



BR98B0290



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-6377-PRP/204

**PROJETO PRELIMINAR DE UM SISTEMA DE ESPALHAMENTO  
THOMSON PARA O TOKAMAK ETE**

*Luiz Angelo Berni*

**Relatório Técnico e Científico apresentado ao CNPq, referente à bolsa de  
Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (DTI)**

INPE  
São José dos Campos  
1997

*L*

**29 - 46**

**Publicado por:**

**Divisão de Ensino e Documentação - DED**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

**Caixa Postal 515**

**12227-010 - São José dos Campos - SP - Brasil**

**Telex: 123.3530 INPE BR**

**Fone: (0123) 41.8977 - Ramal 324**

**Fax: 0123-21-8743**

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet un Austausch
- Pidese canje
- Просим обмена
- 歡迎著作交換
- 出版物交換のお願い

**Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.**

INPE-6377-PRP/204

**PROJETO PRELIMINAR DE UM SISTEMA DE ESPALHAMENTO  
THOMSON PARA O TOKAMAK ETE**

*Luiz Angelo Berni*

**Relatório Técnico e Científico apresentado ao CNPq, referente à bolsa de  
Desenvolvimento Tecnológico e Industrial (DTI)**

**INPE  
São José dos Campos  
1997**

Ministério da Ciência e Tecnologia  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE-6377-PRP/204

Relatório Técnico e Científico

**Projeto Preliminar de um Sistema de  
Espalhamento Thomson para o Tokamak ETE**

**Luiz Angelo Berni**  
**processo : 360718/96-5**

Relatório apresentado ao CNPq, referente a bolsa de  
Desenvolvimento Tecnológico e Industrial ( DTI )

**Período : Dezembro/96 a Março/97**

**Local : Laboratório Associado de Plasma ( LAP/INPE )**  
**São José dos Campos**

## **Sumário**

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>Teoria de Espalhamento Thomson.....</b>	<b>02</b>
	2.1 Sinais Esperados para o ETE.....	05
<b>3</b>	<b>Tokamak Esférico ETE.....</b>	<b>08</b>
<b>4</b>	<b>Sistema Preliminar de Espalhamento Thomson.....</b>	<b>10</b>
	4.1 Tubo de vôo.....	10
	4.2 Bloqueio da Luz do Laser.....	18
	4.3 Sistema de Varredura.....	29
<b>5</b>	<b>Referências.....</b>	<b>31</b>

## 1 - Introdução

Este relatório apresenta o projeto preliminar do sistema de injeção e bloqueio da luz do laser para o diagnóstico de espalhamento Thomson ( ET ) que será implantado no tokamak esférico ETE do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais ( INPE/LAP ). Também é apresentado um sistema de varredura para a ótica de coleção da luz espalhada.

O diagnóstico de ET mesmo sendo uma técnica muito difícil de ser implantada devido a baixa relação entre o número de fons espalhados e incidentes ( em geral  $10^{-14}$  para tokamaks ) continua sendo o método mais empregado na determinação da densidade e temperatura eletrônica do plasma por apresentar alta resolução espacial e temporal e por não perturbar o plasma.

Primeiramente será esboçado em linhas gerais a teoria de ET ( Cap. 2 ) juntamente com as expectativas de sinais para o ETE. No Cap. 3 é fornecido as dimensões e parâmetros básicos da máquina e no Cap. 4 o projeto preliminar detalhado para o ETE é apresentado. Todos os desenhos foram realizados no AutoCad e estão todos em escala. Todas as medidas estão em milímetros.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro do CNPq.

## 2 - Teoria de Espalhamento Thomson

Em linhas gerais o diagnóstico de ET consiste em se injetar no plasma uma onda eletromagnética conhecida que interaja com as partículas que compõem o plasma [Shef75, Evan69], como exemplificado na figura 2.1 .

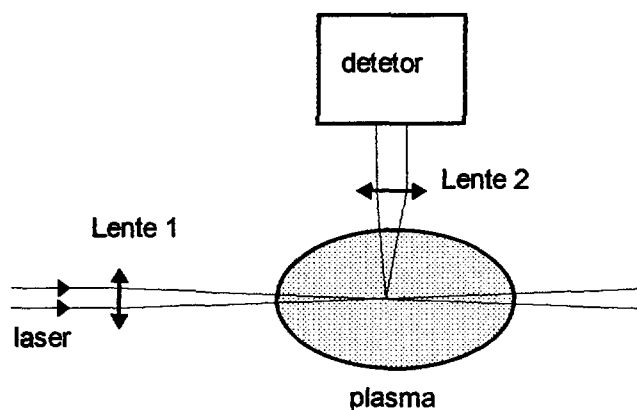


Figura 2.1 : Diagrama esquemático de um experimento de ET.

Uma vez aceleradas pelo campo da onda incidente, essas partículas irradiam como mostrado na figura 2.2 .

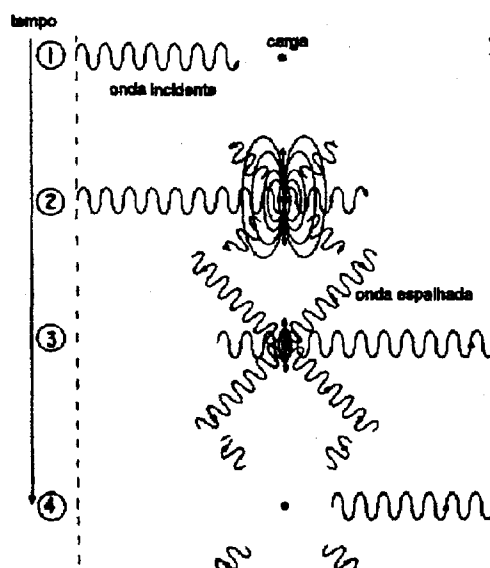


Figura 2.2 : Processo de espalhamento por um elétron [Shef75].

Através de um detetor ( figura 2.1 ) podemos fazer medidas do espectro espalhado pelo plasma, do qual se pode obter informações sobre a densidade e temperatura do plasma. O espectro da radiação espalhada depende da densidade eletrônica, da temperatura dos eletrons e dos ions e do campo magnético. A intensidade da radiação espalhada provê informações a respeito da distribuição espacial dos eletrons. E o deslocamento no comprimento de onda espalhada em relação a onda incidente fornece informações a respeito do movimento dos eletrons que compõem o meio.

A potência espalhada para uma onda incidente polarizada e para plasmas homogeneos pode ser expressa por [Shef75] :

$$P_s(R, \omega_s) d\Omega d\omega_s = \frac{P_i \cdot r_o^2 \cdot L}{2 \cdot \pi} \cdot d\Omega \cdot d\omega_s \cdot |\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}_i)|^2 \cdot n_{\omega} \cdot S(\vec{k}, \omega) \quad (1)$$

Onde  $P_i$  é a potência incidente no plasma,  $r_o$  é o raio clássico do elétron,  $L$  é o comprimento do volume espalhador,  $n_{\omega}$  é a densidade eletrônica,  $\Omega$  é o ângulo sólido de observação. Os vetores unitários na direção de incidência e observação são  $\hat{s}$  e  $\hat{e}_i$ , respectivamente.  $S(\vec{k}, \omega)$  é a função de densidade espectral que fornece o deslocamento em frequência devido à velocidade dos eletrons assim como o efeito de correlação entre eles. Para melhor entendimento, na figura 2.3 está esquematizada a geometria de espalhamento

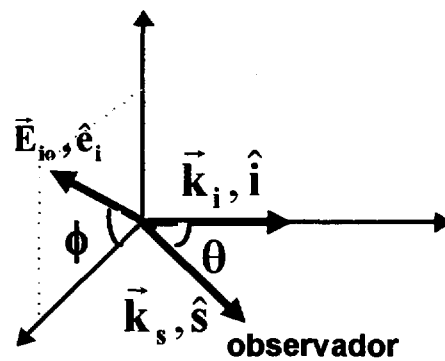


Figura 2.3 : Geometria de espalhamento.



Para plasmas estáveis, não colisional e não magnético, a função de densidade espectral se reduz a :

$$S(k, \omega) = \frac{2 \cdot \pi}{k} \cdot \left| 1 - \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 \cdot f_{\infty}(\omega/k) + \frac{2 \cdot \pi \cdot Z}{k} \cdot \left| \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 \cdot f_i(\omega/k) \quad (2)$$

onde  $f_{\infty} = \frac{e^{-(x_e)^2}}{\sqrt{\pi} \cdot a}$  ,  $f_i = \frac{e^{-(x_i)^2}}{\sqrt{\pi} \cdot b}$

$$a = \left( \frac{2 \cdot k \cdot T_e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} , \quad b = \left( \frac{2 \cdot k \cdot T_i}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} , \quad x_e = \frac{\omega}{k \cdot a} , \quad x_i = \frac{\omega}{k \cdot b} ,$$

$$G_e = \alpha^2 \left[ 1 - 2 \cdot x_e \cdot e^{-x_e^2} \cdot \int_0^{x_e} e^{p^2} dp - i \cdot \pi^{\frac{1}{2}} \cdot x_e \cdot e^{-x_e^2} \right] ,$$

$$G_i = \alpha^2 \cdot \frac{Z \cdot T_e}{T_i} \cdot \left[ 1 - 2 \cdot x_i \cdot e^{-x_i^2} \cdot \int_0^{x_i} e^{p^2} dp - i \cdot \pi^{\frac{1}{2}} \cdot x_i \cdot e^{-x_i^2} \right] ,$$

$$\varepsilon = 1 + G_e + G_i ,$$

$$\alpha = \frac{1}{k \cdot \lambda_D} \approx \frac{\lambda_i}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_D \cdot \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} ,$$

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot K \cdot T}{e^2 \cdot n}} .$$

Para comparação com os resultados experimentais, é mais conveniente trabalharmos em termos de comprimento de onda [Bern96]. A expressão 3 é a representação em termos de comprimento de onda da equação 2 , onde também foi considerado os efeitos de altas temperaturas que desloca o perfil espalhado como um todo para a região azul do espectro.

$$\frac{d^2P(R, \lambda_s)}{d\lambda_s d\Omega} = \frac{P_i \cdot r_o^2 \cdot c \cdot n_e \cdot l}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot \lambda_i \cdot \text{sen}(\theta/2)} \cdot \left( 1 - \frac{7 \cdot (\lambda_s - \lambda_i)}{2 \cdot \lambda_i} \right) \quad (3)$$

$$\left\{ \frac{1}{a} \cdot \left| 1 - \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 \cdot \exp \left( - \frac{c^2 \cdot (\lambda_s - \lambda_i)^2}{4 \cdot a^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \text{sen}^2(\theta/2) \cdot \left( 1 + \frac{(\lambda_s - \lambda_i)}{\lambda_i} \right)} \right) + \right. \\ \left. \frac{Z}{b} \cdot \left| \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 \cdot \exp \left( - \frac{c^2 \cdot (\lambda_s - \lambda_i)^2}{4 \cdot b^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \text{sen}^2(\theta/2) \cdot \left( 1 + \frac{(\lambda_s - \lambda_i)}{\lambda_i} \right)} \right) \right\}$$

O primeiro termo entre as chaves da equação acima ( equação 3 ) corresponde a correlação de cada elétron com os demais eletrons, ou seja, cada elétron causa uma perturbação na distribuição de densidade eletrônica. O segundo termo corresponde a contribuição da perturbação na distribuição eletrônica ocasionada pela presença dos ions.

Da análise desta equação verificamos que a densidade (  $n_e$  ) influencia principalmente a intensidade do espectro espalhado, enquanto que a temperatura contribui na intensidade e na largura do espectro através dos termos **a** e **b** . A variação do ângulo de observação (  $\theta$  ) também modifica a intensidade e a largura do perfil espalhado.

