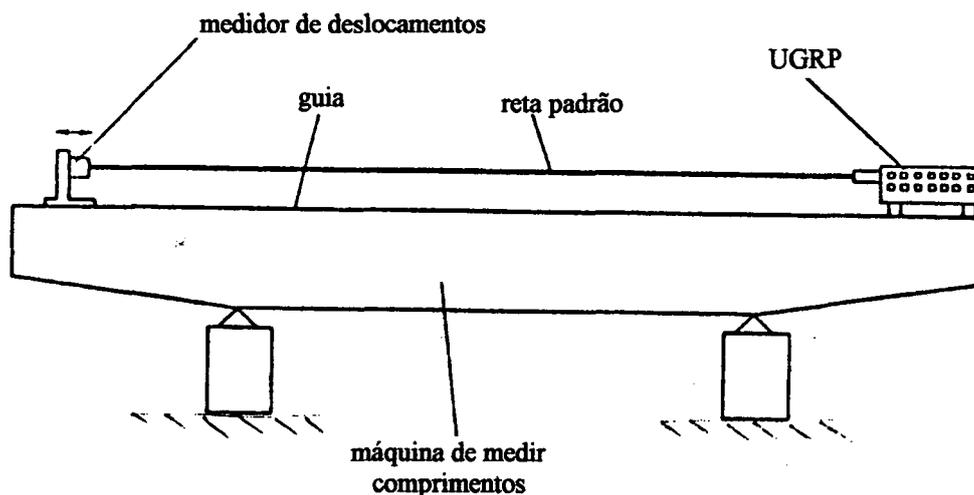
Os resultados revelam que a unidade geradora da reta padrão assim configurada, pode ser aplicada em situações que requeiram uma montagem vertical com segurança, entretanto a estabilidade espacial do feixe é prejudicada e isto ocorre em função de um conjunto de fatores, tais como:

- maior instabilidade dos transladores - a massa do sistema origina uma força indesejada na direção tangencial aos pontos de apoio do acoplamento cinemático, sendo que os mesmos não foram desenvolvidos para suportar carregamentos neste plano;
- a altura da montagem é grande, tornando a montagem menos rígida e facilitando a amplificação das vibrações (maior braço de alavanca);
- bastante sensível a vibrações;
- normalmente requer a utilização de elementos ópticos, tais como - prismas e espelhos, que incrementam erros ao conjunto.

### **5.3.5 Ensaio de Aplicação do Protótipo**

Com o objetivo de avaliar o comportamento do protótipo em uma situação de aplicação prática para a qual o sistema se destina, realizou-se um ensaio de qualificação da trajetória do carro de uma máquina de medição de comprimentos (Máquina de Abbé) de 3 metros de barramento, com condições ambientais rigorosamente controladas. A máquina ensaiada nestas condições apresenta uma estabilidade dimensional excepcionalmente boa, servindo como uma referência de reticidade propício à comparação do feixe laser gerado pela unidade geradora da reta padrão.

A figura 5.22 ilustra o esquema de montagem do ensaio, com a unidade geradora da reta padrão montada com os transladores e sem a ventilação forçada.



**Figura 5.22-** Montagem do ensaio de retilidade de trajetória do carro de uma máquina de medir comprimentos /1/.

Embora os resultados obtidos nos experimentos de avaliação da estabilidade espacial do feixe tenham registrado os melhores resultados com o sistema funcionando com a atuação da ventilação forçada, nesta avaliação da máquina de Abbé a ventilação não foi empregada, pois naqueles experimentos havia um isolamento do caminho óptico do feixe, condição não repetida nesta nova situação.

Como os resultados experimentais demonstraram que o sistema funcionando em um ambiente sem agitação, com a carcaça fechada, é estável, tanto com ventilação quanto sem, optou-se na medição da máquina de Abbé, pela não utilização da ventilação, e, ao invés disso, restringir o acesso de pessoas ao ambiente de ensaio, evitando rigorosamente a agitação do ambiente. Desta forma contorna-se possíveis turbulências provocadas pela ventilação no caminho óptico.

Apenas a direção transversal à guia foi ensaiada (eixo  $y$ ), sendo esta a direção mais estável da máquina, e o fotodetector foi fixado no carro com auxílio de uma base magnética. A unidade geradora da reta padrão foi posicionada sobre a máquina na posição 3000mm do barramento e as medições foram feitas

na faixa de 0 a 2800mm, ou seja a posição 0 mm é a posição mais afastada em relação à unidade geradora da reta padrão.