## 2.1 - Sinais Esperados para o ETE

A utilização da expressão anterior ( equação 3 ) permite nos verificar o comportamento do espectro para o tokamak ETE. Para o ETE estima-se uma densidade de  $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  e uma temperatura eletrônica entre 50 eV e 300 eV. O plasma deve ser explorado por um laser de rubi (  $\lambda = 6943 \text{ \AA}$  ) de 10 J de energia e com duração de pulso de 20 ns. Na figura 2.4 é mostrado o comportamento do espectro para esta faixa de temperatura para um ângulo de observação  $\theta = 90^\circ$ . Observamos que para estas condições a largura espectral fica entre 230Å e 500Å e o número de fons espalhados por unidade de comprimento de onda entre  $1,4 \cdot 10^{15}$  e  $5,6 \cdot 10^{14}$  para um angulo sólido de observação de  $\Omega = 0,2 \text{ sr}$  e um volume espalhador de 2 cm.

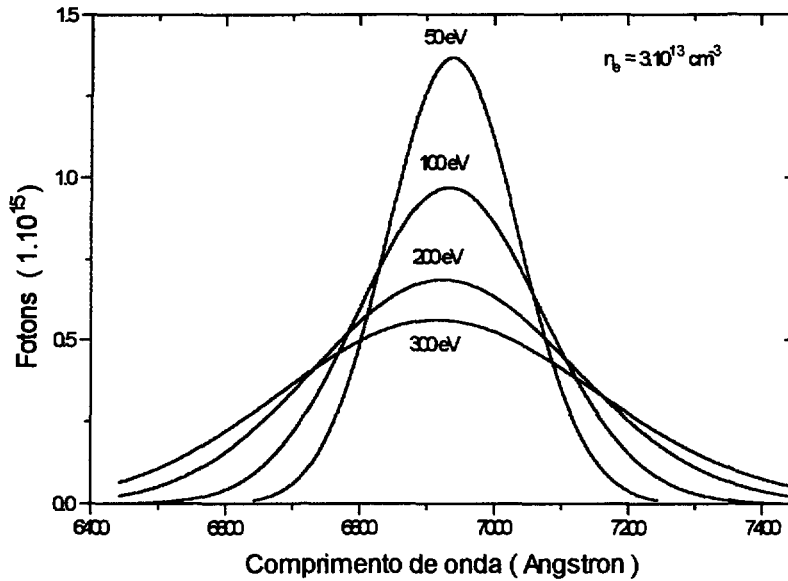


Figura 2.4 : Variação do perfil espectral em relação a temperatura eletrônica.

A potência total espalhada sobre todas as frequências é representada por :

$$\frac{P_s}{P_i} = r_o^2 \cdot n_e \cdot L \cdot d\Omega = 7,95 \times 10^{-30} \cdot n_e \cdot L \cdot d\Omega \quad (4)$$

Utilizando os dados do gráfico anterior ( figura 3 ), encontramos para esta relação o valor de  $P_s/P_i = 10^{-12}$ . Esta é a principal razão que torna este diagnóstico difícil de ser instalado, requerendo atenção especial na ótica de injeção e saída para diminuir a quantidade de luz espúria ( do inglês : “stray light “ ) do sistema.

Para que o espalhamento pelo plasma seja utilizado como um bom diagnóstico, o laser não pode perturbá-lo. A equação 5 fornece o erro relativo do aquecimento do plasma pelo laser.

$$\frac{\Delta T}{T} = 5,32 \cdot 10^{-7} \times \left( \frac{n \times Z}{T^{\frac{3}{2}}} \right) \times \lambda_i^3 \times \left[ 1 - e^{-\frac{h\nu}{T}} \right] \times I_o \times \Delta\tau \quad (5)$$

onde  $n$  é a densidade eletrônica em  $\text{cm}^{-3}$ ,  $Z$  é o número de carga do íon,  $T$  é a temperatura eletrônica em eV,  $\lambda_i$  é o comprimento de onda do laser em cm,  $h\nu$  é a energia de um fóton incidente em eV,  $I_o$  é a intensidade do laser em  $\text{W}/\text{cm}^2$  e  $\Delta\tau$  é a duração do pulso do laser em segundos.

Para um plasma de hidrogênio (  $z=1$  ) com  $T_e = 200$  eV e com um laser de rubi focalizado em uma área de 3 mm de diâmetro, encontramos  $\Delta T/T = 2.10^{-7}$ , o que representa um aquecimento desprezível.

Para uma temperatura de 200 eV é esperado para a região central do espectro (  $\lambda = 6943 \text{ \AA} \pm 12 \text{ \AA}$  )  $2.10^6$  ftons espalhados com uma ótica de coleção de F/9. Considerando uma transmissão da ótica ( lente, espelhos, janelas e espectrometro ) de 40 % e uma eficiência de 2,5 % para o detetor ( fotomultiplicadora RCA 31034 ), este valor cai para  $1,5.10^4$  ftons, o que representa um sinal de 240 mV ( resistor de leitura :  $50 \Omega$  ) para uma amplificação de  $2.10^6$  do detetor. Este sinal é facilmente detetável utilizando-se um sistema de aquisição de dados adequado.

### 3 - Tokamak Esférico ETE

Está em fase inicial de construção no Laboratório Associado de Plasma ( LAP ) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais ( INPE ) o tokamak ETE ( Experimento Tokamak Esférico ) de baixa razão de aspecto (  $R/a = 1,5$  ) [Lud93]. Na figura 3.1 estão listados os parâmetros básicos para a fase inicial de operação do ETE. Na figura 3.2 temos uma visão em corte da máquina, onde podemos observar as dimensões principais, parte da estrutura de sustentação, a câmara de vácuo e as bobinas ( toroidal e poloidal ). A câmara de vácuo será construída em Inconel 625 e estarão disponíveis 58 janelas de acesso, no padrão CONFLAT ( 12xCF14, 4xCF250, 42xCF40 ). A bobina toroidal consiste de 12 espiras no formato D, construídas em cobre eletrolítico. O sistema de controle dos bancos de capacitores, sistema de injeção de gás e bombas de vácuo serão controlados por um sistema CAMAC, enquanto que para a aquisição de dados será utilizado um sistema VME.

Raio maior $R_o(a)$	0,30 m
Razão de aspecto $A = R_o(a)/a$	1,5
Elongação $\kappa(a)$	1,6 - 1,8
Triangularidade $\delta(a)$	0,3
Campo magnético toroidal $B_o$	0,4 T
Corrente de plasma toroidal $I_T(a)$	0,22 MA

Figura 3.1 : Parâmetros básicos do ETE .

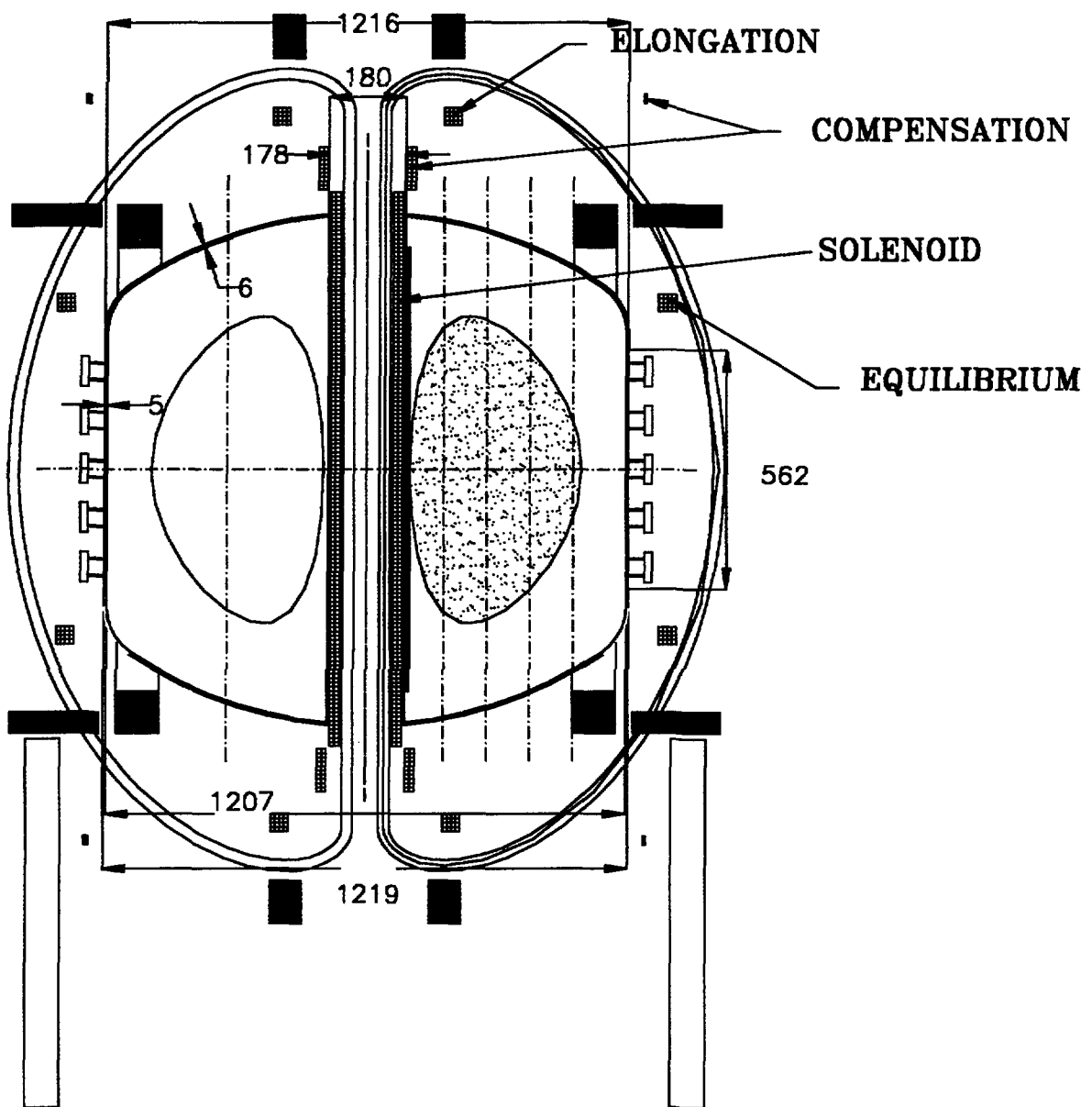


Figura 3.2 : Corte transversal do tokamak ETE

## **4 - Sistema Preliminar de Espalhamento Thomson**

Para a medida do perfil de densidade e temperatura do plasma no ETE um sistema de ET está sendo especificado. Sendo que a maior dificuldade deste diagnóstico é a presença de luz espúria, o projeto do sistema de injeção e bloqueio da luz do laser merece atenção especial. Na figura 4.1 é fornecida uma visão geral do sistema de ET proposto. O feixe do laser deverá ser injetado fazendo um ângulo de  $75^\circ$  com a face de uma flange CF250, passando a 5 cm da coluna central do ETE ( figura 4.2 ). Neste trabalho serão discutidos o tubo de vôo, o sistema de bloqueio da luz do laser e o sistema de varredura para a primeira fase de implantação do diagnóstico.

### **4.1 - Tubo de Vôo**

O tubo de vôo foi projetado de forma a colimar o feixe do laser e principalmente amortecer e bloquear a luz espúria procedente da divergência do feixe e das reflexões na janela de entrada. Este tubo ( figura 4.3 ) deverá ser em aço-inox com 1,3 m de comprimento e 6,7 cm de diâmetro. Internamente deverá ser usinado para que peças especiais em alumínio anodizado ( preto fosco ) possam ser inseridas com facilidade ( figura 4.3D ) e para manter a integridade do alinhamento. Duas ou três iris em alumínio anodizado ou vidro escuro ( do inglês : “blue glass “ ) deverão ser colocadas ao longo do tubo, sendo que as suas posições e aberturas dependem do diâmetro e da divergência do laser. A janela de entrada ( figura 4.3C ) apresenta uma inclinação de  $4^\circ$  para evitar que a reflexão do laser volte para o bastão de rubi , danificando o laser.

Para conectar o tubo de vôo ao ETE será utilizado uma flange de conexão (figura 4.5 ) e um bellow ( figura 4.4 ) para permitir uma pequena flexibilidade e isolar o sistema de vibrações mecânicas durante o disparo da máquina.

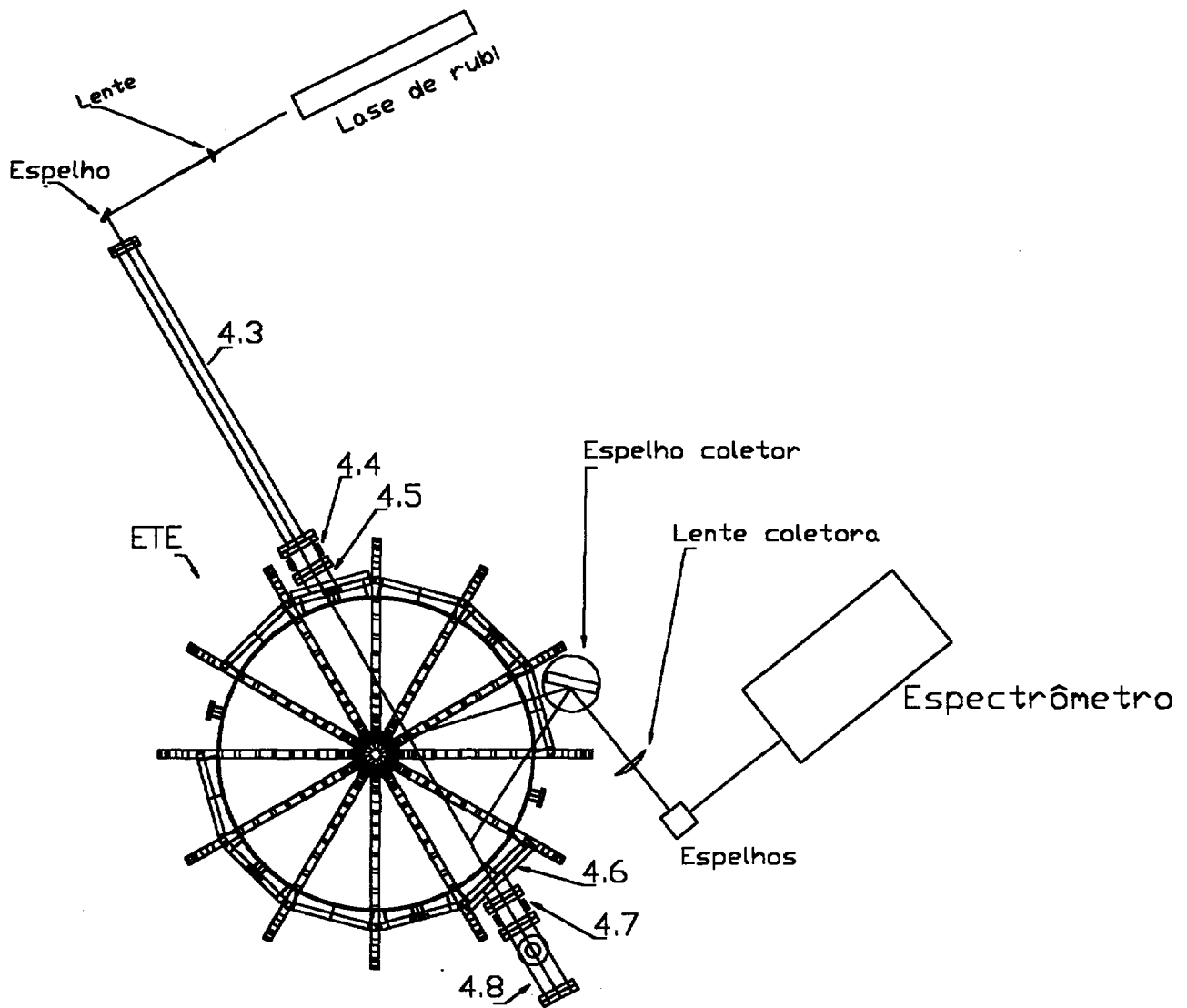


Figura 4.1 : Vista superior da primeira versão do Espalhamento Thomson para o ETE



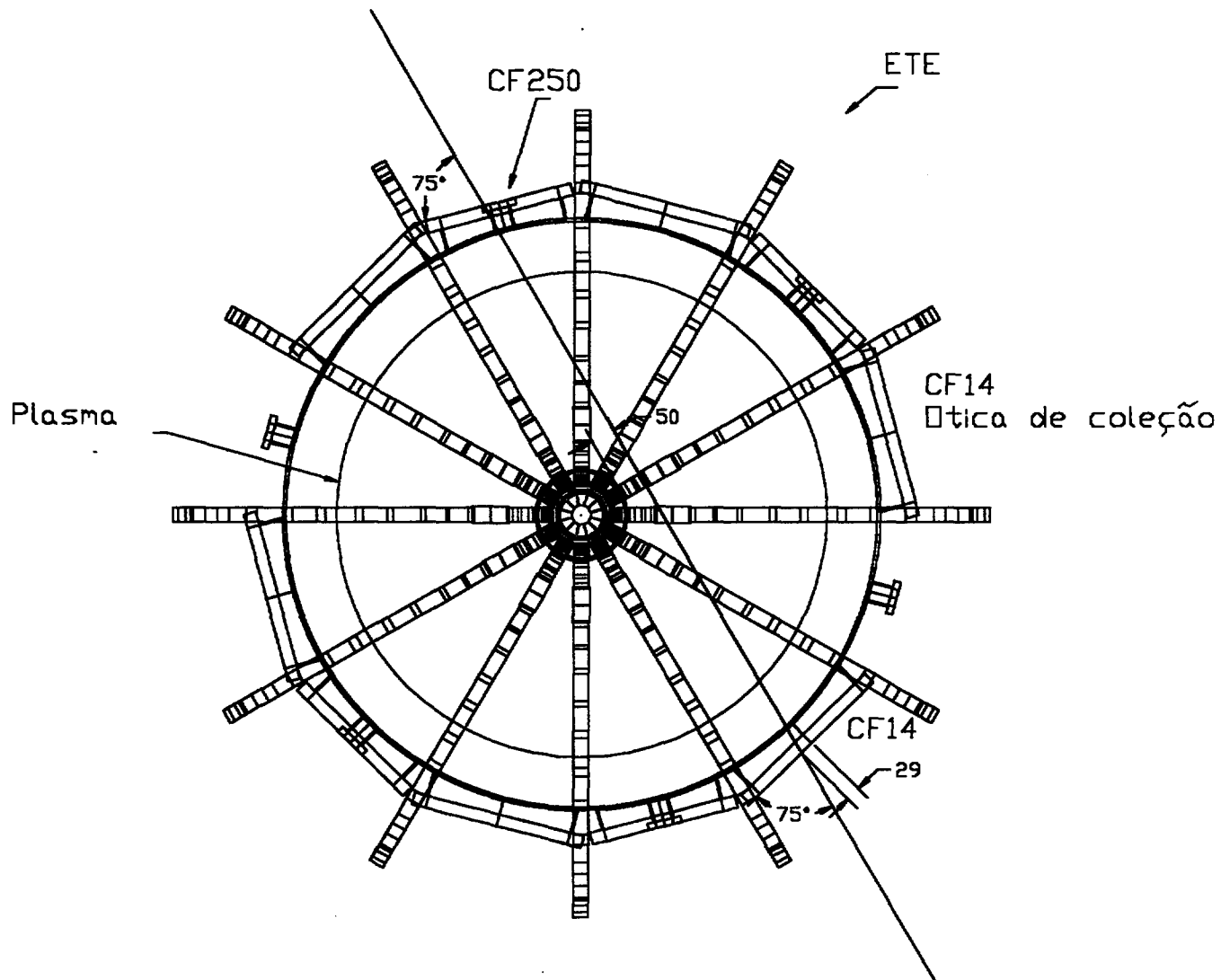


Figura 4.2 : Detalhes da posição de entrada do feixe do laser no ETE.

( Em escala )