Os resultados do ensaio estão registrados no gráfico da figura 5.23, onde verifica-se que a dispersão das medidas aumenta com a distância entre o fotodetector e a unidade geradora da reta padrão, função da variação angular do feixe laser, e pode ser representada por:  $DM = \pm (1 + 2L/1000)$ , onde  $DM$  em  $\mu\text{m}$  e  $L$  em m, dessa forma, para  $L = 1\text{m}$ ,  $DM$  resulta  $\pm 3\mu\text{m}$ .

Esta dispersão da medição encontrada é superior aos valores medidos, nas mesmas condições, nos ensaios de estabilidade da unidade geradora da reta padrão, que ficaram na faixa de  $\pm 1\mu\text{m/m}$ .

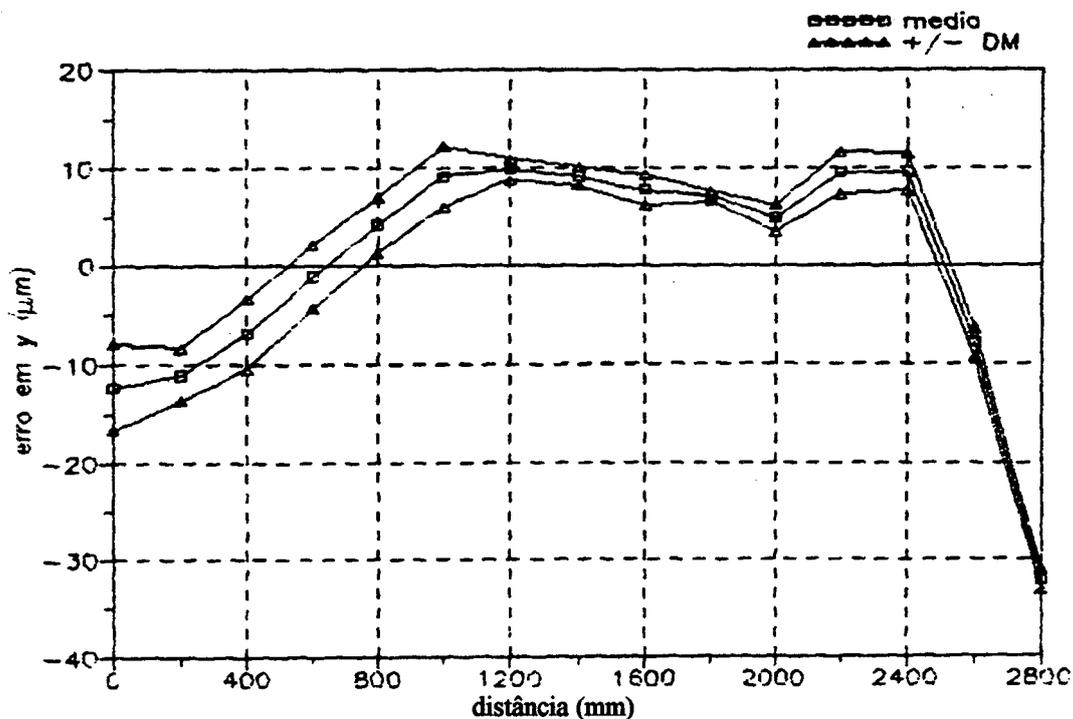


Figura 5.23- Resultado do ensaio da máquina de medir comprimentos.

A diferença entre os valores pode ser atribuída, em parte, a uma mudança de comportamento do feixe por se tratar de um ensaio realizado ao longo de um período de tempo mais longo, e também,

possíveis instabilidades da unidade de detecção do laser de alinhamento, cuja montagem mecânica de sujeição à máquina de Abbé não foi tão rígida quanto àquela realizada nos ensaios anteriores onde permanecia constantemente estático.

A dispersão da medição registrada foi integralmente atribuída às instabilidades do laser, partindo-se da premissa de que a máquina ensaiada garante uma repetibilidade muito boa e referencial.