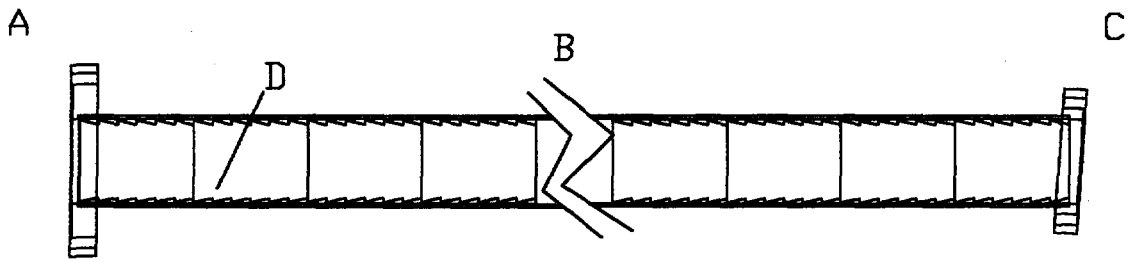


Figura 4.3 : Tubo de voo

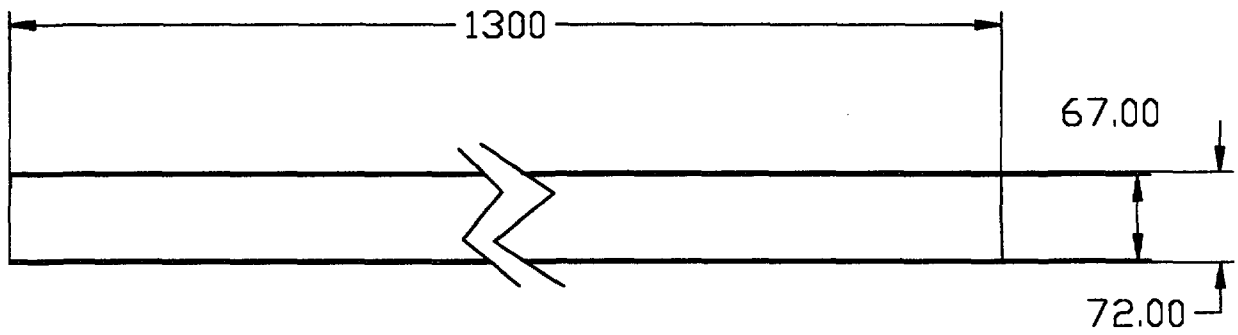


Figura 4.3B : Tubo de aço-inox

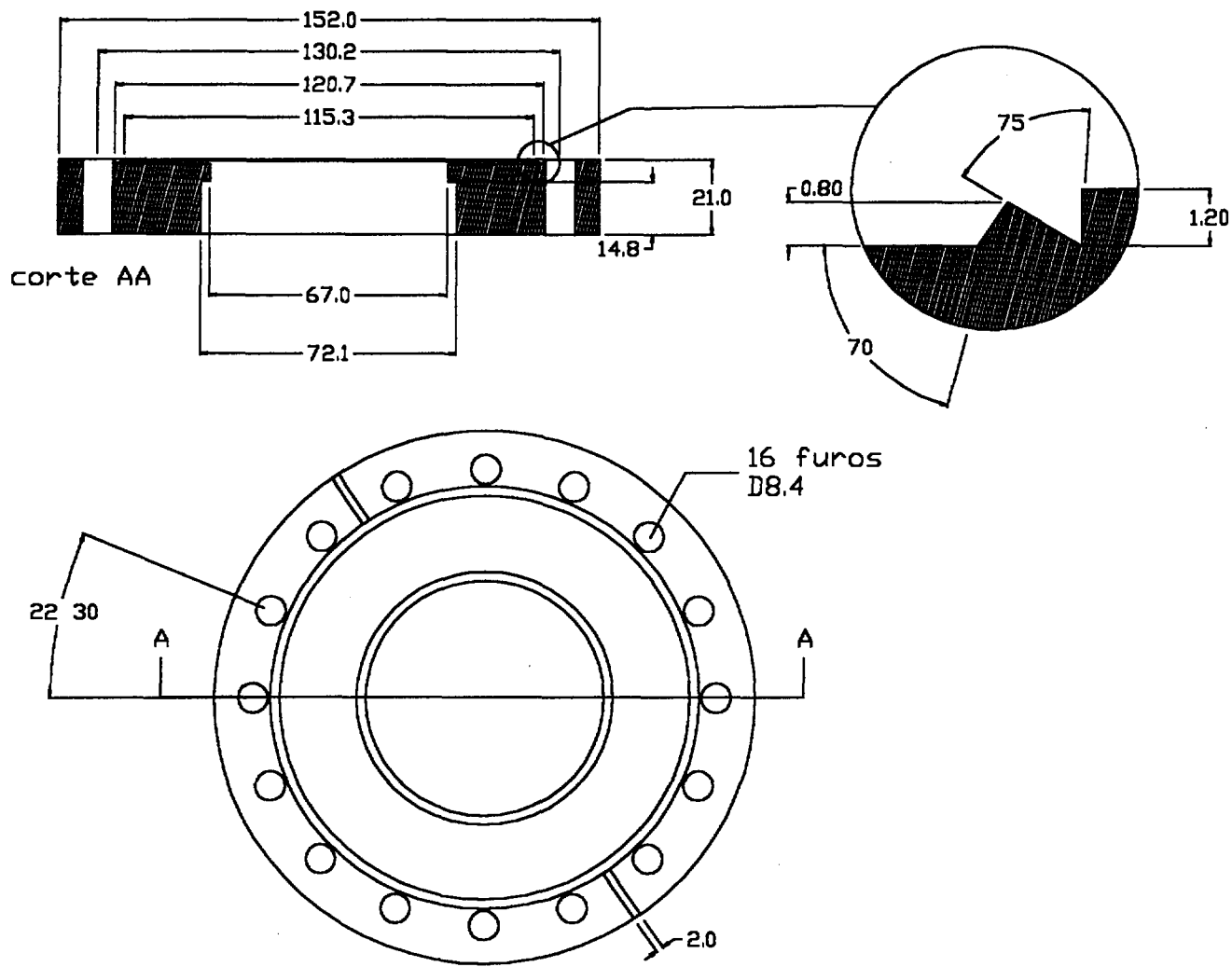


Figura 4.3A : Flange CF100

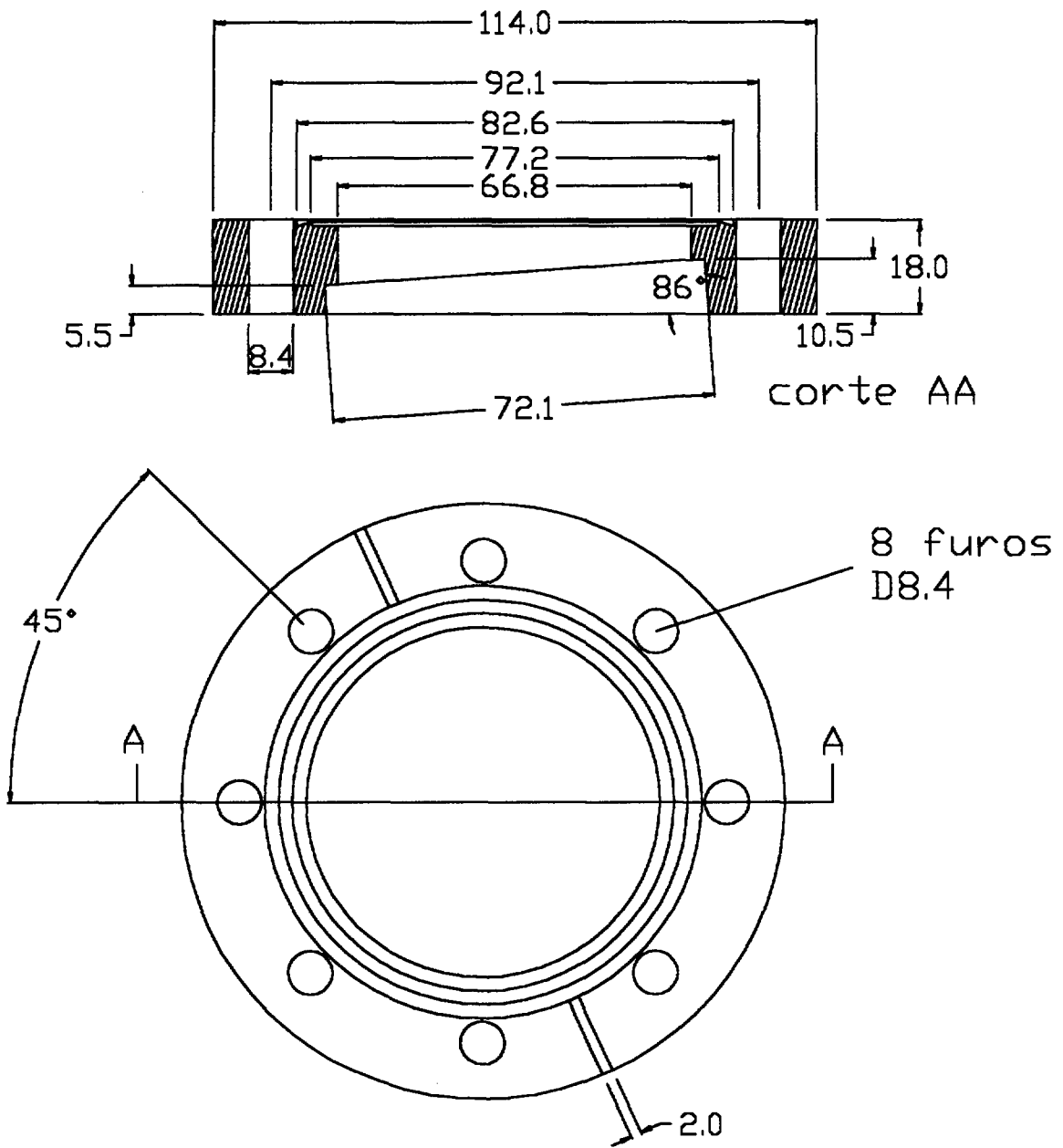


Figura 4.3C : Flange CF63

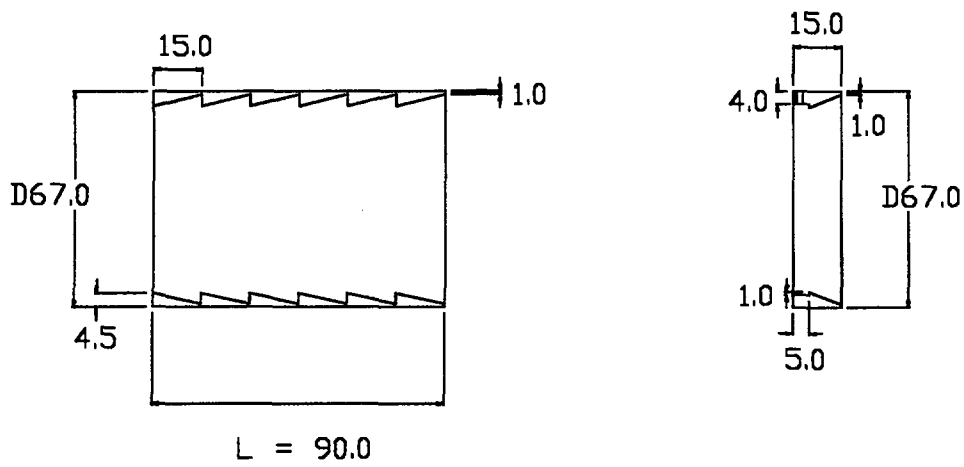


Figura 4.3D : Tubos em alumínio anodizado e suportes de iris para diminuir o stray light

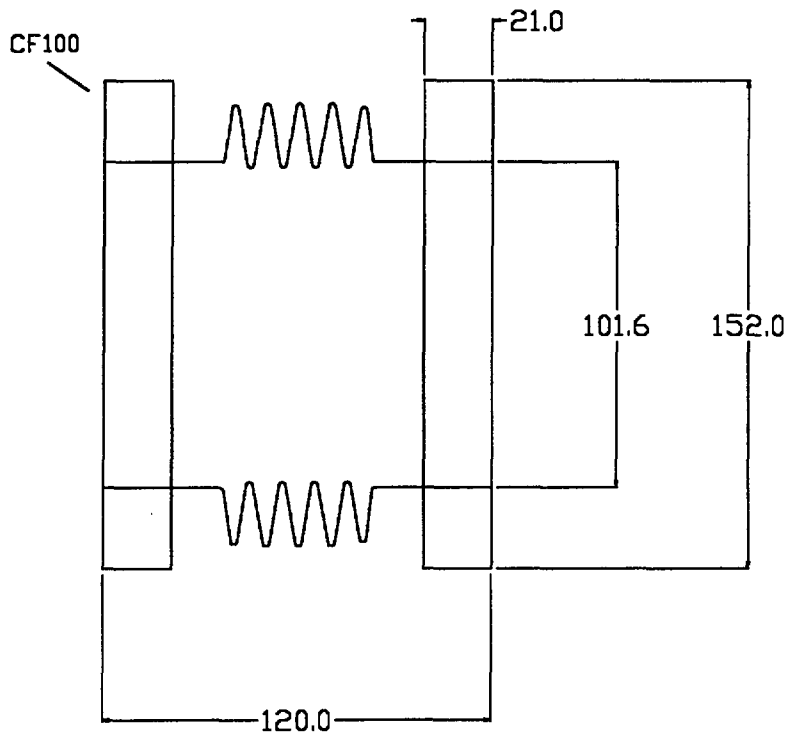


Figura 4.4(7) : Bellows

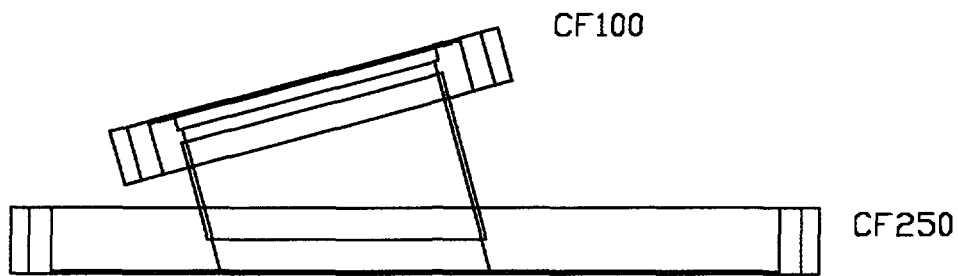


Figura 4.5 : Flange de conexão

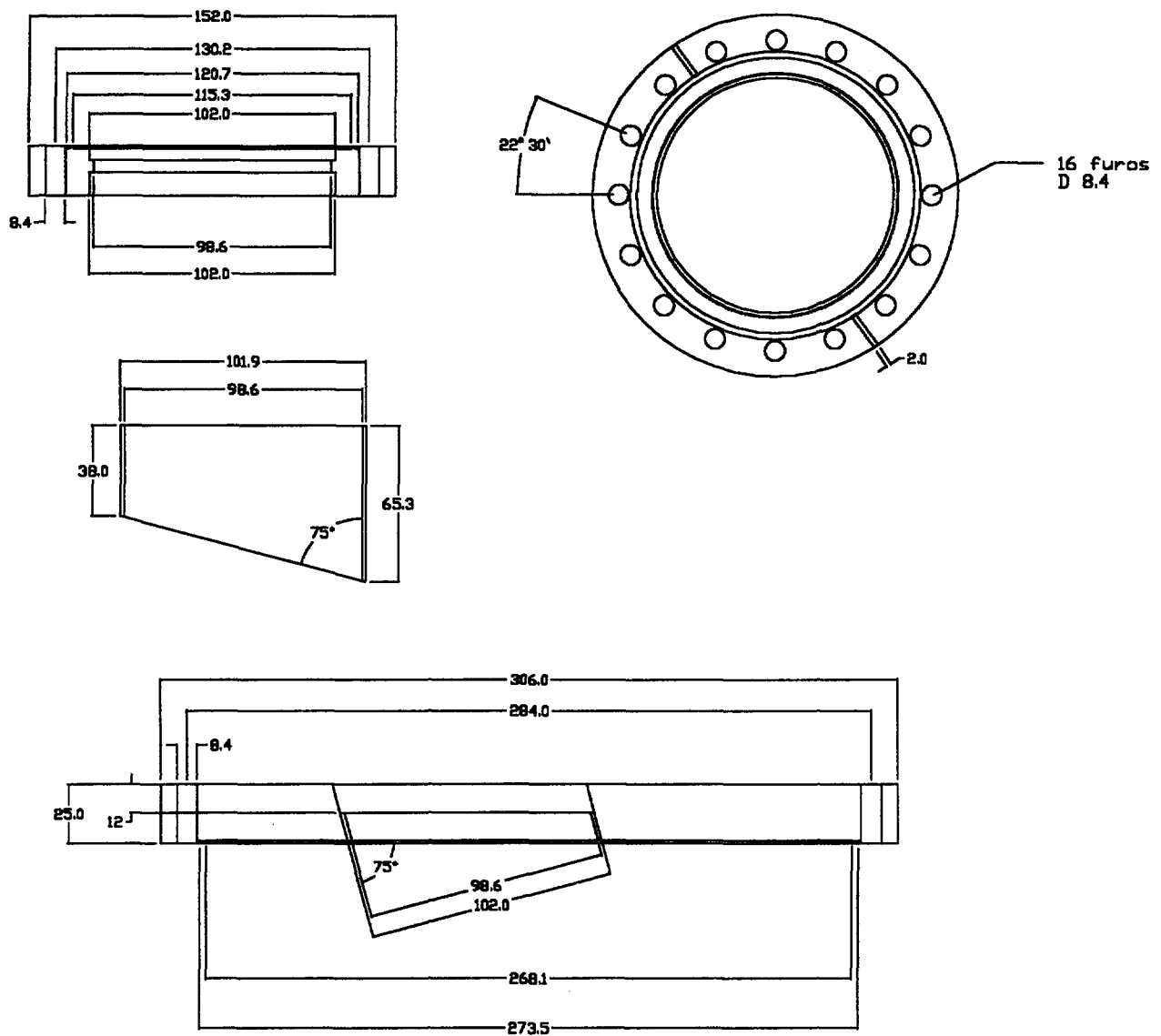


Figura 4.5A : Detalhes da flange de conexão

## 4.2 - Bloqueio da Luz do Laser

Para bloquear a luz do laser ( do inglês : “dump “ ) serão utilizadas duas placas de vidro escuro ( figura 4.8I-J ) dentro de um tubo de aço-inox de 98,4 mm de diâmetro ( figura 4.8F ). Na parte superior do “dump” será adaptado um dispositivo com bellow de forma a permitir que a placa de vidro em ângulo de Brewster possa ser rodada durante o alinhamento do laser ( figura 4.8B-E ). A abertura da iris na entrada do “dump”, da mesma forma que no tubo de vôo, depende da divergência e do diâmetro do feixe do laser.

Toda a parte interna do tubo de vôo e do “dump” que ficarem expostas deverão ser pintadas com tinta preta especial para alto vácuo.