## 6 CONCLUSÕES

No desenvolvimento do trabalho, abordou-se, inicialmente, questões básicas para o domínio da teoria que descreve a propagação do feixe laser e aplicabilidade deste à metrologia geométrica, para, posteriormente, partir para a descrição da criação de uma solução otimizada do conjunto que compõe a unidade geradora da reta padrão. Um protótipo laboratorial foi construído, caracterizando a implementação da solução concebida na fase de projetos. Como os requisitos de incerteza de medição do sistema eram bastante apertados, foi necessário a implementação de uma bancada de ensaios instrumentada, rigorosamente qualificada, para executar a avaliação experimental do protótipo, culminando com a demonstração das potencialidades do sistema.

A unidade geradora da reta padrão foi desenvolvida voltada à integração ao laser de alinhamento. Evidentemente a incerteza de medição do laser de alinhamento depende da qualidade metrológica de todos os módulos que compõem todo o sistema, no entanto, a unidade geradora da reta padrão, com significativa influência, se destaca entre estes módulos.

Os resultados obtidos através dos experimentos comprovam que é possível manter as instabilidades de posição do feixe laser em patamares baixos, para isso devem ser tomados alguns cuidados, sempre relacionados com a proteção do conjunto contra as influências ambientais. As instabilidades espaciais ficaram na faixa de  $\pm 1 \mu\text{rad}$  com o sistema operando em ambiente laboratorial e resguardado de

agitações no ambiente, com a devida proteção mecânica da carcaça. Quando submetido a condições ambientais adversas, as instabilidades aumentam, atingindo uma faixa de  $\pm 3\mu\text{rad}$  e em alguns casos  $\pm 4\mu\text{rad}$ , as quais poderiam ser melhoradas com uma proteção térmica mais eficiente.

A dispersão da medição do sistema avaliada com a aplicação da unidade geradora da reta padrão, mantendo os cuidados com a qualidade do ambiente de medição, é da ordem de  $\pm 1\mu\text{m/m}$  ( $\pm 1\mu\text{rad}$ ), valor que confrontado com o requisito de incerteza de medição apresentado no item 2.1.1, e que é o requisito metrológico principal, revela que o feixe gerado possui estabilidade espacial suficiente para ser aplicado como um padrão de retilidade para a qualificação de peças e máquinas de precisão.

É possível a aplicação em ensaios nas faixas longitudinais de 0 a 2 metros e de 0 a 5 metros, no entanto, com o sistema óptico de expansão e colimação do feixe especificado, a faixa de 0 a 30 metros não pôde ser alcançada, sendo que, conforme demonstrado teoricamente no item 3.1.2, até a distância de aproximadamente 13 metros seria possível garantir um feixe com propriedades adequadas.

Com os sistemas mecânicos especificados e desenvolvidos para a adequação da unidade geradora da reta padrão às aplicações de medição, constatou-se que as soluções empregadas permitem uma relativa rapidez na fase de preparação dos ensaios, sendo todo o conjunto facilmente montável e com dispositivos de ajustes extremamente confortáveis e mecanicamente estáveis. No entanto deve-se fazer uma ressalva no que se refere à altura do conjunto montado, que se impôs como uma característica não adequada e fator limitante para algumas aplicações que requerem uma montagem mais compacta. Essa limitação talvez pudesse ser contornada com o desenvolvimento de um novo módulo de ajustes e fixação adaptável, estruturado funcionalmente de acordo com o princípio que utiliza três parafusos nos pontos de apoio do sistema, mas é sabido, em contrapartida, que com esta solução existe um

detrimento no conforto e rapidez do alinhamento do conjunto na sua aplicação, e só deveria ser aplicada em situações onde a originalmente desenvolvida não pudesse ser aplicada.

Ainda relacionado à versatilidade do sistema, é importante que se saliente, que os resultados experimentais demonstraram que existe uma outra característica indesejável que é o tempo de estabilização térmica, tipicamente em torno de 130 minutos, mas que pode ser sensivelmente reduzido, chegando a valores em torno de 40 minutos, através do estímulo à dissipação da energia radiante originada na geração do laser.

Comprovadamente o feixe gerado pelo laser de He-Ne é de boa qualidade e com características apropriadas para a aplicação em ensaios geométricos. Especificamente o gerador laser utilizado apresentou boas características de estabilidade de potência, no entanto, como já era esperado comprovou-se a grande sensibilidade deste tipo de laser às condições ambientais a que ele é submetido, fonte inegável de instabilidades de posição do centro energético do feixe.

De uma forma geral os dispositivos mecânicos desenvolvidos e empregados na configuração do conjunto mecânico, foram satisfatórios e cumpriram as suas funções plenamente ou em alguns casos parcialmente. Pode-se, entretanto, citar alguns problemas encontrados e que careceriam de uma revisão na sua concepção:

- É desejável a ajustagem de posição nos apoios do gerador laser e no suporte do telescópios, no sentido de facilitar e conseqüentemente garantir a manutenção de um bom alinhamento do conjunto laser-telescópio;
- Conforme já comentado, é desejável um sistema de ajustes e fixação da unidade geradora da reta padrão mais compacto;

- As placas que configuram o acoplamento cinemático requerem uma qualidade de usinagem rigorosa (tolerâncias dimensionais e de qualidade superficial), além do emprego de material com propriedades mecânicas (dureza, resistência ao desgaste, resistência ao impacto) apropriadas ao tipo de ação a que são submetidas e importantes para a repetibilidade de posicionamento, possibilitando o desacoplamento e acoplamento do conjunto sempre na mesma posição, desde que os ajustes de alinhamento não sejam alterados, e possibilitando ainda a garantia de um acoplamento isostático, sem vínculos redundantes;
- A placa base de fixação do conjunto completo apresentou problemas quando submetida a ambiente hostil. Ocorreram deformações grandes em função do tipo de material e da geometria delicada da peça, e que pode facilmente ser contornada com a fabricação de uma nova peça, desta vez em aço e com a mesma geometria, muito embora implique em um aumento do peso do sistema;
- A aplicação dos ímãs nas bases de apoio, foi satisfatória e cumpriu plenamente as funções desejadas, garantindo segurança contra deslocamentos indesejáveis no acoplamento, tais como vibrações e batidas, e garantindo também, uma força de acoplamento suficiente para aplicações que requeiram uma montagem do sistema na posição vertical, sem a necessidade de travamentos indesejáveis e prejudiciais à estrutura do conjunto. O único problema com relação à solução implementada, diz respeito à necessidade de proteger as arestas dos ímãs, já que o material é extremamente frágil.

Um dos objetivos do trabalho, consistia da montagem de uma bancada automatizada para a qualificação do protótipo. Esta bancada foi implementada e conseguiu-se através dela chegar a valores confiáveis, graças à qualidade dos sistemas de medição empregados e que foram devidamente calibrados para atender aos rigorosos requisitos exigidos para poder avaliar a unidade geradora da reta padrão. Detalhes foram descritos no capítulo 4.

Sugere-se, no campo das aplicações dos lasers a gás, como uma possível linha de pesquisa para dar continuidade ao que já foi concretizado, o desenvolvimento de sistemas de controle das expansões térmicas do ressoador do gerador laser. Para isso talvez pudesse ser implementado um dos métodos descritos no item 3.1.4, quando da descrição do módulo de proteção térmica.

Seria de extrema utilidade prática também, o desenvolvimento de um conjunto de acessórios voltados à aplicação do laser de alinhamento em ensaios geométricos, tais como: apalpadores, dispositivos de fixação de elementos ópticos, dispositivos de adaptação da unidade geradora da reta padrão à superfícies cilíndricas, e talvez uma concepção dos dispositivos voltados à cada um dos diferentes tipos de ensaios geométricos em particular.

Com o avanço da tecnologia das fibras ópticas, e possível aplicação desta tecnologia para a transmissão do feixe laser na sua faixa de operação longitudinal, soluções que viabilizem a utilização do laser de alinhamento em ambiente industrial podem ser desenvolvidas e testadas, como forma de minimizar as influências do ambiente sobre o caminho óptico do feixe e conseqüente minimização da deterioração da estabilidade e qualidade do feixe laser.

É notório, a nível mundial, o avanço da tecnologia dos lasers diodo e com isso muitos sistemas estão sendo desenvolvidos visando explorar essa tecnologia, inclusive sistemas similares ao laser de alinhamento, voltados às mesmas aplicações.

Esse avanço na aplicação dos diodos lasers se deve basicamente à melhoria na qualidade do feixe laser, com atuação dentro do espectro visível, colimação, estabilidade de potência e desenvolvimento de sistemas ativos de controle de temperatura.