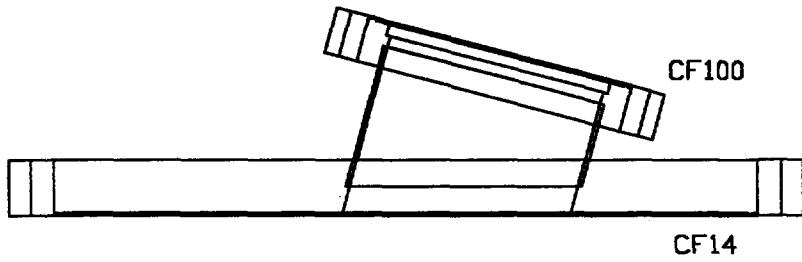


Figura 4.6 : Flange de conexão

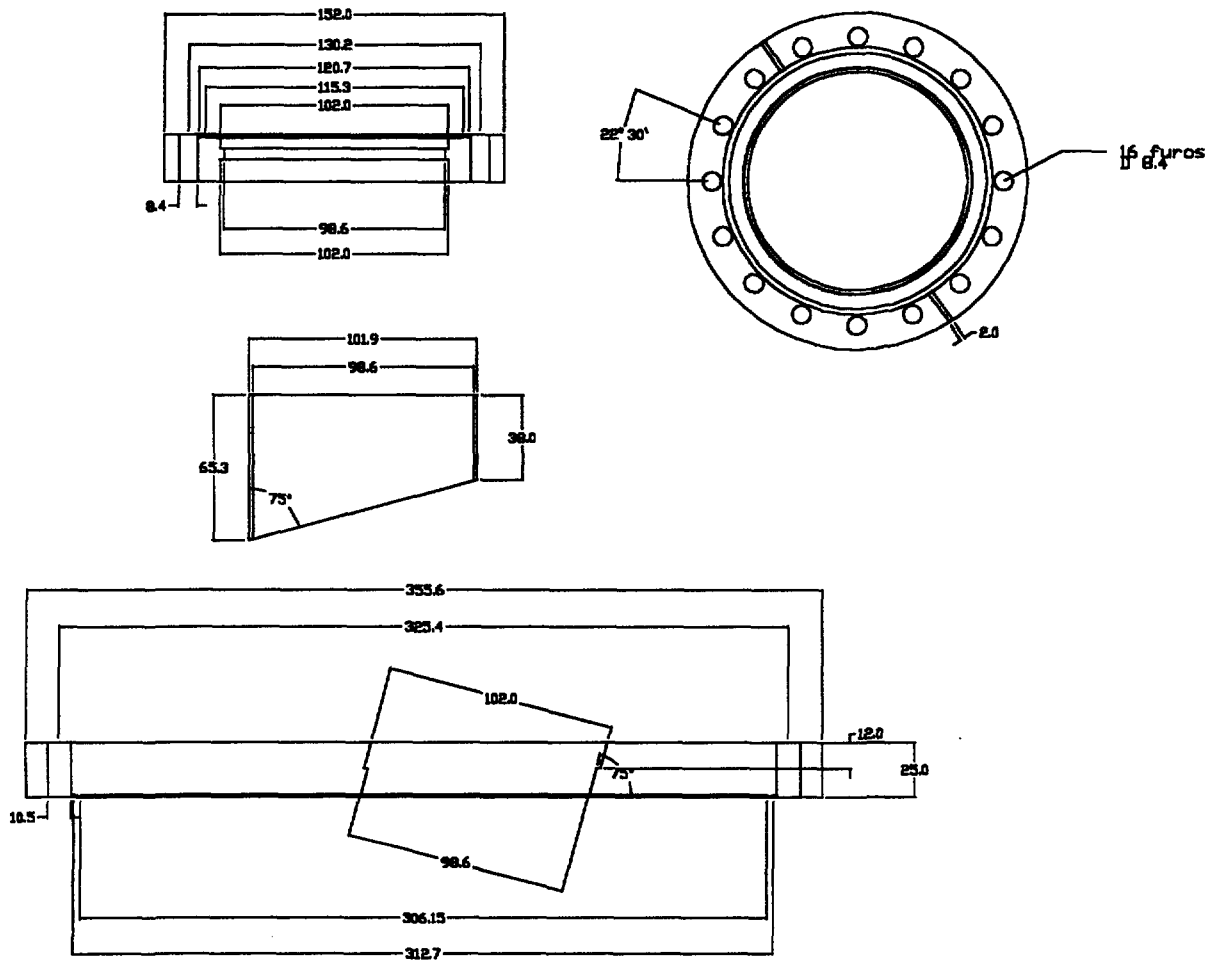


Figura 4.6A : Detalhes da flange de conexão



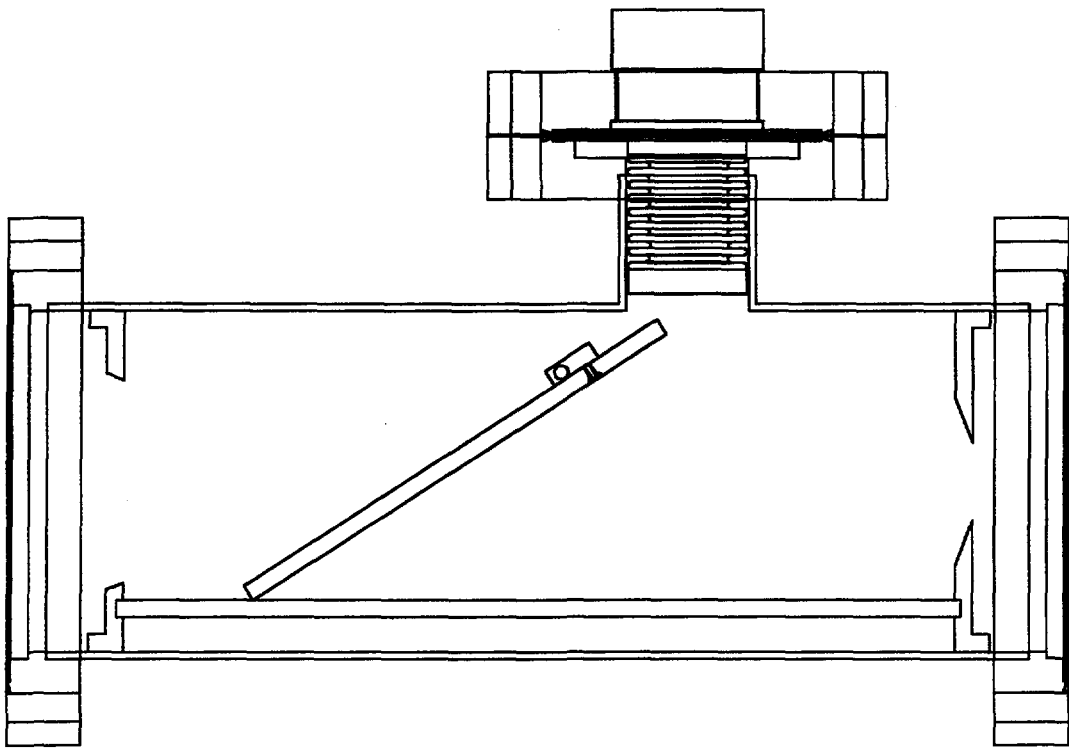


Figura 4.8 : Dump

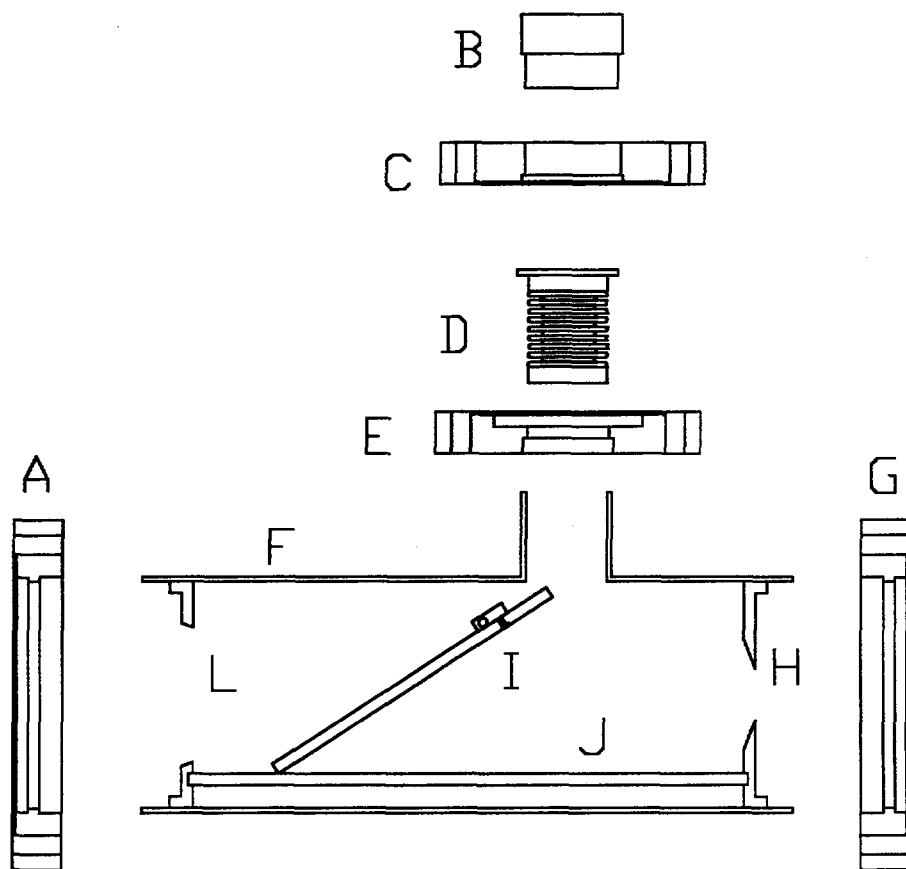
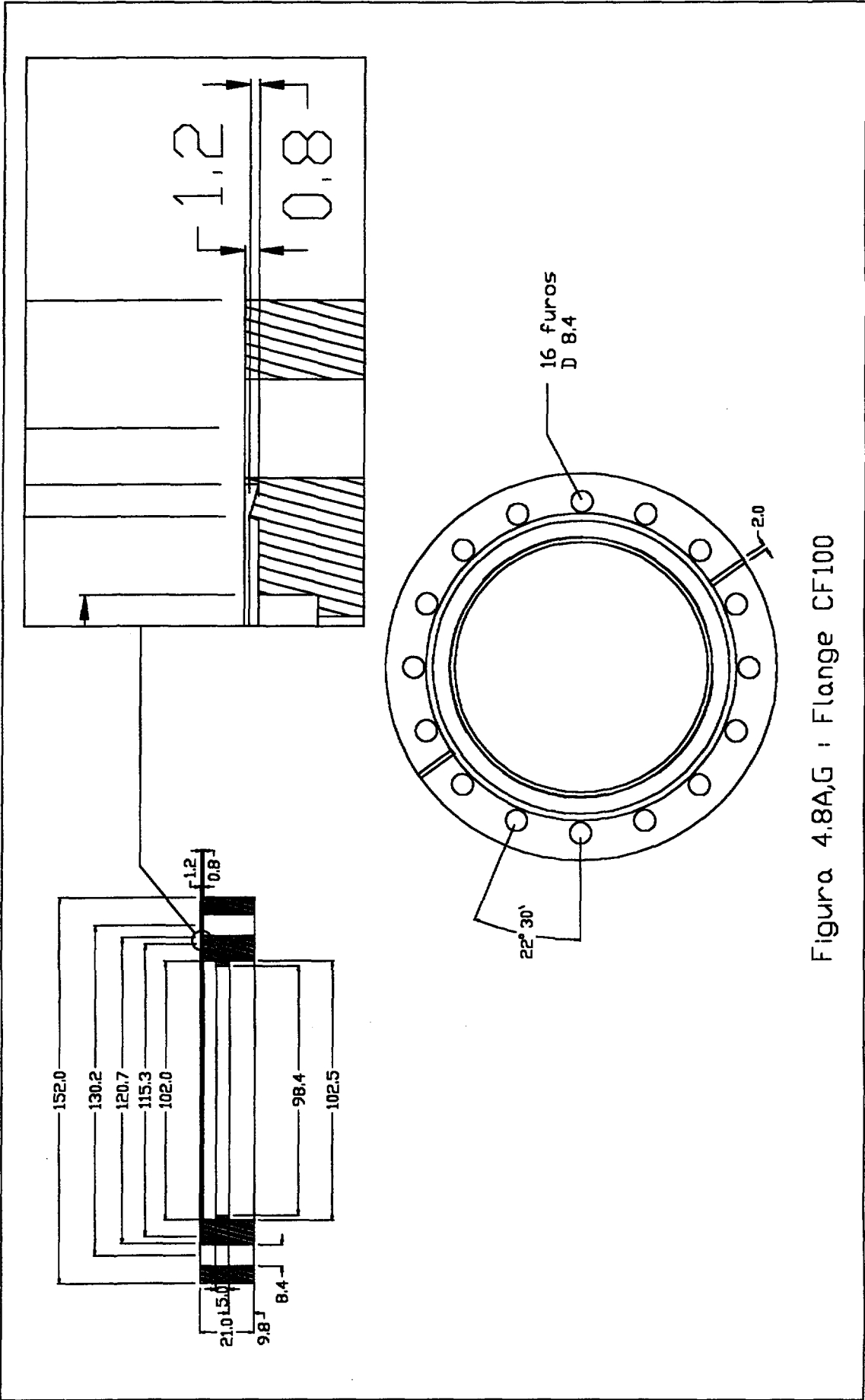


Figura 4.8(detalhes): Detalhes do dump



corte AA

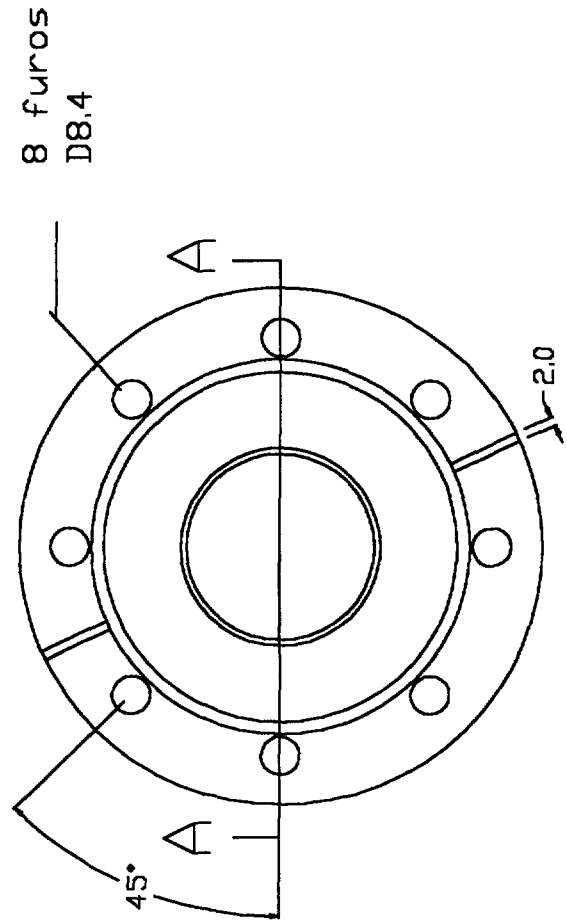
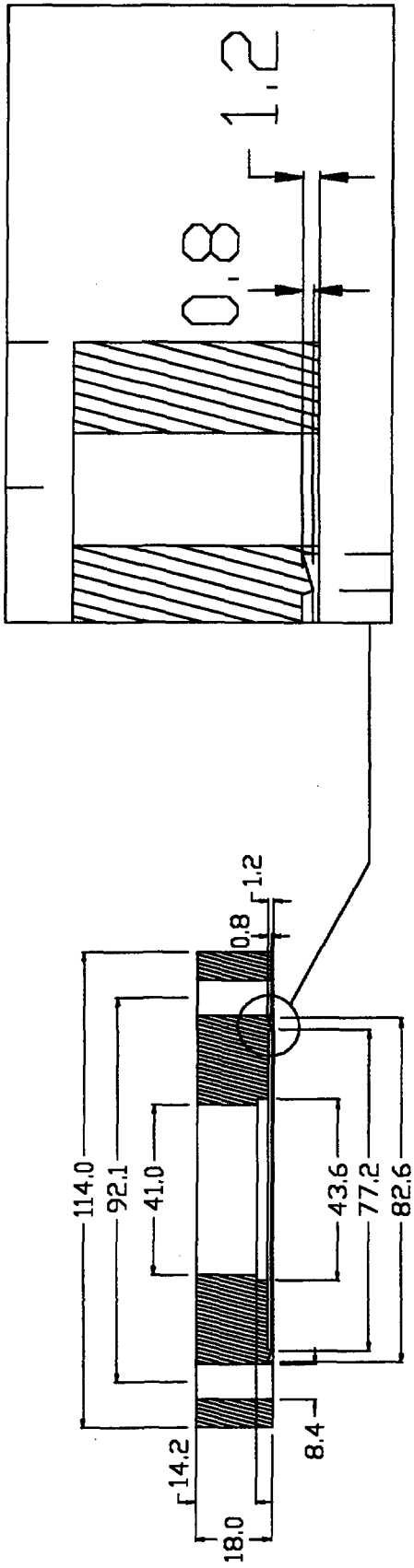