Em função disso seria de inegável valia um estudo visando avaliar a viabilidade de adaptação da unidade geradora da reta padrão à utilização do diodo laser como gerador laser.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- / 1/ TEXAS INSTRUMENTS    Optoelectronics. Theory and practice. Edited by Alan Chappell. ISBN 0-904 047-19-9, Texas Instruments Ltd., 434 p., 1976.
- / 2/ Valentina, L.D.        Ensaio geométrico em máquinas-ferramenta com laser de alinhamento. Dissertação de mestrado, CPGEM-UFSC, 154 p., 04/1986.
- / 3/ Silva, A.D.            Ensaio geométrico de peças e máquinas - Uma metodologia automatizada. Dissertação de mestrado, CPGEM-UFSC, 98 p., 02/1984.
- / 4/ Belozertsev, A.N.  
      Novikov, N.I.         Calculation of laser measurement systems for monitoring the retilinearity of extended objects. Measurement Techniques, v. 32, n. 2, p. 135-8, 1989.
- / 5/ Pohl, W.C.  
      Sobottke, M.D.       Design of helium-neon optical systems for construction and agricultural leveling and alignment instruments. Proceedings of SPIE - The Int. Soc. Opt. Eng., v. 741, p. 161-71, 1987.
- / 6/ Carey, G.  
      Hickman, P.A.        Developments in laser alignment techniques. ISA Transactions, v. 9, n. 3, p. 222-8, 1970.
- / 7/ Golubovskii, Yu.  
      Kulikova, N.I.        Laser instruments for measuring nonrectilinearity in mechanical engineering. Sov. J. Opt. Technol., v. 56, n. 1, p. 17-20, 1989.

Etsin, I.

- / 8/ Wolinski, W. Laser measurement 1968-1987 and beyond. *Rozprawy Elektrotechniczne*, v. 34, n. 4, p. 1159-75, 1988.
- / 9/ Kokin, Yu. N. A laser system for measuring deviations in surface shape and position. *Measurement Techniques*, v. 26, n. 5, p. 356-60, 1983.  
Leonov, V.V.
- /10/ Williams, D.C. Laser alignment techniques. *Phys. Technol.*, v.14, p. 61-7, 1983.
- /11/ Hara, H. New He-Ne laser tubes. *NEC Research & Development*, n. 91, p. 52-6, 1988.  
Hoshi, K.  
Ishihara, H.
- /12/ Knollenberg, R. Prospects for the helium-neon laser through the end of the century. *Proceedings of SPIE - The Int. Soc. Opt. Eng.*, v. 741, p. 2-30, 1987.
- /13/ Belozertsev, A. Raising the stability of the spatial location of a laser beam energetic axis. *Measurement Techniques*, v. 27, n. 4, p. 304-7, 1984.  
Isaev, A.I.  
Novikov, N.I.
- /14/ Vagner, E.T. Testing geometrical parameters of objects by means of the annular structure of laser beams. *Measurement Techniques*, v. 24, n. 4, p. 268-71, 1981.
- /15/ New, B.M. Versatile electrooptic alignment system for field applications. *Applied Optics*, v. 13, n. 4, p. 937-41, 1974.
- /16/ Moruzzi, J.L. Low-cost optical alignment system. *IEE Proceedings, Part A*, v. 136, n. 2, p. 45-8, 1989.  
Cunliffe, R.
- /17/ Ostafiev, V.A. Laser measuring systems for precision CNC machine tools. *Computers in Industry*, v. 11, n. 3, p. 229-34, 1989.  
Tymchik, G.S.