Figura 4.8C : Flange CF63

corte AA

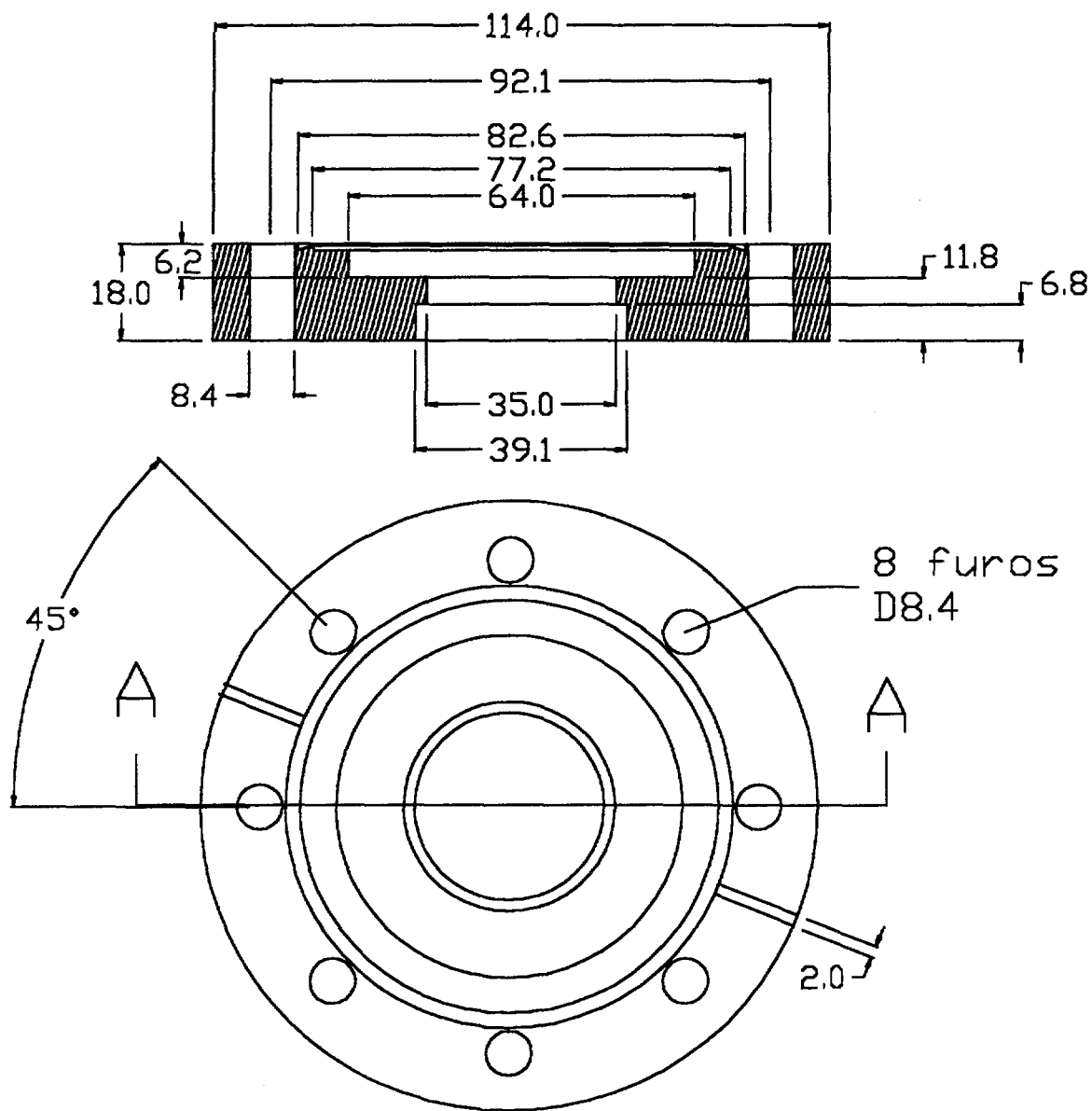


Figura 4.8E : Flange CF63

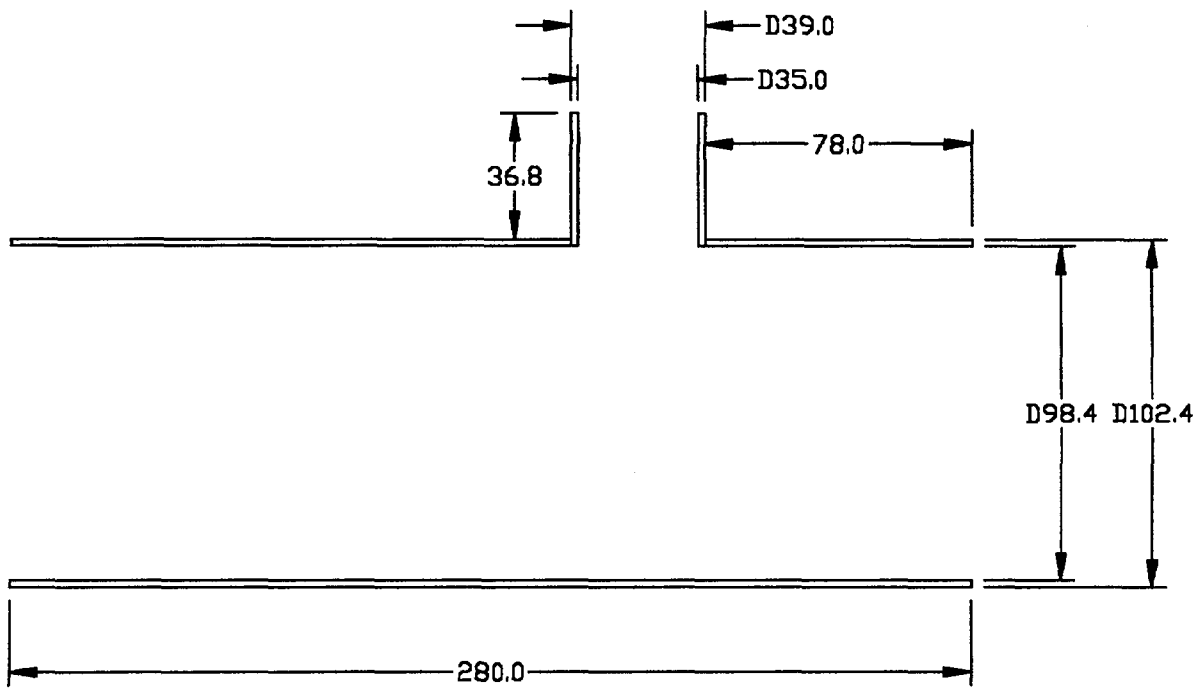


figura 4.8F : Tubo de aço-inox

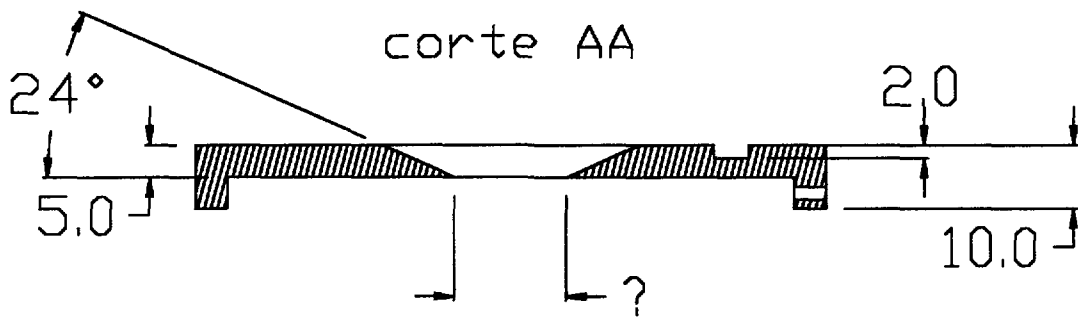
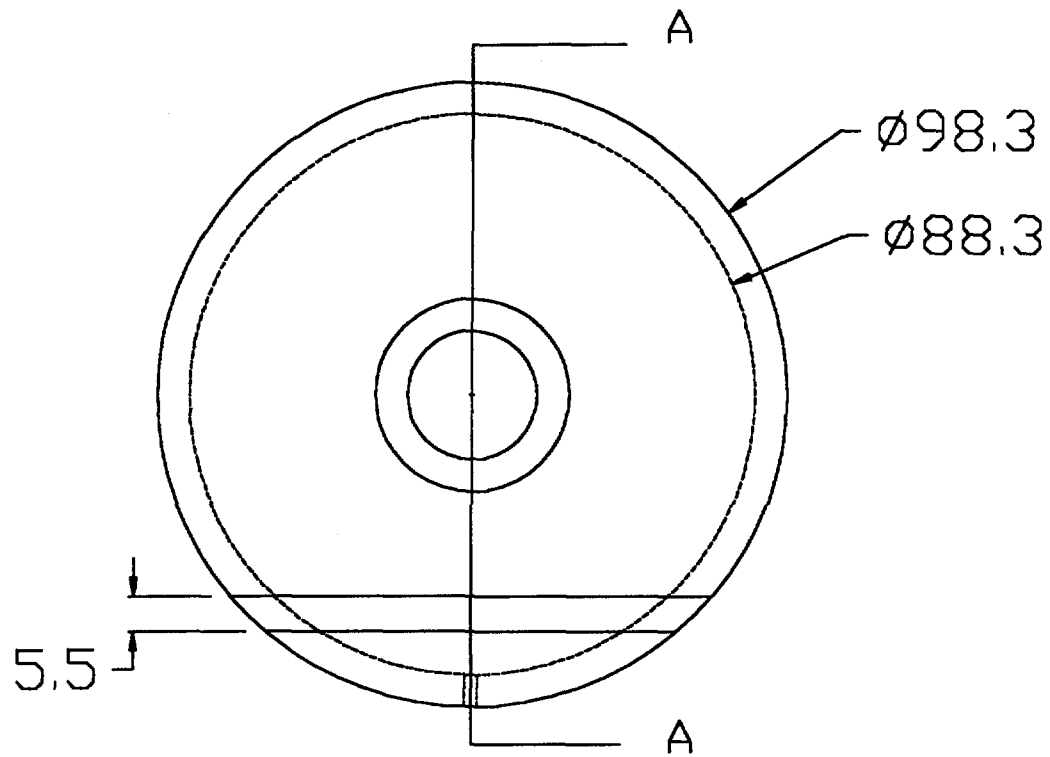


Figura 4.8H : Iris de entrada

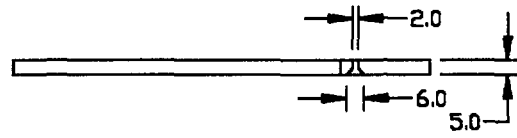
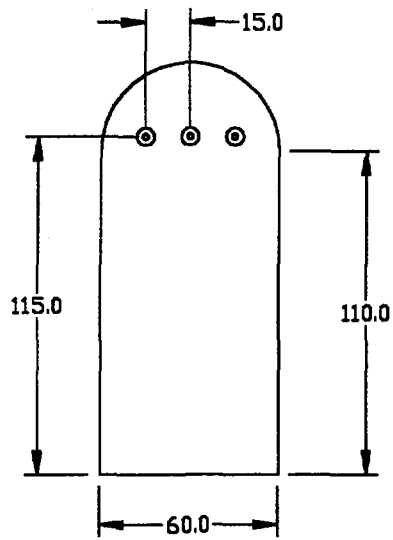


Figura 4.8I : Vidro escuro

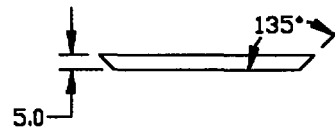
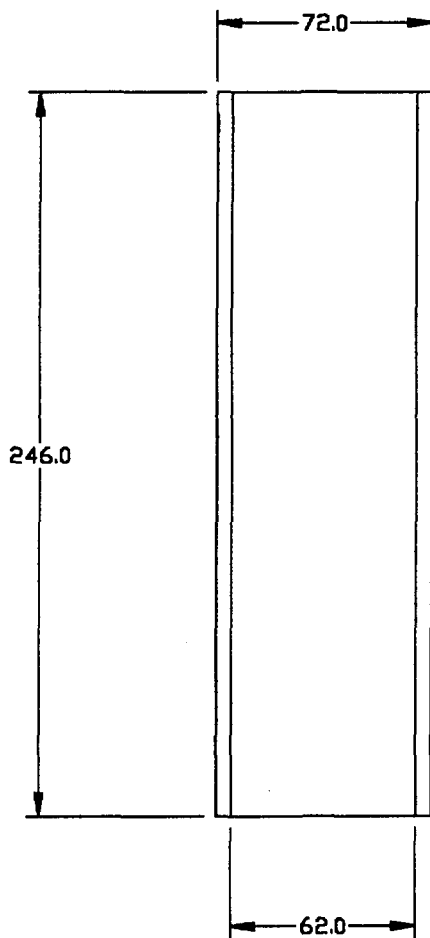