- /18/ Merkulov, V.A. Improvement in the accuracy of photoelectric devices for testing rectilinearity, operating in a turbulent atmosphere. *Sov. J. Opt. Technol.*, v. 55, n. 1, p. 3-5, 1988.
- /19/ Volotskii, A.A. Estimate of spatial fluctuations of the directivity pattern axis of transformed laser radiations. *Measurement Techniques*, v. 27, n. 4, p. 308-10, 1984.
- /20/ Wong, G.S.K. An automatic alignment, error-correction system for continuous assesment of straightness. *ISA Transactions*, v. 9, n. 3, p. 229-35, 1970.
- /21/ Schneider, C.A. Entwicklung eines Laser-Geradheits-mebsystems zur Durchführung geometrischer Prüfungen im Maschinenbau. Tese (Doktor-Ingenieur), RWTH - Aachen, 130 p., 11/1978.
- /22/ Schneider, C.A. Ensaio geométricos de máquinas-ferramenta. Publicação interna CERTI/LABMETRO, UFSC, 11/1988.
- Schoeler, N.
- Veiga, C.L.
- Wondracek, U.
- /23/ Peters, H.G. Otimização da estabilidade espacial do raio gerado pelo laser de hélio-neônio. Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Físico-Química - UFSC, 116 p., 06/1986.
- /24/ Trapet, E. Modern laser aligners replace conventional techniques. *Proceedings of IMEKO, Berlin (West)*, p. 203-12, 24- 28/05/1982.
- Pfeifer, T.
- /25/ Soares, O.D.D. Laser dimensional metrology. *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute - Viana de Castelo, Portugal, Dordrecht, Netherlands*, p.24-58, 16-27/07/1984.
- Gomes, A.O.S.

- /26/ Pfeifer, T.  
Schneider, C.A. Einsatz neuer Laser-Technologien zur Messung der Abweichung von der Geradlinigkeit. ISBN 3-531-02719-0, Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 114 p., 1978.
- /27/ LABMETRO Sistema de ensaio de retilicidade. Definições, estratégias e requisitos. Relatório técnico interno, LABMETRO, UFSC, 18 p., 1991.
- /28/ Smith, A.L.S. He-Ne lasers are alive and well. Laser Focus World, v. 25, n. 7, p. 75-86, 07/1989.
- /29/ Kogelnik, H. Imaging of optical modes - Resonators with internal lenses. The Bell System Technical Journal, p. 455-94, 03/1965.
- /30/ Kogelnik, H.  
Li, T. Laser beams and resonators. Proceedings of the IEEE, v. 54, p. 1312-29, 10/1966.
- /31/ Scarr, A.J.T. Metrology and precision engineering. McGraw-Hill Publishing Company Limited, London, 1967.
- /32/ Gupta, R.C. Engineering precision metrology. Khanna Publishers, Delhi, 1979.
- /33/ Meijer, J. A spatial mechanism for pilot laser alignment with four independently controlled degrees of freedom. Proceedings of SPIE - The Int. Soc. Opt. Eng., v. 801, p. 93-99, 1987.
- /34/ Hansen, F. Adjustment of precision mechanisms. Iliffe Book Ltd., 163 p., 1st ed., London, 1970.
- /35/ 21 CFR  
Parts 1000 and 1040 Laser Products; Amendments to Performance Standard; Final Rule. Department of Health and Human Services; Food and Drug Administration; USA. Federal Register/Rules and Regulations, v. 50, n. 161, p. 33682-702, 08/85.

- /36/ Hecht, J. The laser guidebook. ISBN 0-07-027733-8, McGraw-Hill Book Company, USA, 1986.
- /37/ MELLES GRIOT Optics guide 5. Melles Griot Inc., 1990.
- /38/ Mortensen, P. Diode lasers make gains in japanese markets. Laser Focus World, v. 26, n. 7, p. 67-80, 1990.
- /39/ Gerrard, A. Introduction to matrix methods in optics. John Wiley & Sons Ltd., London, 1975.  
Burch, J.M.
- /40/ SPINDLER & HOYER Precision Optics. Spindler & Hoyer GmbH & Co., 1987.
- /41/ Sasaki, A. He-Ne laser-beam deviation with thermal distorsion. The Review of Laser Engineering, v. 14, n. 11, p. 946-52, 1986.  
Ogiwara, A.
- /42/ Trapet, E. Ein Beitrag zur Verringerung der Mebunsicherheit von Fluchtungsmebsystemen auf Laserbasis. Tese (Doktor-Ingenieur), RWTH - Aachen, 109 p., 02/1982.
- /43/ Maksimov, V.N. Power stabilization of He-Ne laser. Instruments and Experimental Techniques, v. 30, n. 5, p. 1261-3, 1987.
- /44/ Sasaki, A. Simultaneous output- and frequency- stabilization and single- frequency operation of an internal-mirror He-Ne laser by controlling the discharge current. Japanese Journal of Applied Physics, v. 23, n. 5, p. 593-9, 1984.  
Ushimaru, S.  
Hayashi, T.
- /45/ Nowicki, R. Output power stabilization of a helium-neon laser. Journal of Physics E: Scientific Instruments, v. 4, p. 274-6, 1971.
- /46/ Anderson, V. Uma sistemática para o projeto em microcomputadores de elementos elásticos de transdutores de grandezas mecânicas. Tese de doutorado, CPGEM - UFSC, 202 p., 11/90.

- /47/ Finkelstein, L. Design-oriented teaching of measurement and instrumentation. Measurement, v. 4, n. 3, p. 89-92, 07/86.
- /48/ Finkelstein, L.  
Finkelstein, A.C.W. Review of design methodology. IEE Proceedings, v. 130, Pt. A, n. 4, p. 213-22, 1983.
- /49/ Back, N. Metodologia de projeto de produtos industriais. ISBN 85-7030-013-1, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1983.
- /50/ Asimov, M. Introdução ao projeto de engenharia. Editora Mestre Jou, São Paulo, 1968.
- /51/ Höhne, G. Projeto de instrumentos. Apostila de curso, CPGEM - UFSC, 1990.
- /52/ UNIPHASE Helium-Neon laser systems. Catálogo técnico, Uniphase Corporation, USA, 8 p., 07/1990.
- /53/ Crane, D.E. United States Patent Nº 4,352,185; 28/09/82. Direitos cedidos à Uniphase Corporation, Mountain View, CA, USA.
- /54/ SPINDLER & HOYER Multilímen HeNe-laser ML500. Spindler & Hoyer GmbH & Co., 6 p., 1986.
- /55/ SPECTRA-PHYSICS Model 2020 Ion laser systems. Spectra-Physics International, Mountain View, USA, 20p..
- /56/ Sasaki, A.  
Hayashi, T. Amplitude and frequency stabilization of an internal-mirror He-Ne laser. Japanese Journal of Applied Physics, v. 21, n. 10, p.1455-60, 1982.
- /57/ Sasaki, A.  
Ishikiryama, M.  
Hotta, S. Temperature distribution and cavity length properties of internal-mirror He-Ne laser tubes. The Review of Laser Engineering, v. 17, n. 1, p. 58-64, 1989.
- /58/ ARNO ROTRON Manual técnico de ventiladores. Arno Rotron Equipamentos

- Elétricos Ltda., São Paulo, 20 p..
- /59/ DIN 7168      Allgemeintoleranzen. DIN-Taschenbuch 11, Längenprüftechnik 1. ISBN 3-410-11983-3, Beuth Verlag GmbH, Berlin, p. 276-85, 09/1986.
- /60/ Sparrer, G.      Normal-Laser-Fluchtungsmeßstrecke und-verfahren des ASMW. 33. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Hochschule Ilmenau, DDR, p. 87-90, 24.-28.10.1988.
- /61/ UDT      Optoelectronic components catalog. UDT Sensors, Inc., Hawthorne, USA, 52 p..
- /62/ BURR-BROWN      The handbook of personal computer instrumentation. Data acquisition, test, measurement, and control. Burr-Brown Corp./Intelligent Instrumentation Inc., 5th ed., 07/1990.
- /63/ BURR-BROWN      PCI systems. User guide. Burr-Brown Corp./Intelligent Instrumentation Inc.. 1990.
- /64/ HEWLETT-PACKARD      Practical Temperature Measurements. Application note #290, Hewlett-Packard Co., 1980.
- /65/ OMEGA      The temperature handbook. Omega Engineering, Inc., USA, 1989.
- /66/ HEWLETT-PACKARD      HP model 3497A. Data acquisition/control unit operating and service manual. Hewlett-Packard Co., USA, 06/1981.
- /67/ Flesch, C.A.  
Schneider, C.A.  
Lücke, H.A.      Sistema de aquisição de dados para banco de provas. Encontro Nacional de Atualização Tecnológica em Engenharia Mecânica, UFSC, 56 p., 09/1982.
- /68/ STD      STD-8410. Manual do usuário. STD - Sistemas Técnicos Digitais S.A., 06/1986.

/69/ LABORATORIES      Labtech notebook. User guide. Laboratory Technologies Corp.,  
TECHNOLOGIES CORP. USA, 05/1991.