Figura 4.8J : Vidro escuro



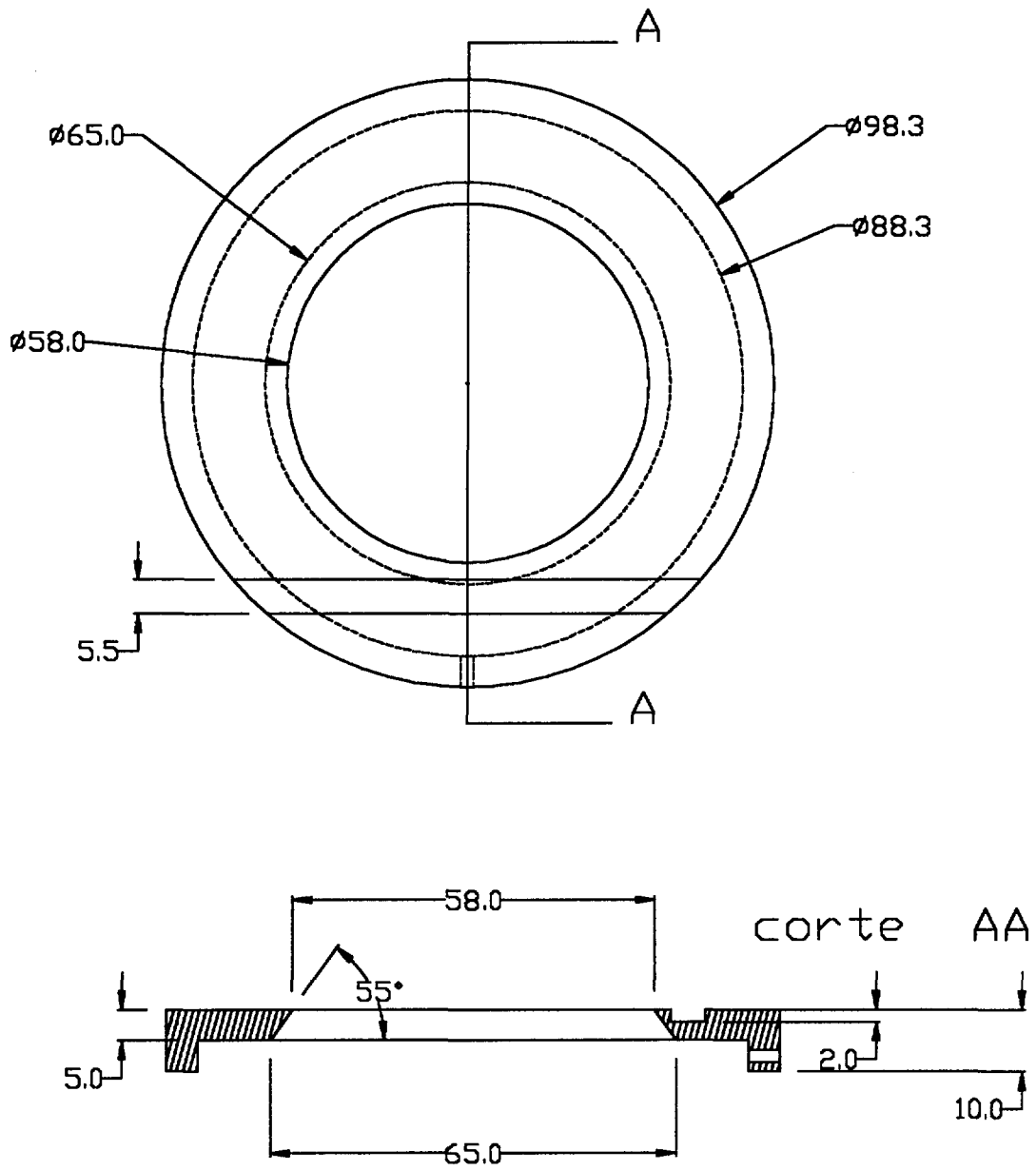


Figura 4.8L : Iris de saída

### 4.3 - Sistema de Varredura

Para coletar a luz espalhada no diagnóstico de ET está sendo desenvolvido um sistema simples para realizar as primeiras medidas. Uma vez conhecidas as intensidades reais do sinal e do “stray light” será projetado um sistema definitivo.

A coleção da luz espalhada será realizada por uma flange CF14 através de um espelho móvel. Este espelho será acionado por um motor de passo acoplado a uma caixa de redução e controlado por um computador, explorando 40 cm do plasma. Para realizar os primeiros testes foi desenvolvido um programa em linguagem Turbo Pascal. Na figura 4.9 observamos que ocorre um erro de posicionamento de até 1,5 mm para algumas posições. Este erro poderá ser reduzido através de programa ou com a aquisição de um sistema de redução mais adequado. Na figura 4.10 é apresentado o diagrama do sistema elétrico da interface utilizada para acionar o motor através da saída paralela do computador e na figura 4.11 temos uma fotografia geral do sistema utilizado para os testes preliminares.

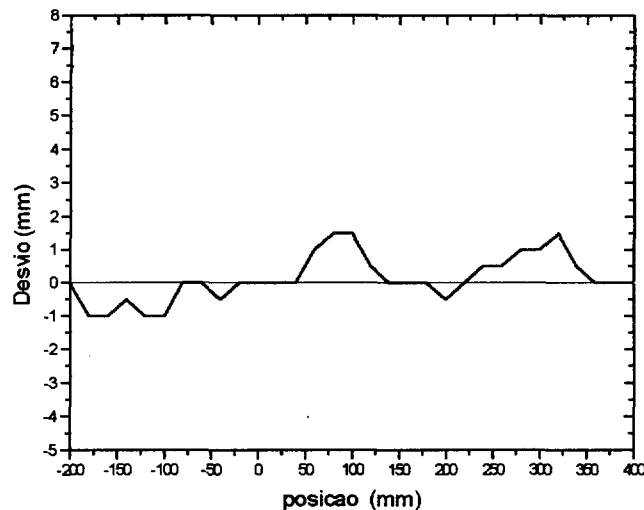


Figura 4.9 : Erro no posicionamento do espelho móvel

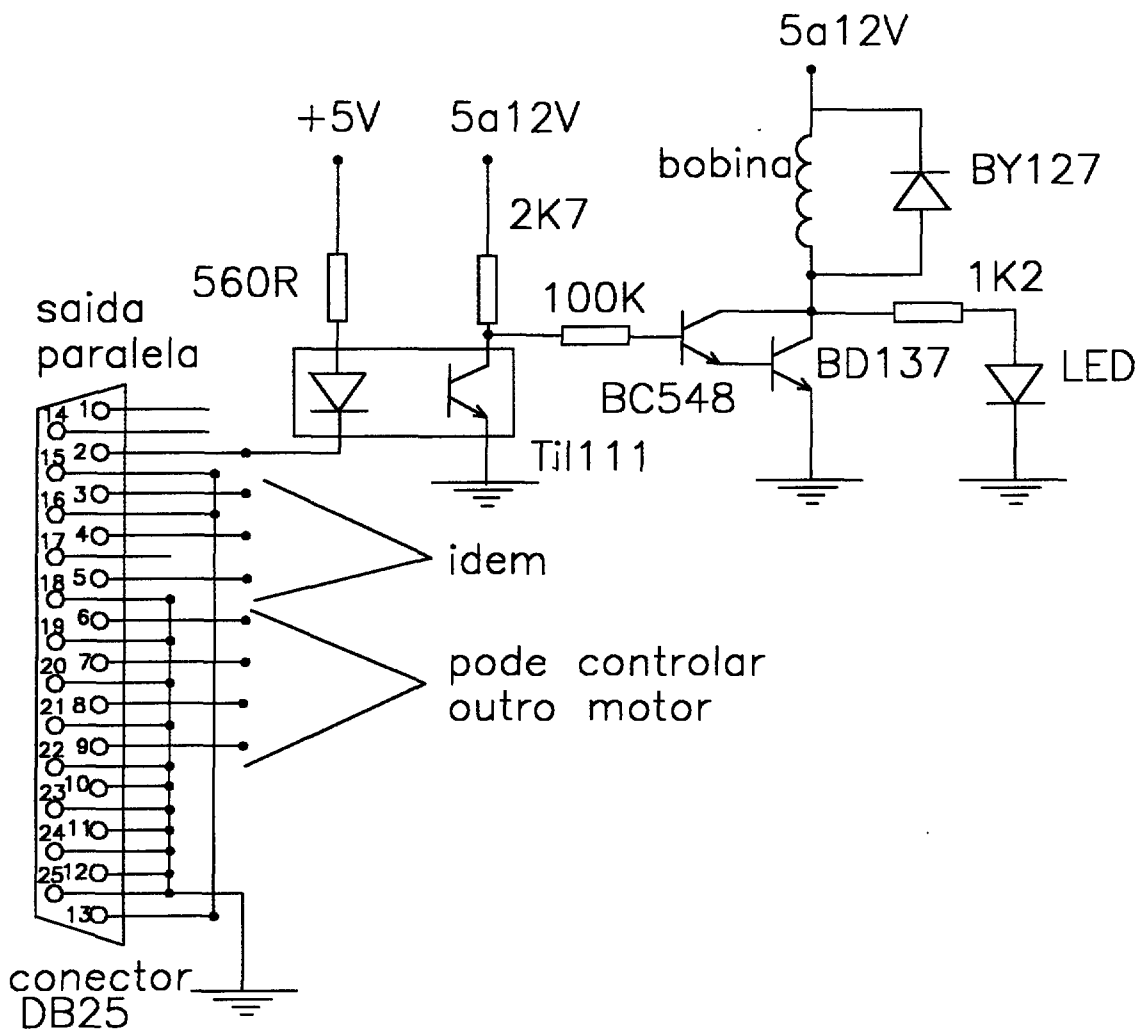


Figura 4.10 : Interface do controlador

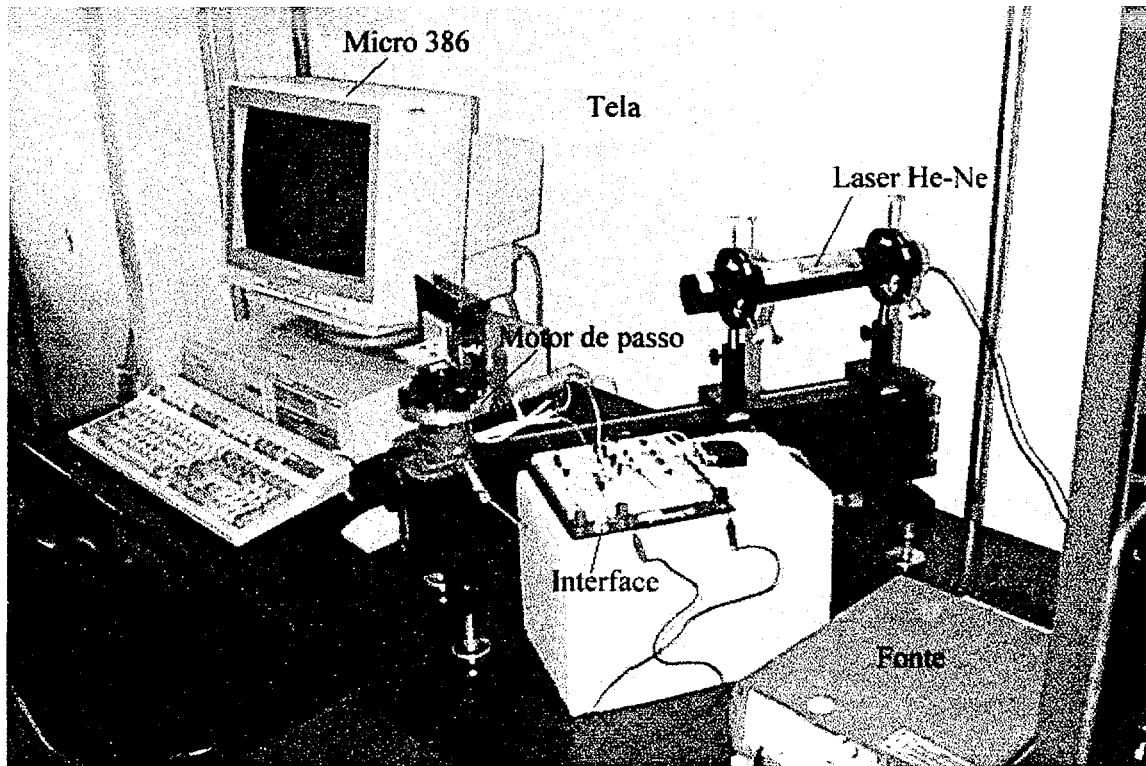


Figura 4.11 : Fotografia da montagem utilizada para os primeiros testes do sistema de varredura.

## 5 - Referências

- Bern96** L.A. Berni; 'Espalhamento Thomson no Toróide Compacto TC-1'; *Tese de doutorado, IFGW/UNICAMP, Agosto 1996*
- Evan69** D.E. Evans, J. Katzenstein; "Laser Light Scattering in laboratory Plasmas"; *Rep. Prog. Phys.* 32, 207, 1969
- Ludw93** G.O. Ludwig; "Anteprojeto de Engenharia do Tokamak ETE"; *Relatório interno NPE-5529-PRE/1796 (LAP/INPE)*
- Shef 75** J. Shiffeld; "Plasma Scattering of Eletromagnetic Radiation"; *Academic Press, New York. 1975*